



HAL
open science

**Dyslexie développementale et méthodes de remédiation :
Conception et évaluation d'un programme d'intervention
multimodale et multi-componentielle fondé sur les
approches phonologique, visuo-attentionnelle et
intermodalitaire**

Karine Harrar-Eskinazi

► **To cite this version:**

Karine Harrar-Eskinazi. Dyslexie développementale et méthodes de remédiation : Conception et évaluation d'un programme d'intervention multimodale et multi-componentielle fondé sur les approches phonologique, visuo-attentionnelle et intermodalitaire. Psychologie. Université Côte d'Azur, 2023. Français. NNT : 2023COAZ2025 . tel-04227874

HAL Id: tel-04227874

<https://theses.hal.science/tel-04227874v1>

Submitted on 4 Oct 2023

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

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

THÈSE DE DOCTORAT

Dyslexie développementale et méthodes de remédiation

Conception et évaluation d'un programme d'intervention multimodale et multi-componentielle fondé sur les approches phonologique, visuo-attentionnelle et intermodalitaire

Karine HARRAR-ESKINAZI

Laboratoire d'Anthropologie et de Psychologie Cliniques, Cognitives et Sociales (LAPCOS)

**Présentée en vue de l'obtention
du grade de docteur en Psychologie
d'Université Côte d'Azur**

Dirigée par : Sylvane Faure
Co-encadrée par : Bruno De Cara
Soutenue le : 28 juin 2023

Devant le jury, composé de :

Séverine CASALIS, Professeure des
Universités, Université de Lille & CNRS
Michel HABIB, Praticien Hospitalier, Aix-
Marseille Université
Fanny MEUNIER, Directrice de Recherche,
CNRS, Université Côte d'Azur
Franck RAMUS, Directeur de Recherche,
CNRS, École Normale Supérieure
Brigitte STANKÉ, Professeure agrégée,
Université de Montréal
Johannes ZIEGLER, Directeur de Recherche,
Aix-Marseille Université

Dyslexie développementale et méthodes de remédiation

Conception et évaluation d'un programme d'intervention multimodale et multi-composante fondé sur les approches phonologique, visuo-attentionnelle et intermodale

Présidente du jury

Fanny Meunier, Professeure des Universités, Université Côte d'Azur

Rapportrice et rapporteur

Séverine Casalis, Professeure des Universités, Université de Lille & CNRS

Franck Ramus, Directeur de recherche, CNRS, Ecole Normale Supérieure

Examinatrices

Brigitte Stanké, Professeure agrégée, Université de Montréal

Fanny Meunier, Professeure des Universités, Université Côte d'Azur

Invités

Michel Habib, Praticien Hospitalier, Aix-Marseille Université

Johannes Ziegler, Directeur de Recherche, Aix-Marseille Université

Directrice et co-directeur de thèse

Syvane Faure, Professeure des Universités, Université Côte d'Azur

Bruno De Cara, Maître de Conférence Universitaire, Université Côte d'Azur

A mes enfants, Eva, Jérémie, Salomé

Attirante ou effrayante, douce ou acerbe, bienfaitrice ou délétère, la vie est un rêve magique, magnifique, excitant si nous apprenons à la sublimer et à la pervertir par nos sens, nos émotions, nos intuitions, pour n'en extraire que l'essence ultime de l'amour, la répandre autour de nous telle une nuée de jolis papillons bleus, sans préjugé, sans contrainte, sans interdiction, juste un désir irrépressible, permanent, violent, incontrôlable de vivre et d'aimer.

Résumé

Parmi les troubles du langage écrit, la dyslexie développementale est définie comme un trouble spécifique de l'apprentissage du langage écrit dont les répercussions sur les apprentissages scolaires, durables et délétères, nécessitent des réponses thérapeutiques efficaces. Les études sur la remédiation de la dyslexie développementale sont généralement fondées sur l'hypothèse causale d'une altération plus ou moins exclusive d'un processus cognitif sous-jacent. Or, chez la majorité des lecteurs dyslexiques, de multiples déficits cognitifs sous-jacents, variables selon les individus, seraient simultanément responsables des troubles comportementaux de la lecture et de l'orthographe. Ainsi, une *multifactorialité étiologique* de la dyslexie développementale entraîne une *hétérogénéité sémiologique* qui s'exprime dans une variabilité clinique très complexe dont les contours imprécis peuvent entraîner un diagnostic incertain, ce que nous avons nommé *variabilité nosographique*.

Dans ce contexte théorique et à la lumière des modèles à déficits multiples de la dyslexie développementale, nous avons élaboré un protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle ciblant à la fois les processus cognitifs sous-jacents audio-phonologiques, visuo-attentionnels et intermodalitaires et les troubles de la lecture et de l'orthographe, selon une approche qui combine plusieurs entraînements conçus en fonction du profil sémiologique individuel. Grâce à la participation de 94 orthophonistes, nous avons évalué les bénéfices de ce protocole à partir d'un essai clinique, multicentrique, longitudinal, randomisé, croisé, mené en trois phases sur une durée totale de 16 mois, auprès de 144 lecteurs dyslexiques âgés de 8 à 13 ans.

Lors de la première phase, les participants répartis aléatoirement en deux groupes, ont bénéficié pendant 2 mois de consultations de rééducation orthophonique hebdomadaires sans entraînement intensif. Lors de la deuxième phase, les participants ont bénéficié, outre leur suivi hebdomadaire, de trois types d'interventions intensives informatisées d'une durée de deux mois

chacune. Les deux premières interventions ciblent les processus audio-phonologiques et visuo-attentionnels (dont l'ordre est contrebalancé entre les deux groupes) puis sont suivies d'une intervention qui cible les processus intermodalitaires. La construction des trois programmes d'entraînement s'est appuyée sur la littérature scientifique, l'expertise des orthophonistes, la plainte du patient (décision partagée de soin) et sur le contexte environnemental. Lors de la troisième phase, les interventions intensives ont été interrompues et les consultations hebdomadaires de rééducation orthophonique maintenues pendant deux mois.

A l'issue du protocole de remédiation, les effets de l'intervention multimodale et multi-composante intensive ont montré une amélioration significative de l'efficacité en lecture (d de Cohen=2,3), de la compréhension en lecture (d de Cohen=0,9) et de l'orthographe (d de Cohen=0,78), comparée à une rééducation orthophonique hebdomadaire (première phase), et ce quel que soit l'ordre des interventions. L'analyse de cas multiples a révélé qu'à l'issue du protocole de remédiation 52 % des participants n'avaient plus de trouble de la lecture.

En conclusion, nos résultats montrent l'efficacité d'une remédiation intensive multimodale et multi-composante dans le traitement de la dyslexie développementale. Ces résultats confirment le caractère davantage curatif que compensatoire de nos interventions et ouvrent une nouvelle piste pour la remédiation de la dyslexie développementale.

Mots-clés : troubles d'apprentissage, dyslexie développementale, déficits cognitifs sous-jacents, remédiation multimodale et multi-composante, essai clinique randomisé.

Abstract

Dyslexia is a neurodevelopmental disorder that affects children's ability to read and spell words accurately and effectively. Most remediation studies are based on the hypothesis that the core deficit in dyslexic children is based on a single underlying cognitive deficit. However, a large number of studies suggest that most dyslexic children exhibit multiple underlying cognitive deficits that are simultaneously present to varying degrees, leading to a wide range of clinical disorders in reading and spelling. Thus, *etiological multifactoriality* in developmental dyslexia leads to *semiological heterogeneity* which explains clinical variability and leads to complex diagnosis, which we called *nosographic variability*. In line with multi-deficit models of developmental dyslexia, we designed and evaluated a remediation study with a multimodal and multi-componential protocol, which aimed at enhancing both underlying cognitive processes (audio-phonological, visual-attentional, and crossmodal) and reading and spelling procedures, using several training programs and taking into account the child's semiological profile.

We assessed benefits of the protocol through a multicenter, longitudinal, randomized, crossover and clinical trial including 3 stages that lasted for a total duration of 16 months. An overall of 94 speech and language therapists and 144 dyslexic readers (aged around 8-13 years) participated in the study.

In the first phase, participants were randomly assigned to 2 groups and received weekly speech and language therapy for 2 months without intensive training. In the second phase, in addition to weekly follow-up sessions with the speech therapist, participants received 3 types of intensive computer-based interventions for 2 months each. The first 2 interventions focused on audio-phonological and visual-attentional processes (the order of which was counterbalanced between the 2 groups) and were followed by a third intervention that focused on cross-modal integration processes. The construction of the 3 training programs was based

on the scientific literature, the expertise of the speech and language therapists, the patient's complaint (shared care decision) and the environmental context. In the third phase, intensive interventions were discontinued and weekly speech therapy consultations were continued for two months.

At the end of the remediation protocol, the multimodal and multi-componential intensive intervention lead to significant improvement in reading efficiency (Cohen's $d=2.3$), reading comprehension (Cohen's $d=0.9$), and spelling (Cohen's $d=0.78$), compared to the weekly speech and language therapy (first phase), and regardless of the order of the interventions. Multiple-case analysis revealed that 52 % of participants were reading disorder free.

In conclusion, our results show that an intensive intervention based on a multi-componential and multimodal training program produces major benefits in the treatment of developmental dyslexia. These findings are consistent with a curative (rather than a compensatory) approach for remediation and open up a new avenue for developmental dyslexia treatment.

Keywords: learning disabilities, developmental dyslexia, underlying cognitive deficits, multimodal and multi-componential remediation, randomized clinical trial.

Remerciements

Tout d'abord, j'aimerais adresser mes sincères remerciements et ma sincère reconnaissance à Sylvane et Bruno qui ont dirigé cette thèse, qui m'ont fait confiance, qui m'ont encouragée dans les pires moments, qui ont relu, corrigé sans trêve le flot de productions que je leur soumettais sans relâche, même de l'autre côté de l'Atlantique. Sylvane, merci pour tes corrections incisives qui ont fait de moi une chercheuse et pour ton soutien sans faille. Bruno, merci pour tes corrections bienveillantes qui m'ont rassurées et pour ta disponibilité.

Mes sincères remerciements aux membres du jury qui me font l'honneur d'évaluer mon travail, Franck Ramus, Séverine Casalis, Brigitte Stanké et Fanny Meunier.

Gilles, notre « maître » à tous et toutes, même si une diseuse de bonne aventure m'aurait prédit un jour que je ferais une thèse, je ne l'aurais absolument pas crue. Et pourtant, tu m'as convaincue du contraire et tu as su impulser la force et la confiance nécessaires pour me permettre d'accomplir ce rêve. Merci d'avoir cru en moi. Merci de m'avoir soutenue, aidée et rassurée à chaque instant. Merci pour tes commentaires, tes corrections, tes arguments. Nous n'étions pas toujours d'accord mais nos débats ont alimenté ma réflexion et je t'en remercie sincèrement. Je suis aussi fière d'avoir réussi à modifier tes convictions sur certains points. Tu es et resteras ma référence ultime dans ce travail et dans la vie. Mon prochain rêve est l'ascension de l'Himalaya.

Franck, c'est vrai, tu as financé ma thèse et c'est déjà énorme mais au-delà de cet aspect matériel, tu m'as donné envie de me surpasser, de mériter cette marque de confiance et surtout de mener ce travail pour faire progresser notre si belle profession. Je sais que cela te tient à cœur et nos discussions ont été toujours extrêmement enrichissantes et inspirantes. J'espère que nous continuerons à travailler ensemble pour suivre le chemin d'une si noble voie.

Jo, je ne saurai jamais comment t'exprimer toute ma reconnaissance et toute mon admiration. Ce n'est pas possible. Travailler avec toi est un honneur et un bonheur inestimable. Merci infiniment pour ton aide, tes conseils, tes réponses toujours rapides, efficaces, pertinentes, claires, tes idées absolument géniales mais aussi ta bonne humeur et ta gentillesse. Ce travail n'aurait pas été possible sans ton aide. Il continuera grâce à toi et nous allons aller au bout de tout ça.

Hervé, tu as initié le début de ce travail le jour où tu m'as fait confiance devant le comité scientifique du CHU-Lenval. Je n'oublierai jamais ce moment, la délibération du comité et l'annonce de la validation de mon projet. Merci pour ton aide, pour les conseils en statistiques et pour la méthodologie. Tu as été là jusqu'au bout sans faille, même pour le soutien de la rédaction. Si j'ai tant écrit c'est grâce à toi, j'étais très concentrée. Merci pour notre belle amitié.

Ma Julie d'amour, la reine du tableau Excel, tu as fait le lien pendant quatre ans avec les « super ortho » du groupe des investigatrices, tu as inlassablement traqué les données (et Greg, le pauvre). Rien ne t'a arrêté, ni le Covid, ni les bugs informatiques, ni le check des 7 nains. Merci pour ton aide, pour ton amitié, pour ta bonne humeur et pour tes conseils toujours pertinents. On reste connectées pour toujours et à jamais.

Ambre, toi non plus je ne saurai jamais comment t'exprimer toute ma reconnaissance. Ou plutôt si je sais, et ça sent fort le houblon. Merci pour ton aide inestimable dans ce travail, pour tes incroyables compétences quand tu converses avec R, quand tu lui parles gentiment ou quand tu l'insultes, mais tu finis toujours par avoir le dernier mot (pas seulement avec lui d'ailleurs). Tu as été là dans les pires et les meilleurs moments. Je n'oublierai jamais cette soirée fumeuse au labo pour la dernière inscription en doctorat. J'ai été impressionnée jusqu'à la fin, même après les analyses quand tu as corrigé une partie des chapitres. Juste, respect, tu es une brillante chercheuse.

Eddy, merci pour tes conseils, pour tes encouragements au début quand je ne croyais pas en mon projet. Tu m'as donné ton avis et c'était très important pour moi. Merci pour tes explications en statistiques, grâce à toi j'ai pu comprendre beaucoup d'analyses par la suite. J'espère que nous continuerons à travailler ensemble.

Élise, tu m'as dit un soir ce que représentait mon projet pour toi et tes mots ont été incroyables, j'en ai eu les larmes aux yeux. C'est comme si tu verbalisais quelque chose dont je n'avais aucune conscience. Puis quand nous avons fait les analyses de clusters, tu anticipais à chaque fois les idées qui germaient dans mon esprit avant même que je puisse les verbaliser. Ce fut un plaisir et un grand honneur d'avoir travaillé avec toi et j'espère que nous aurons l'occasion de le réitérer. Merci pour tout cela.

A tous les chercheurs et chercheuses qui m'ont aidée ou inspirée dans ce travail, Franck Ramus, Sylviane Valdois, Willy Serniclaes à qui je rends un grand hommage, Nathalie Bedoin qui m'a aidée sans relâche à trouver l'erreur de calcul d'un logiciel, Grégory Collet qui m'a aidée dans l'interprétation des données, je vous remercie infiniment.

Le Lapcos, ma deuxième maison, merci de m'avoir accueillie si chaleureusement. Vous êtes tous et toutes incroyables. Romain, tant de choses à te dire, merci de m'avoir écoutée, consolée, tu es parfois déroutant mais je t'aime. Mariléna, merci pour ta spontanéité, les bonnes choses et les fous rires partagés. Merci à Xavier pour ses conseils toujours pertinents et sa bonne humeur. Isabelle, merci de veiller sur nous avec autant d'amour. Jenn, merci pour ton soutien bienveillant. Dirk, merci d'avoir dirigé cet extraordinaire labo pendant tant d'années et d'en avoir fait ce qu'il est.

Fanny, le rayon de soleil du bureau des doc, ton hola retentit avec douceur dans mes oreilles, tu es la personne la plus gentille au monde, la plus lumineuse, la plus chou, merci pour tout. Camille, Pierre, merci pour le sauvetage de dernière minute ! Roxane, merci d'avoir partagé tous ces moments avec tant de simplicité et de franchise. Merci à Vassia, Estelle, Clément pour

toutes les soirées et les moments partagés. Paul, tu me manques tellement, tu aurais adoré les nocturnes de fin de thèse. Vive les Haters !

Sara, les mots sont difficiles à trouver et ne suffisent pas, merci de m'avoir accompagnée dans le couloir de la mort, merci pour les soirées ramadan, pour tous ces moments partagés, pour les sorties nocturnes sur la passerelle, pour les rires, les pleurs, les doutes, la résilience, Catherine, Liliane, Monsieur Zotero et Zartott, le squat au labo, une vraie télé réalité, merci à Ahmed pour les délicieux burgers. Je ne sais pas dans quel état nous serons à la soutenance mais dieu est grand et notre amitié aussi, donc tout est possible.

Bissa, le danseur fou, je suis heureuse que tu aies trouvé ta divinité. Adrien, intarissable sur tous les sujets, j'ai adoré nos discussions mais surtout ta vision totalement déconstruite du monde. Vincent, le joueur de match, halala... Mustapha, le génie de la photo, merci pour les running ensemble et le délicieux couscous. Ibounga, dans la joie et la bonne humeur, mon beau fils. Selim et Lou, merci pour vos soirées si chaleureuses et les bons tajines. Et les plus belles Hanane et Anaïs, vous m'avez fait rêver, merci d'être mes amis tout simplement, je vous aime.

Victor, frère, tu es le visionnaire du Lapcos, mais surtout le mec le plus adorable que j'ai rencontré. Même à l'autre bout de la planète, on peut compter sur toi. Merci pour tout, pour les soirées surprises, pour les soirées chez moi, pour les apéros du coin, pour les virées à la montagne, pour ton amitié et ta gentillesse. Wesh, franchement...t'es génial.

A mes amis de toujours, Sophie, Bri, Thierry, Sonia, Fifi, Cathy, Pascalou, Toto, Copain, Chris, Lydia. Désolée d'avoir disparu, je remets mes sabots légendaires et je remonte sur la piste du Glam (j'ai dit la piste).

A ma sœur Gaëlle, qui a toujours soutenu mes projets et mes folies, normal, elle est encore plus folle que moi. Je t'aime.

A mon frère Dan qui s'est égaré dans un lointain pays, tu me manques.

Ludivine, ton soutien et tes remarques ont toujours été une aide majeure, tu es la plus forte. Marion, Marine, merci d'avoir été là, votre présence me manque au cabinet, ce n'est plus pareil sans vous. Apo, Mathilde, Marina vos fous rires ont disparu. Merci les filles pour notre belle amitié.

Et pour finir, un très grand merci à tous les parents et les enfants qui ont participé à ce travail et à toutes les orthophonistes investigatrices qui se sont impliquées avec tant d'enthousiasme et tant de compétences, merci pour vos retours, vos questions, vos suggestions, vous m'avez aidée à réaliser ce beau projet et ce fut un réel plaisir de le partager avec vous. Vous avez été jusqu'au bout sans faillir, sans douter et les résultats sont magnifiques. Ce travail n'aurait pas été possible sans vous.

Merci à toutes, Méryl Alberti, Apolline Accary, Domitille Adriaens, Marine Amici-Serrette, Anne Anzuini-Keryvel, Christelle Belkada, Véronique Bonneau-Hiegel, Raphaëlle Bresson, Marine Ciano, Julie Boiton-Colliat, Emilie Coudougnan, Sabrina Courant, Gaëlle Darrot, Agnès De Buttet, Charlotte Desmons, Nathalie De Vaulchier, Louise Duloquin, Martine Etard, Camille Fajon, Charlotte Forst, Lola François, Mélanie Gely, Marie Laure Grand, Sylvie Hammerli-Peter, Fanny Hocquet, Laurence Jacquin, Caroline Jorand, Christine Kalck, Carole Lancuentra, Marine Ladoul, Ludivine Lebel, Marion Le Bozec, Mélissa Lecoq, Amelyne Lecourt, Nathalie Lesaint, Joan Le Scornec, Nadine Lions, Agnes Lonne-Lafoy, Stéphanie Lorenzati, Juliette Mangin, Alice Motte, Isabelle Muller, Stéphanie Nadaud, Stéphanie Nazaryan, Elisabeth Nettersheim, Odile Nguyen, Clara Pastor, Jennifer Pignon, Manon Py, Charlotte Pycke, Claire Saint Gaudin, Catherine Scheubel-Clerjaut, Odile Tromelin, Ludivine Verlot-Mory, Marine Versio.

PUBLICATIONS LIÉES AUX TRAVAUX DE THESE

Articles

Darrot, G., Gros, A., Manera, V., Corveleyn, X., & Harrar-Eskinazi, K. L. (2021). Effects of a developmental dyslexia remediation protocol based on training audio- phonological cognitive processes in gifted children with dyslexia: Study protocol of a multiple baseline single case experimental design. *Article Submitted for Publication*. (cf. Annexe 21)

Harrar-Eskinazi, K. L., De Cara, B., Leloup, G., Denis-Noël, A., Lefèvre, E., Nothelier, J., Caci, H., Ziegler, J. C., & Faure, S. (2022). Intensive multimodal remediation program for dyslexic readers aged between 8 to 13 years. In F. Bois-Parriaud, S. Joly-Froment, & A. Witko (Eds.), *Actualités du langage écrit : Actes 2022* (Isbergues, pp. 376–405). Ortho Edition. (cf. Annexe 20) ([hal-03916074](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03916074))

Harrar-Eskinazi, K. L., De Cara, B., Leloup, G., Nothelier, J., Caci, H., Ziegler, J., & Faure, S. (2021). Developmental Dyslexia and Remediation Methods (DDMR): Presentation of a multimodal intervention illustrated by a case study. *Rééducation Orthophonique*, 288, 119–154. (cf. Annexe 19) ([hal-03620883](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-03620883))

Harrar-Eskinazi, K. L., De Cara, B., Leloup, G., Nothelier, J., Caci, H., Ziegler, J., & Faure, S. (2022). Developmental dyslexia and methods for remediation (DDMR). Multimodal intervention in French-speaking children aged between 8 and 13 years: Study protocol for a randomized multicenter controlled crossover trial. *BMC Pediatrics*, 22(741). (cf. Annexe 1) (<https://doi.org/10.1186/s12887-022-03701-8>)

Chapitre de livre et encadré

Harrar-Eskinazi, K. L., De Cara, B., Leloup, G., & Faure, S. (2023). Intervention multimodale dans la remédiation de la dyslexie développementale. In F. Eustache, S. Faure, & B. Desgranges, *Manuel de neuropsychologie* (6ième). Paris : Dunod.

Harrar-Eskinazi, K. L., De Cara, B., Leloup, G., & Faure, S. (2019). Apports des technologies numériques dans l'aide à l'apprentissage de la lecture. In A. Bentolila & B. Germain (Eds.), *L'apprentissage de la lecture* (Nathan, pp. 307–315) (cf. Annexe 18).

Communications orales

Harrar-Eskinazi, K. L. (2019). Dyslexies développementales et méthodes de remédiation : Approche phonologique, visuo-attentionnelle et intermodalitaire. *Dyslexies-dysorthographies*, Gnosia, Paris.

Harrar-Eskinazi, K. L. (2022). Dyslexie développementale et méthode de remédiation (DDMR): Programme d'intervention multimodale chez des lecteurs dyslexiques âgés de 8 à 13 ans. *Workshop Prévention Langage écrit*, Occytadys, Toulouse.

Harrar-Eskinazi, K. L. (2022). Intervention multimodale phonologique, visuo-attentionnelle et intermodalitaire Conception et validation d'un programme de remédiation chez le lecteur dyslexique âgé de 8 à 13 ans. *Rencontres Internationales d'Orthophonie, UNADREO Form*, Paris.

Ziegler, J. C., & Harrar-Eskinazi, K. L. (2022). Quoi de neuf sur la planète « dyslexie » ? Des causes aux interventions grâce à modélisation. *Les journées scientifiques, SDO13*, Marseille.

Communications orales acceptées

Harrar-Eskinazi, K. L. (2023). De la multimodalité étiologique, sémiologique et nosographique de la dyslexie développementale vers une modélisation du soin. Société Universitaire de Recherche en Orthophonie, Nice.

Harrar-Eskinazi, K. L. (2023). Dyslexie développementale et méthodes de remédiation, une approche clinique multimodale et multi-componentielle intensive longitudinale. XXIXième Congrès Scientifique International de la FNO, Montpellier.

FINANCEMENTS

Cette étude a été financée par le Ministère de l'Enseignement Supérieur, de la Recherche et de l'Innovation et l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la Recherche en partenariat industriel avec la société GNOSIA (numéro de référence Cifre n° 2018/1089) et le Laboratoire d'Anthropologie et de Psychologie cliniques, Cognitives et Sociales (LAPCOS) (cf. Annexe 12).

La réalisation de l'étude a aussi bénéficié du soutien financier du projet LEMON (eFRAN : Espaces de formation, de recherche et d'animation numérique) et une partie de l'étude a été réalisée dans le contexte du projet GraphoGameAdapt (ANR 22-FRAN-0004) qui a reçu le soutien du gouvernement français, par le biais de l'Agence nationale de la Recherche (ANR) au titre de France 2030 (cf. Annexe 13).

Les financeurs de la recherche n'ont eu aucun rôle, ni dans la conception de l'étude, ni dans la rédaction du protocole de l'étude, ni dans la collecte, l'analyse et l'interprétation des données.

APPROBATIONS ETHIQUES

Les approbations éthiques ont été fournies par le Comité de Protection des Personnes (CPP) Ile de France IV, IRB 00003835, sous le numéro de référence 2019/50, ID-RCB 2019-A01453-54 et par le Comité d'éthique pour la recherche non interventionnelle de l'Université Côte d'Azur (CERNI) sous le numéro de référence 2019-7 (cf. Annexe 14).

En accord avec la Déclaration d'Helsinki et le décret de la loi Jardé sur la recherche impliquant la personne humaine (décret n° 2016-1537 du 16 novembre 2016), les parents et les enfants ont été informés par des notices lues à voix haute, et les deux parents ou tuteurs légaux ont signé un formulaire de consentement sur le site d'inclusion.

PRE-ENREGISREMENT ET REGLEMENTATION

L'essai clinique a été pré-enregistré sur le site ClinicalTrials.gov sous le numéro NCT 04028310 (cf. Annexe 16) et le protocole de l'étude a été publié (cf. Annexe 1, Harrar-Eskinazi, De Cara, Leloup, Nothelier, et al., 2022).

Les Hôpitaux Pédiatriques de Nice CHU - Lentral ont parrainé ce travail de recherche pour la soumission réglementaire et éthique. Les Investigatrices associées (orthophonistes) ont signé un formulaire d'engagement au protocole et à la réglementation en vigueur et ont été informées des modalités pratiques et scientifiques du protocole lors de la « mise en place » de l'étude, en présence de l'Investigatrice principale, Karine Harrar Eskinazi et de l'Attachée de Recherche Clinique, Dr Dominique Donzeau (cf. Annexe 17).

TRAITEMENTS DES DONNEES

Le traitement des données est conforme à la loi n° 78-17 du 6 janvier 1978 modifiée relative à l'informatique, aux fichiers et aux libertés et au règlement (UE) 2016/679 du Parlement européen et du Conseil du 27 avril 2016 applicable à compter du 25 mai 2018 (Règlement général sur la protection des données, RGPD). Les données sont collectées et utilisées conformément à la méthodologie de référence pour le traitement des données à caractère personnel dans le cadre d'une recherche dans le domaine de la santé nécessitant le consentement oral et écrit de la personne concernée (MR-001) et ont fait l'objet d'une déclaration à la CNIL (délibération n° 2018-153 du 3 mai 2018).

Table des Matières

<i>Introduction</i>	1
<i>Chapitre 1. De la multimodalité des processus cognitifs de la lecture aux modèles multifactoriels de la dyslexie développementale</i>	13
1. Multimodalité des processus cognitifs de la lecture	14
1.1. Codage visuel et orthographique.....	16
Traitements visuels perceptifs de la lecture.....	16
Traitements orthographiques lexicaux.....	19
Traitements orthographiques pré-lexicaux.....	20
Les modèles de reconnaissance visuelle de mot.....	21
Bases neurales de la reconnaissance visuelle.....	25
1.2. Codage phonologique.....	26
Rôle du codage phonologique.....	27
Accès au code phonologique.....	28
Les modèles de lecture incorporant un codage phonologique.....	28
Bases neurales du codage phonologique.....	33
1.3. Codages morphologique et sémantique.....	34
Codage morphologique.....	35
Codage sémantique.....	36
1.4. Vers des modèles intégratifs de la lecture.....	37
Modèle OB1-reader.....	38
Les modèles BRAID.....	38
Modèle multi-déficits.....	39
2. Modèles multifactoriels de la dyslexie développementale	40
2.1. Multifactorialité étiologique.....	41
Le modèle à déficit unique.....	42
Les modèles en cascades.....	47
Les modèles à déficits multiples.....	59
La sous-exposition à la lecture.....	64
2.2. Hétérogénéité sémiologique.....	68
Les déficits cognitifs sous-jacents.....	68
Les troubles comportementaux de la lecture et de l'orthographe.....	77
Vers une simulation informatique des profils sémiologiques individuels.....	80
2.3. Variabilité nosographique.....	84
Manuel diagnostique et statistique, DSM-5.....	85
Classification internationale des maladies CIM-11.....	90
Impact des classifications sur la prévalence.....	91
Le diagnostic clinique de la dyslexie développementale.....	93
<i>Chapitre 2. Les approches de remédiation de la dyslexie développementale</i>	101
1. Principes généraux de la remédiation cognitive	103
1.1. Stratégies et techniques rééducatives.....	104

La remédiation cognitive curative	104
La remédiation cognitive compensatoire.....	107
La remédiation cognitive adaptative.....	108
Validité et limites de la remédiation cognitive.....	110
1.2. Méthodologie de l'intervention	112
L'essai contrôlé randomisé.....	113
Le cas unique expérimental.....	116
2. Remédiation des déficits cognitifs sous-jacents	Erreur ! Signet non défini.
2.1. Intervention sur le traitement phonologique	122
La conscience phonologique	124
La mémoire verbale à court terme.....	128
La dénomination rapide automatisée.....	132
2.2. Intervention sur le traitement auditif.....	137
Le traitement auditif perceptif de la parole	138
Le traitement auditif temporel	143
Le traitement auditif attentionnel	148
2.3. Intervention sur le traitement visuel.....	151
Les traitements visuels perceptifs de bas niveau.....	151
Le déplacement spatial et temporel de l'attention visuelle.....	159
Les traitements visuo-attentionnels	163
2.4. Intervention sur le traitement audio-visuel.....	180
3. Remédiation des procédures de lecture	185
3.1. Intervention sur la procédure de lecture sublexicale.....	186
3.2. Intervention sur la procédure de lecture lexicale.....	187
La fluence en lecture.....	188
L'orthographe lexicale.....	189
3.3. Intervention sur les procédures sublexicales et lexicales	196
4. Remédiation des déficits cognitifs sous-jacents et des procédures de lecture.....	200
4.1. Conscience phonémique et procédures de lecture.....	201
4.2. Traitement auditif temporel et procédures de lecture.....	206
4.3. Attention visuo-spatiale et procédures de lecture	207
Chapitre 3. Problématique.....	218
1. Remédiation de la dyslexie développementale, contexte théorique.....	218
2. Limites méthodologiques et cliniques.....	222
3. Conception du protocole de remédiation.....	223
4. Évaluation du protocole de remédiation, objectifs	225

5.	<i>Hypothèses de recherche</i>	226
6.	<i>Opérationnalisation</i>	228
Chapitre 4. Le protocole de remédiation multimodale et multi-composante		230
1.	<i>Modalités d'application des programmes d'intervention</i>	231
2.	<i>Programme d'intervention audio-phonologique</i>	235
2.1.	La perception catégorielle	236
2.2.	La mémoire sérielle phonologique	238
2.3.	La dénomination rapide automatisée.....	240
2.4.	L'analyse phonémique	242
3.	<i>Programme d'intervention visuo-attentionnelle</i>	243
3.1.	L'empan visuo-attentionnel.....	244
3.2.	La focalisation attentionnelle	246
3.3.	La mémoire orthographique	249
4.	<i>Programme d'intervention intermodalaire</i>	250
4.1.	Intégration grapho-phonémique : GraphoGame	250
4.2.	Fluence en lecture : LARMA.....	253
5.	<i>Moyens mis en œuvre pour optimiser l'engagement</i>	254
Chapitre 5. Essai Clinique Randomisé		256
1.	<i>Méthode</i>	256
1.1.	Procédure d'inclusion.....	257
1.2.	Participants	258
1.3.	Protocole d'intervention	263
1.4.	Protocole d'évaluation.....	265
	Lignes de base pré et post-intervention	266
	Lignes de base cliniques.....	277
1.5.	Pré-traitements des données.....	282
2.	<i>Effets sur les compétences en lecture de texte, en compréhension écrite et en orthographe</i>	283
2.1.	Objectif et hypothèses	283
2.2.	Analyses statistiques	284

2.3.	Résultats	286
	Efficienc e en lecture de texte non signifia nt DeltaText	286
	Efficienc e en lecture de texte non signifia nt L'Alouette	288
	Efficienc e en lecture d'un texte signifia nt Mouette-Pinguin.....	290
	Compréhension en lecture de phrases au test L3-ORLEC	292
	Compétences orthographiques au test Chronosdictées.....	294
2.4.	Synthèse	299
3.	<i>Comparaisons des gains en lecture et en orthographe</i>	301
3.1.	Objectifs et hypothèses.....	301
3.2.	Analyses statistiques	302
3.3.	Résultats	303
	Gains en efficie nce de lecture de texte	304
	Gains en compréhension de lecture	306
	Gains en orthographe.....	306
3.4.	Synthèse	307
4.	<i>Effets respectifs des interventions phonologique et visuo-attentionnelle</i>	309
4.1.	Objectif et hypothèse.....	309
4.2.	Analyses statistiques	310
4.3.	Résultats	311
	Processus phonologiques.....	311
	Processus visuo-attentionnels	315
4.4.	Synthèse	318
5.	<i>Effets de l'intervention multimodale sur la perception du trouble de la lecture.....</i>	319
5.1.	Objectif et hypothèse.....	319
5.2.	Analyses statistiques	319
5.3.	Résultats	320
5.4.	Synthèse	322
6.	<i>Prédiction de l'amplitude de la réponse à l'intervention.....</i>	324
6.1.	Objectif et hypothèse.....	324
6.2.	Analyses statistiques	324
6.3.	Résultats	325
6.4.	Synthèse	328
7.	<i>Discussion.....</i>	330
7.1.	Effets sur la lecture.....	331
7.2.	Effets sur la compréhension de lecture et l'orthographe.....	342
7.3.	Gains à l'issue de chaque intervention	344

7.4.	Ordre des interventions	346
7.5.	Effet de spécificité des interventions	347
7.6.	Prédicteurs de la réponse à l'intervention	348
7.7.	Impact de l'intervention dans la vie quotidienne	350
7.8.	Limites de l'étude.....	351
Chapitre 6. Étude de cas multiples		357
1.	Méthode	358
2.	Prévalence des compétences altérées et préservées	361
2.1.	Objectif et hypothèses	361
2.2.	Analyses statistiques	361
2.3.	Résultats	362
2.4.	Synthèse	371
3.	Évolution des déficits cognitifs sous-jacents et des compétences en lecture	373
3.1.	Objectifs et hypothèses.....	373
3.2.	Analyses statistiques	373
3.3.	Résultats	374
3.4.	Synthèse	383
4.	Clusters de profils cognitifs	384
4.1.	Objectifs et hypothèses.....	384
4.2.	Analyses statistiques	384
4.3.	Résultats	386
4.4.	Synthèse	393
5.	Discussion.....	394
5.1.	Prévalence des Déficiences et des Forces	395
5.2.	Hétérogénéité inter et intra-compétences.....	397
5.3.	Évolution des profils cognitifs et des compétences en lecture.....	399
5.4.	Identification de <i>clusters</i>	403
5.5.	Implications cliniques	407
5.6.	Limites de l'étude.....	408
Conclusions et perspectives		412
Références bibliographiques.....		424

Introduction

Produit d'une évolution sociale récente, la lecture est une invention culturelle qui a nécessité la conception de systèmes éducatifs ayant pour objectif une alphabétisation universelle. Omniprésente, la lecture est devenue le fondement des apprentissages scolaires, vecteur incontournable de la vie sociale et de la communication. Au-delà d'être une condition nécessaire pour accéder aux apprentissages scolaires et académiques, maîtriser la lecture demeure une variable prédictive probante du bien-être économique et social des nations (OCDE, 2019). Associé à des conséquences négatives sur le devenir scolaire, social, comportemental et émotionnel mais également professionnel et financier (Goldston et al., 2007; McLaughlin et al., 2014, 2014; Undheim et al., 2011), un faible niveau en lecture représente donc un handicap dans les sociétés modernes alphabétisées. Pour cette raison, il est d'une importance cruciale pour chaque État de fournir des moyens adéquats pour évaluer et traiter ces difficultés d'apprentissage de la lecture. Or, la dernière enquête PISA en France, en 2018, fait état d'une augmentation du nombre d'élèves âgés de 15 ans ayant des compétences très limitées en compréhension de lecture, particulièrement chez les élèves issus de milieux socio-économiques défavorisés. La réalisation des « Objectifs de Développement Durable à l'horizon 2030 (ODD) » établis par les Nations Unies, qui appellent notamment à « assurer l'accès de tous à une éducation de qualité, sur un pied d'égalité, et à promouvoir les possibilités d'apprentissage tout au long de la vie » (ODD 4, 2023), semble donc difficile à atteindre, y compris pour des pays développés comme la France.

Parmi ces faibles lecteurs recensés, certains présentent ce que l'on nomme une dyslexie développementale, définie comme un trouble neurodéveloppemental et spécifique d'apprentissage avec altération de la lecture et de la production écrite par les classifications

internationales DSM-5 (American Psychiatric Association, 2013) et *CIM-11* (Organisation Mondiale de la Santé, 2022). Singulier et inattendu, ce trouble sévère et durable de l'apprentissage de la lecture persiste en dépit d'une intelligence normale et de l'absence de pathologie neurologique, psychiatrique, de déficit sensoriel visuel et auditif ou de carence socio-éducative grave (DSM-5). Présente quelle que soit la langue (Peterson & Pennington, 2012), la dyslexie développementale est universelle et fait référence aux difficultés de lecture dans la reconnaissance exacte et fluide des mots écrits ainsi qu'à leurs conséquences sur la compréhension écrite et sur l'orthographe (Conners & Olson, 2012; Ehri, 2000). Bien que la dyslexie développementale soit souvent évoquée comme un trouble d'apprentissage du langage écrit au sens large du terme (American Psychiatric Association, 2013; Elliott, 2020), la population de lecteurs dyslexiques se différencierait des autres lecteurs en difficulté par des compétences de compréhension orale relativement préservées (Sleeman et al., 2022; Tunmer & Chapman, 2012). En effet, les lecteurs dyslexiques sont caractérisés, avant tout, par des difficultés à apprendre et à automatiser le décodage des mots écrits (Ziegler et al., 2020). Ce trouble d'identification des mots écrits serait fondé sur une altération du développement de la conversion grapho-phonémique qui consiste à relier les unités de base de la langue écrite (lettres ou graphèmes) aux unités de base de la langue parlée (sons ou phonèmes). Ainsi, la lecture reste peu fluide et nécessite un effort cognitif supérieur à celui fourni par des enfants normolecteurs (Shaywitz & Shaywitz, 2005; Sprenger-Charolles et al., 2013). Sur le plan anatomo-fonctionnel, ce trouble de la lecture serait sous-tendu par le dysfonctionnement d'un vaste circuit de réseaux neuronaux interconnectés (Kershner, 2016), résultant d'anomalies de connectivité entre les zones cérébrales postérieures gauches occipito-temporo-pariétales (Blomert, 2011; Vandermosten et al., 2012).

La prévalence de la dyslexie développementale est estimée entre 5 et 17 % dans la population générale selon le niveau de sévérité du trouble (Shaywitz & Shaywitz, 2005) et

selon les critères épidémiologiques appliqués (voir Di Folco et al., 2021). Son caractère héréditaire (50 % de chance d'être dyslexique pour un enfant dont un des parents est dyslexique) et ses répercussions sévères sur l'ensemble des apprentissages scolaires, l'estime de soi et le devenir professionnel en font un problème de santé publique majeur (Esser et al., 2002; McGee et al., 2002). Les taux de comorbidité avec des troubles émotionnels comme les troubles anxieux ou les symptômes dépressifs, et avec d'autres troubles neurodéveloppementaux comme le trouble déficitaire de l'attention, sont élevés (McGee et al., 1986; Pennington, 2006). De plus, un déficit de l'identification des lettres, étape fondamentale du codage orthographique et phonologique de la lecture (Grainger et al., 2016), ralentit la vitesse de lecture (Pelli et al., 2007), altère sa précision et par conséquent diminue les temps d'exposition à la lecture.

Pour atténuer ou, dans le meilleur des cas, empêcher cette évolution négative, une remédiation est nécessaire. De nombreuses méta-analyses confirment l'efficacité des interventions combinant un entraînement intensif de la conscience phonémique et du décodage phonologique nommé « phonics instruction » (Ehri et al., 2001; Galuschka et al., 2014; McArthur et al., 2018). Cependant, si ces interventions validées pour améliorer la lecture et l'orthographe sont efficaces auprès des jeunes enfants à risque de développer un trouble de la lecture ou auprès des faibles lecteurs présentant un trouble léger de la lecture, elles semblent moins efficaces auprès des lecteurs dyslexiques (Ehri et al., 2001; Galuschka et al., 2014). Ces limites de l'efficacité de la remédiation des troubles d'apprentissage du langage écrit chez les lecteurs dyslexiques soulèvent de nombreuses interrogations auxquelles la recherche fondamentale et clinique tente de répondre depuis plusieurs décennies afin de développer une méthodologie de soin efficace de la dyslexie développementale.

Parmi les réponses, s'il est communément admis que le déficit d'accès aux représentations phonologiques soit la cause de la dyslexie développementale, aucune

hypothèse causale n'est parvenue, à notre connaissance, à expliquer totalement la variabilité des tableaux sémiologiques cliniques, ni à valider une approche de remédiation unique de la dyslexie développementale. Ainsi, de multiples théories explicatives ont orienté la recherche fondamentale sans parvenir à un véritable consensus. Dans ce contexte de *multifactorialité étiologique*, nous avons retenu trois hypothèses théoriques explicatives de la dyslexie développementale, susceptibles d'identifier de nombreux déficits cognitifs sous-jacents et d'expliquer les troubles d'apprentissage de la lecture et de l'orthographe : l'hypothèse phonologique, l'hypothèse visuelle et l'hypothèse intermodalitaire. La base de notre réflexion pour concevoir un programme de remédiation efficace, se fonde sur l'hypothèse que des déficits du traitement audio-phonologique des sons, du traitement visuo-attentionnel des lettres et de l'intégration simultanée lettre-son seraient les principales causes cognitives de la dyslexie développementale. Ces multiples déficits entraveraient la mise en place et l'automatisation des associations graphème-phonème nécessaires à l'apprentissage de la lecture (Serniclaes et al., 2015).

Les déficits de traitement de l'information phonologique altéreraient la capacité à identifier, stocker, récupérer ou manipuler les syllabes et les phonèmes qui composent le mot. Ces déficits phonologiques s'expliqueraient par un déficit d'accès aux représentations phonologiques (Boets et al., 2013; Ramus & Szenkovits, 2008) et/ou par un déficit fondamental du traitement perceptif auditif (Goswami, 2011; Serniclaes et al., 2015), et/ou par un déficit du déplacement temporel et spatial de l'attention auditive (Hari & Renvall, 2001).

Les déficits de traitement de l'information visuelle altéreraient la capacité à identifier, stocker, récupérer ou manipuler les lettres ou les graphèmes qui composent le mot. Ces déficits visuels s'expliqueraient par des déficits perceptifs visuels (Lawton, 2019) et/ou par des déficits du déplacement temporel et spatial de l'attention visuelle (Vidyasagar, 2019) et/ou par des déficits visuo-attentionnels (Perry & Long, 2022; Valdois, 2022).

Le déficit de traitement intermodalitaire de l'information audio-visuelle, vu comme un défaut d'intégration simultanée des lettres et des sons en tant qu'objet audio-visuel unique (Blomert, 2011; Blomert & Willems, 2010), altérerait la capacité de liaison entre le traitement des représentations orthographiques et celui des représentations phonologiques chez les lecteurs dyslexiques (Blau et al., 2009, 2010).

Sur la base de ces divers fondements théoriques causaux d'un trouble d'apprentissage de la lecture, de nombreuses études de cas multiples décrivent des combinaisons de déficits cognitifs sous-jacents audio-phonologiques, visuo-attentionnels et audio-visuels chez la plupart des lecteurs dyslexiques (Menghini et al., 2010; Ramus, 2003; Saksida et al., 2016; White et al., 2006; Ziegler et al., 2008; Zoubrinetzky et al., 2014). Chaque lecteur dyslexique peut présenter un déficit ou une combinaison de ces déficits cognitifs sous-jacents ou *profils cognitifs* qui peuvent s'exprimer sur le plan comportemental par une hétérogénéité individuelle des symptômes cliniques des troubles de la lecture et de l'orthographe ou *profils comportementaux* (O'Brien & Yeatman, 2021; Ring & Black, 2018). Le profil cognitif et le profil comportemental caractérisent ainsi l'ensemble des déficits que présente un lecteur dyslexique, que nous nommerons *profil sémiologique*. Cette hétérogénéité des profils des déficits cognitifs sous-jacents et de leurs symptômes comportementaux sur la lecture et l'orthographe peut s'expliquer par l'interaction complexe entre les facteurs biologiques, cognitifs, comportementaux et environnementaux (Carrion-Castillo et al., 2013; Pennington, 2006). L'hypothèse d'une *multifactorialité étiologique* de la dyslexie développementale pourrait donc être une explication possible à l'hétérogénéité des profils sémiologiques des lecteurs dyslexiques qui s'exprime dans une variabilité clinique très complexe dont les contours imprécis peuvent entraîner un diagnostic incertain de dyslexie développementale, ce que nous nommerons *variabilité nosographique*.

Cette *hétérogénéité sémiologique* nécessiterait donc d'adapter les stratégies de remédiation selon les profils cognitifs et les profils comportementaux, propres à chaque lecteur dyslexique c'est-à-dire d'appliquer une stratégie de remédiation curative. Parmi les trois types de stratégies rééducatives décrites en remédiation cognitive - adaptative, compensatoire et curative - la stratégie curative cible les processus altérés par le biais d'entraînements intensifs et spécifiques, tout en pouvant être associée à des stratégies de remédiation adaptative et compensatoire. La stratégie adaptative est caractérisée par l'utilisation de moyens informatisés comme la lecture d'un texte par synthèse vocale, le correcteur orthographique numérique, ou par l'aménagement pédagogique des conditions d'apprentissage afin de limiter les répercussions du trouble de la lecture. La stratégie compensatoire est caractérisée par le recours à des procédures efficaces comme la conscience morphologique, la métacognition ou l'éducation thérapeutique pour compenser le trouble de la lecture.

Cependant, une application clinique efficace de ces stratégies de remédiation de la dyslexie développementale, et particulièrement d'une remédiation curative, se heurte à deux limites majeures fréquemment évoquées en France : d'une part, un accès aux soins limité pour les patients souffrant d'un trouble de la lecture et d'autre part, une insuffisance de cadre méthodologique pour optimiser et valider les remédiations orthophoniques.

En effet, une enquête, menée en 2019, par le Collège Français d'Orthophonie (Helloin, 2019) auprès de 1300 orthophonistes et intitulée « Prise en soin des troubles du langage écrit », révèle des délais d'attente intolérables pour accéder aux soins et des prises en charge sur plusieurs années au rythme d'une ou deux séances par semaine. De plus, la demande de soin pour des troubles du langage écrit n'est pas considérée comme prioritaire par les orthophonistes et n'est donc pas prise en charge précocement. A la suite de cette enquête, dans le but de mettre en évidence la difficulté d'accès aux soins et de soutenir une action politique pour réduire cette difficulté, une étude démographique nationale menée auprès de 6635 orthophonistes (Raynaud,

2022) a été initiée par la Fédération Nationale des Orthophonistes. Cette étude confirme que 90 % des orthophonistes estiment ne pas pouvoir proposer un nombre suffisant de consultations afin de garantir une évaluation et une remédiation optimales. Dans ce contexte, une grande partie des enfants présentant des troubles du langage écrit ne sont pas pris en charge. Or, face à une demande sans cesse croissante d'accès aux soins, cette situation risque de s'aggraver si aucune solution n'est envisagée pour pallier les conséquences de cette pénurie.

Par ailleurs, cette enquête met en évidence des faiblesses méthodologiques concernant le diagnostic de dyslexie développementale (e.g., une absence d'évaluation systématique du langage oral, associée à l'évaluation du langage écrit) ou sa remédiation. Tout en reconnaissant le fait que la stratégie de remédiation curative caractérisée par la pratique d'entraînements intensifs ciblés sur un processus cognitif sous-jacent et/ou des procédures de lecture serait la plus efficace selon les données probantes, l'enquête souligne que cette stratégie est peu appliquée au sein de notre profession. En effet, les orthophonistes ont recours le plus souvent à des stratégies de remédiation adaptatives et compensatoires. De plus, le recours au principe d'éducation thérapeutique, garant de l'engagement actif du patient dans sa prise en charge, fait également défaut. Néanmoins, cette enquête précise que les orthophonistes ont conscience de ces limites dans leur pratique clinique et souhaiteraient disposer de cadres méthodologiques rigoureux et efficaces dans la prise en charge des troubles du langage écrit.

En effet, les conduites de remédiation de la dyslexie développementale renvoient à des concepts cliniques et méthodologiques qui soulèvent encore de nombreuses questions. Quel format de remédiation peut-on proposer pour faciliter l'accès aux soins et l'intensité des entraînements ? Peut-on proposer des entraînements à domicile ? Comment obtenir un suivi régulier et intensif des entraînements ? Quels programmes de remédiation proposer aux lecteurs dyslexiques ? À quels modèles théoriques se référer ? Quels sont les ingrédients actifs (fréquence, intensité, choix des items) des entraînements proposés au sein de ces programmes

de remédiation ? Comment mesurer les gains obtenus ? Quelle amplitude de gain peut-on attendre après une remédiation ? Combien de temps doit durer une intervention ?

C'est dans ce contexte scientifique de *multifactorialité étiologique* et d'*hétérogénéité sémiologique* de la dyslexie développementale et dans ce contexte clinique de difficultés d'accès aux soins et de nécessité d'un cadre méthodologique de la remédiation, que nous avons élaboré notre travail de recherche.

Notre premier objectif est de concevoir un programme de remédiation innovant à la fois *multimodal*, *multi-composantiel*, fondé sur des entraînements intensifs à domicile, sur des données probantes et applicables dans la pratique clinique. Ce programme de remédiation *multimodal* et *multi-composantiel* associe des entraînements des processus cognitifs audio-phonologiques, visuo-attentionnels et audio-visuels à des entraînements des procédures de lecture et d'orthographe. Selon les principes d'une stratégie de remédiation curative, les entraînements sont adaptés pour chaque participant, à son profil *cognitif* défini par les déficits audio-phonologiques et visuo-attentionnels et à son profil *comportemental* défini par les déficits des compétences en lecture et en orthographe. L'analyse du profil *sémiologique* (i.e., du profil cognitif et du profil comportemental) détermine ainsi les entraînements intensifs et spécifiques qui seront effectués à domicile sous tutorat parental. Les interventions sont donc individualisées, systématiques, intensives et fondées sur les preuves, en accord avec les principes méthodologiques de l'Evidence Based Medicine (Sackett et al., 1996).

Notre deuxième objectif est d'évaluer l'efficacité de ce programme par la mise en œuvre d'un essai clinique croisé randomisé et multicentrique auprès de jeunes lecteurs dyslexiques. Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une Convention Industrielle de Formation par la REcherche (Cifre) de l'Association Nationale de la Recherche et de la Technologie (ANRT) avec la Société Gnosia. Cette société édite des solutions logicielles à destination de la communauté des orthophonistes. Bien que son activité soit principalement axée sur la

conception et la distribution de ces logiciels, Gnosia montre un intérêt réel pour l'examen des données probantes concernant les bénéfices de ses logiciels auprès des enfants dyslexiques. Ainsi, des partenariats forts ont pu se nouer entre le monde académique et celui des Entreprises dans le domaine de la Santé. Ces partenariats restent encore à développer notamment par la mise à disposition du plus grand nombre des résultats et outils issus de la Recherche dans le cadre d'une politique globale de Santé Publique. Cette thèse s'articule autour de six chapitres. Concevoir un programme de remédiation de la dyslexie développementale nécessite de comprendre les processus cognitifs impliqués dans l'activité de lecture et les processus altérés dans la dyslexie développementale. Par conséquent, avant d'aborder la remédiation, le premier chapitre s'articule en deux sections. La première section rappelle, autour du concept théorique de *multimodalité des processus cognitifs* de la lecture, la nature et le rôle des codages visuel, orthographique, phonologique et sémantique d'identification des mots écrits, et leurs interactions illustrées par différentes modélisations. La seconde section s'articule autour des concepts de *multifactorialité étiologique*, d'*hétérogénéité sémiologique* et de *variabilité nosographique* de la dyslexie développementale. La *multifactorialité étiologique* sera abordée par le biais de différents modèles de déficits tels que le modèle à déficit unique, les modèles à déficits *en cascade* et les modèles à déficits multiples. Le concept d'*hétérogénéité sémiologique* soulignera la variabilité et l'hétérogénéité individuelle des déficits cognitifs sous-jacents, ainsi que la variabilité des symptômes comportementaux de la lecture à travers des études de cas multiples. Le concept de *variabilité nosographique* rappellera les différentes définitions et classifications de la dyslexie développementale, et leurs impacts sur le diagnostic d'un trouble spécifique de la lecture, et donc sur la remédiation.

Afin de comprendre comment une intervention peut remédier à ce trouble de la lecture, et quels programmes de remédiation proposer, le deuxième chapitre s'articule également en

deux sections. La première section présente les principes généraux de la remédiation cognitive. Après avoir décrit les stratégies et les techniques de la remédiation cognitive curative, compensatoire et adaptative, les critères de validité et les limites, nous évoquons les démarches méthodologiques pour valider les conduites de remédiation par des études de groupe ou de cas unique. La deuxième section illustrera la grande variabilité des interventions proposées pour remédier aux troubles de la lecture soit en ciblant les processus cognitifs sous-jacents auditifs, phonologiques, visuels, visuo-attentionnels et/ou intermodalitaires, soit en ciblant les procédures graphophonologiques et/ou orthographiques, soit en ciblant à la fois les processus cognitifs sous-jacents et les procédures de lecture.

Dans le troisième chapitre, à partir de notre analyse et de notre interprétation de la littérature scientifique et en tenant compte des contraintes méthodologiques et cliniques, nous exposons la problématique de notre travail de recherche, ainsi que les objectifs et les hypothèses qui en découlent.

Le quatrième chapitre décrit le protocole de remédiation *multimodale* et *multi-composentielle* que nous avons élaboré. Nous présentons les trois programmes d'intervention de ce protocole ciblant trois modalités, auditive, visuelle et audio-visuelle (i.e., multimodale) et trois composants audio-phonologiques, visuo-attentionnels et intermodalitaires (i.e., multi-composentielle). Le programme d'intervention audio-phonologique cible différents processus cognitifs sous-jacents susceptibles d'être altérés chez les lecteurs dyslexiques telles que la perception catégorielle, la conscience phonologique, la mémoire phonologique à court terme et la dénomination rapide automatisée. Le programme d'intervention visuo-attentionnel cible d'autres processus cognitifs sous-jacents susceptibles d'être altérés chez les lecteurs dyslexiques tels que l'empan visuo-attentionnel, la focalisation attentionnelle globale/locale et la mémoire orthographique. Une fois les processus audio-phonologiques et visuo-attentionnels améliorés, le programme d'intervention intermodalitaire cible le déficit d'intégration phono-

orthographique pour optimiser les compétences en lecture et en orthographe. Après avoir décrit le protocole d'application de ces trois programmes, nous décrivons les modalités de chaque programme d'intervention et les moyens mis en œuvre pour faciliter leur application.

Dans le cinquième chapitre, nous évaluons ce protocole de remédiation par la mise en œuvre d'un essai clinique randomisé, mené auprès de 144 lecteurs dyslexiques âgés de 8 à 13 ans pendant 16 mois au sein d'une étude longitudinale multicentrique, randomisée et croisée. Après avoir précisé la méthodologie de l'essai clinique, nous présentons les résultats qui confirment notre hypothèse principale en montrant une amélioration significative de l'efficacité en lecture, de la compréhension en lecture et de l'orthographe, en comparaison avec une rééducation orthophonique hebdomadaire, et ce quel que soit l'ordre des interventions. L'attribution aléatoire des participants dans deux groupes permet de mettre en évidence la spécificité des entraînements phonologiques et visuo-attentionnels. De plus, par le biais de deux questionnaires interrogeant les participants et leurs parents sur l'appétence à la lecture, les résultats scolaires et l'estime de soi, nous montrons que leur perception du trouble de la lecture s'améliore. Enfin, nous avons cherché à déterminer quels facteurs étaient susceptibles d'expliquer le fait que certains participants ont très fortement répondu à l'intervention par rapport à d'autres participants qui ont moins bien répondu.

Dans le sixième chapitre, une analyse de cas multiples met en évidence une coexistence de compétences altérées et préservées, une hétérogénéité des déficits cognitifs sous-jacents et une normalisation des compétences en lecture pour 52 % des participants. Puis, nous avons exploré l'éventualité d'un regroupement des profils cognitifs afin d'élargir la notion de déficit définie sur la base d'un seuil pathologique conventionnel. Ainsi, nous avons identifié trois *clusters* de profils cognitifs selon une approche dimensionnelle, basée sur un continuum de compétences.

Pour conclure cette introduction, nous tenons à préciser que la longueur et la densité des deux premiers chapitres sont justifiées par le fait que pour concevoir un programme de remédiation efficace de la dyslexie développementale, il nous est d'abord apparu nécessaire de connaître et de comprendre les principales théories explicatives de la dyslexie mais surtout de tenter de faire des liens entre ces différentes théories afin de comprendre l'*hétérogénéité sémiologique* de ses manifestations dans le but d'y remédier. De fait, nous focaliser uniquement sur l'aspect multifactoriel de la dyslexie et l'aspect de la remédiation des troubles de la lecture, en lien avec notre étude expérimentale, sans aborder les processus cognitifs impliqués dans la lecture, nous paraissait réducteur dans la mesure où chaque méthode de remédiation est sous-tendue par une hypothèse explicative de la dyslexie, elle-même sous-tendue par un modèle théorique. De plus, nous voulions éviter l'écueil d'une possible influence d'un modèle, d'une théorie ou d'une méthode de remédiation sans considération pour les autres. Notre principale volonté était de rester impartial et d'aborder cette littérature le plus naïvement et le plus exhaustivement possible pour n'en négliger aucun aspect mais surtout pour comprendre pourquoi une telle quantité et une telle qualité de travaux scientifiques n'étaient pas mises à profit dans la pratique clinique et pourquoi les chercheurs ne mettaient pas davantage en commun leurs savoirs malgré leurs divergences théoriques. Nous avons souvent entendu dire qu'il existait un *fossé* entre la recherche et la clinique, nous nous sommes aperçu qu'il existe un *abîme* entre ces deux mondes. Nous avons donc tenté de nous appuyer sur notre interprétation d'une littérature dense et complexe et sur notre expertise clinique pour concevoir un programme de remédiation applicable en clinique. Face à la difficulté de cet énorme enjeu, nous n'avons bien évidemment pas la prétention d'y être parvenue. Très modestement, nous espérons au moins avoir amorcé un travail qui sera poursuivi afin d'améliorer la prise en soin des personnes souffrant de dyslexie développementale.

Chapitre 1. De la multimodalité des processus cognitifs de la lecture aux modèles multifactoriels de la dyslexie développementale

L'apport de la recherche fondamentale sur l'étiologie de la dyslexie développementale, inscrit son diagnostic et sa remédiation dans un contexte d'hétérogénéité des profils de déficits cognitifs et comportementaux présentés par les lecteurs dyslexiques (LD). Avant de décrire et comprendre ces différents déficits, il nous est apparu nécessaire de repreciser la nature et le fonctionnement des processus cognitifs impliqués dans la lecture. Complexes, nombreux et interdépendants, ces processus ont donné lieu à une multitude de cadres conceptuels et de modélisations qui sont les fondements de la recherche sur la dyslexie développementale (DD) mais aussi les fondements d'une notre pratique clinique fondée sur des données probantes.

La première section de ce chapitre souligne la multimodalité des processus cognitifs impliqués dans la lecture qui ont fondé les programmes d'interventions audio-phonologique, visuo-attentionnel et audio-visuel proposées dans le protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle qui sera décrit dans le chapitre 4. Dans notre approche d'une remédiation multimodale et curative de la DD, un focus particulier est porté sur les processus cognitifs altérés chez le lecteur dyslexique (LD). Notamment, nous décrirons les traitements de l'information visuo-orthographique (Grainger et al., 2016) et phonologique (Brysbart, 2022), ainsi que leurs modélisations chez le lecteur expert. En revanche, une approche de remédiation compensatoire s'appuie plus spécifiquement sur le codage morphologique et sémantique, considéré comme un moyen « naturel » de compensation développé par les LD pour identifier les mots écrits, tel que décrit dans les études princeps d'une lecture interactive en contexte (Stanovich, 1980) ou documenté chez les LD universitaires (Colé et al., 2020). Comme notre

approche de remédiation ne s'appuie pas sur des stratégies compensatoires, la question des codages morphologique et sémantique ne sera que brièvement évoquée.

La seconde section de ce chapitre souligne l'aspect complexe de la DD à travers sa *multifactorialité étiologique, son hétérogénéité sémiologique et sa variabilité nosographique*. Le concept de *multifactorialité étiologique*, issu du modèle à déficits multiples (Pennington, 2006), souligne l'aspect multifactoriel des causes impliquées dans la DD et induit à son tour une *hétérogénéité sémiologique* c'est-à-dire une hétérogénéité des déficits cognitifs sous-jacents et des déficits comportementaux de la lecture et de l'orthographe. Fondement de notre travail de recherche, ce concept d'*hétérogénéité sémiologique* souligne l'intérêt d'une remédiation multimodale et curative adaptée à la variabilité individuelle des profils sémiologiques (i.e., cognitifs et comportementaux) des LD, que nous développons dans le chapitre 2. Enfin, nous analysons comment cette *multifactorialité étiologique* et cette *hétérogénéité sémiologique* s'inscrivent dans un cadre de classifications des troubles d'apprentissage du langage écrit et induisent une *variabilité nosographique*. Notamment, nous soulignons les divergences des critères diagnostiques des deux classifications internationales et l'impact des différentes définitions sur le diagnostic clinique de la DD. Ainsi, cette *variabilité nosographique* engendre une variabilité des conduites cliniques en termes de diagnostics et de remédiations.

1. Multimodalité des processus cognitifs de la lecture

Les déficits comportementaux de la lecture et de l'orthographe décrits dans la DD sont sous-tendus par des processus cognitifs plus ou moins altérés. De nombreux modèles théoriques ont tenté de décrire la façon dont un certain nombre de ces processus cognitifs pourraient interagir. À la différence des modèles « verbaux » de la lecture qui se sont limités à

une représentation modulaire des connaissances et de leurs relations (Marshall & Newcombe, 1973; Morton, 1969), les modèles computationnels permettent de simuler le comportement humain normal ou pathologique de l'activité de lecture. En implémentant différents cadres conceptuels théoriques de la lecture, ces modèles simulent le fonctionnement de certains processus cognitifs pour comprendre les liens entre le fonctionnement cérébral et l'activité de lecture. Trois types d'informations sont modélisés : le codage visuo-orthographique, le codage phonologique et le codage sémantique (Ans & Carbonnel, 1998; M. Coltheart et al., 1979; Plaut et al., 1996) afin de préciser comment et quand les traits visuels, les lettres, les graphèmes, les phonèmes, les syllabes, les morphèmes ou les mots sont activés et encodés. La simulation de la lecture entre la perception visuelle d'un mot et son identification est ensuite comparée à des données humaines comportementales normales ou pathologiques pour valider le modèle. Certains modèles de reconnaissance visuelle de mots ont tenté de simuler le traitement orthographique de la lecture silencieuse (i.e., l'analyse visuelle d'une séquence de lettres). D'autres modèles ont tenté de simuler le traitement phonologique de la lecture silencieuse ou à voix haute (i.e., la transformation d'une information visuelle orthographique en information auditive phonologique). Enfin, des modèles mixtes ont tenté de simuler un fonctionnement en parallèle des codages visuo-orthographique, phonologique et sémantique.

Les processus cognitifs qui interviennent pendant la lecture, des mouvements oculaires jusqu'à la prononciation des mots lus, sont très complexes et multimodaux. Notre propos n'est pas de décrire toute la complexité des processus en jeu, mais de se référer à certaines données fondamentales relatives aux codages visuo-orthographiques et phonologiques activés afin de justifier le choix des programmes d'interventions mis en œuvre dans l'élaboration du protocole de remédiation multimodale et multi-composante de la dyslexie développementale. Même si de nombreuses interrogations persistent, nous avons tenté de comprendre comment le lecteur expert transforme simultanément une information visuelle en une information

sémantique stockée en mémoire. Quels sont la nature et le mode d'organisation de ces représentations ? Comment ces informations sont codées et récupérées en lecture ?

1.1. Codage visuel et orthographique

La reconnaissance visuelle des lettres permet la reconnaissance des mots par l'accès au lexique orthographique, soit par un traitement direct impliquant des traitements visuels perceptifs et des traitements lexicaux, soit par un traitement indirect impliquant des traitements pré-lexicaux.

Traitements visuels perceptifs de la lecture

L'identité abstraite des lettres, indépendante de la typographie ou de la police des caractères (Coltheart, 1981), constitue une des unités de base de la reconnaissance des mots écrits (Jacobs & Grainger, 1992). Cette reconnaissance des lettres s'effectue par le traitement des traits visuels des lettres et dépend des connaissances lexicales du lecteur. Le codage de l'identité et de la position des lettres peut être soit simultané, soit dépendant du contexte local, soit dépendant du contexte spatial.

Le premier type de codage, le *codage simultané* ou par *slot* de l'identité et de la position des lettres, est absolu quand les lettres sont codées indépendamment les unes des autres. Ce traitement très précis est implémenté dans les modèles connexionnistes, à activation interactive (McClelland & Rumelhart, 1981) ou à traitement parallèle distribué tel que le modèle PDP (Harm & Seidenberg, 2004; Plaut et al., 1996; Seidenberg & McClelland, 1989). Dans le modèle à activation interactive (McClelland & Rumelhart, 1981), l'identification des lettres encodées s'effectue selon leur position stricte dans la séquence du mot, c'est-à-dire que la même lettre va être codée différemment selon sa position dans un mot et selon la longueur du

mot (e.g., l'unité de traitement de la lettre [R] en position initiale dans un mot de 4 lettres -*rame*- est différente de l'unité de traitement de la lettre [R] en position initiale dans un mot de 6 lettres -*rideau*- et différente de l'unité de traitement de la lettre [R] en seconde position dans un mot de 4 lettres -*arme*- et ainsi de suite). Ce type de codage simultané absolu est très coûteux dans le sens où il nécessite de dupliquer de nombreuses fois l'alphabet pour pouvoir coder toutes les positions de suites de lettres en fonction de la longueur des mots. Ce type de codage strict et précis ne semble donc pas compatible avec la flexibilité des traitements visuels observée au niveau comportemental pendant la lecture.

Par conséquent, d'autres auteurs ont proposé que le codage simultané de l'identité et de la position des lettres soit distribué sur plusieurs positions plutôt que localisé sur un seul point. (Ratcliff, 1981). Ce codage serait donc plutôt relatif qu'absolu c'est-à-dire que la position d'une lettre serait définie selon un degré d'excentricité par rapport au point de fixation de l'œil dans le mot, bénéficiant d'une meilleure acuité en vision fovéale. Ainsi, la position d'une lettre serait définie par rapport à un ou plusieurs points d'ancrage visuels.

Différents points d'ancrage ont été décrits. Un point d'ancrage sur la première lettre du mot (*Dual Route Cascaded* - Modèle DRC : Coltheart et al., 2001) implique que la position d'une lettre codée par rapport au début du mot reste la même quelle que soit la longueur du mot (i.e., la deuxième lettre d'un mot de 4 lettres est codée de la même façon que la deuxième lettre d'un mot de 7 lettres). Les points d'ancrages peuvent aussi être attribués à la position de fixation de l'œil dans le mot, en plus de deux autres points d'ancrage qui correspondent à la première et la dernière lettre du mot (Peressotti & Grainger, 1999). Lors d'une fixation centrale sur le mot (acuité visuelle), ces trois points d'ancrage correspondent à une fonction W qui définit une plus grande exactitude pour la première, la dernière lettre, et la lettre située au point de fixation (Grainger & Holcomb, 2007; M. Stevens & Grainger, 2003). Enfin, le point d'ancrage peut aussi être attribué à la position optimale du regard (O'Regan & Jacobs, 1992) à

gauche du centre du mot (*Spatial Coding Model* - modèle SCM : Davis, 2010). Comme le soulignent Phénix et al. (2016) dans leur revue sur les modèles computationnels de la lecture, ce choix d'un codage relatif, autrement dit d'une incertitude positionnelle (Davis, 2010; Gomez et al., 2008) « n'est qu'une façon de répondre aux contraintes de flexibilité qui pourraient également résulter des propriétés du décours temporel de l'encodage de l'identité et de la position des lettres au cours du traitement » (Adelman, 2011).

Le second type de codage de l'identité et de la position des lettres est *le codage dépendant du contexte local* qui utilise le concept de « triplets » de lettres adjacentes ou le concept de « trigrammes ouverts » de lettres non adjacentes. Par exemple, le mot *rame* est codé *#ra, ram, ame, me#* (# représente un espace) avec des lettres adjacentes (Seidenberg & McClelland, 1989). Le mot *rame* peut aussi être codé en insérant une lettre entre les triplets pour constituer des « trigrammes ouverts » *r_am, a_me*, en plus des triplets de lettres adjacentes (Mozer, 1987). Enfin, ce codage de la position relative de lettres non adjacentes peut aussi s'effectuer par des « bigrammes ouverts » pour former des bigrammes avec des lettres adjacentes et non adjacentes (Schoonbaert & Grainger, 2004).

Le troisième type de codage appelé *codage spatial* utilise le concept de gradient d'activation pour coder la position relative des lettres distribuées spatialement. Par exemple, dans le modèle SOLAR, *Self-Organizing Lexical Aquisition and Recognition* (Davis & Bowers, 2006) ou dans le modèle SERIOL *Sequential Encoding Regulated by Inputs to Oscillations within Letter units* (Whitney, 2001), l'activation de la position des lettres est décroissante des premières lettres aux dernières lettres du mot. Le codage de la localisation spatiale des lettres en lecture étant influencé par l'attention visuelle, ces modèles peuvent donc en partie expliquer les processus visuels et visuo-attentionnels impliqués dans la lecture et leur déficit chez les LD (cf. la section *Les modèles descriptifs de reconnaissance visuelle de mot*, dans ce chapitre).

Traitements orthographiques lexicaux

La reconnaissance visuelle des lettres peut se faire aussi par un traitement direct impliquant des traitements lexicaux. Chez le lecteur expert, les traitements orthographiques lexicaux se caractérisent par un accès direct aux représentations orthographiques des mots. Cette récupération en mémoire orthographique des mots connus est sous la dépendance de différents facteurs qui se manifestent par les effets de *fréquence lexicale*, de *répétition*, de *voisinage orthographique*, et de *supériorité des mots* sur les pseudomots (Reicher, 1969; Wheeler, 1970). *L'effet de la fréquence* d'occurrence des mots écrits joue un rôle important au niveau du processus d'identification lexicale. Les mots rencontrés fréquemment dans la langue écrite sont plus faciles à reconnaître que les mots moins fréquemment rencontrés (Andrews & Heathcote, 2001). L'augmentation de la fréquence lexicale permet de diminuer l'activation de la VWFA (Dehaene et al., 2015a) en intervenant dès les premières 200 ms après la présentation du stimulus. Des tâches de décision lexicale, d'identification perceptive, de prononciation, de catégorisation sémantique et des procédures d'enregistrement des mouvements des yeux sont classiquement utilisées pour évaluer les effets de la fréquence lexicale.

Bien que dominant, cet effet de fréquence n'est pas le seul impliqué dans la reconnaissance visuelle des mots pour laquelle un *effet de supériorité des mots* est également décrit. En effet, les mots sont mieux identifiés que des suites de lettres aléatoires de même longueur et les lettres sont mieux identifiées dans un mot que de façon isolée ou dans un non-mot (Reicher, 1969).

L'effet de répétition de mots se traduit, quant à lui, par la facilitation de la lecture d'un mot cible lorsque ce même mot a été présenté auparavant (Monsel, 1985). L'effet de répétition à court terme témoigne des procédures d'accès au lexique alors que l'effet de répétition à long terme, sensible à la fréquence du mot, repose sur l'information orthographique abstraite (Bowers, 2000; Bowers & Turner, 2003).

L'effet de *voisinage orthographique* varie selon la *fréquence du voisinage* (fréquence des voisins orthographiques d'un mot cible), la *taille du voisinage* (nombre de voisins orthographiques d'un mot cible), la nature de la tâche et la langue étudiée. Le *voisinage orthographique* se mesure par le nombre de mots de même longueur partageant toutes les lettres sauf une à la même position que le mot cible (Coltheart et al., 1977). Par exemple, le mot *page* a plusieurs voisins orthographiques comme *mage, nage, rage, sage, cage, pige, paie, pale, pape*, alors que le mot *drap* n'a aucun voisin orthographique. Ainsi, il a été démontré que l'identification des non-mots ayant de nombreux voisins orthographiques est plus longue que l'identification de non-mots ayant peu de voisins orthographiques (Andrews, 1989, 1992; Grainger & Jacobs, 1996). Les effets de *voisinage orthographique* peuvent être influencés partiellement par les effets de *voisinage phonologique*, témoignant d'une interaction entre le codage orthographique et le codage phonologique dans la lecture silencieuse (Grainger et al., 2005).

Des modèles computationnels de codage visuel orthographique lexical en lecture silencieuse comme le *Semistochastic Interactive Model* (Jacobs & Grainger, 1992) et le *Multiple Read-Out Model* (Grainger & Jacobs, 1996) simulent ces effets de fréquence, de répétition, de voisinage orthographique et de supériorité du mot qui interviennent lors de l'analyse visuelle d'une séquence de lettres.

Traitements orthographiques pré-lexicaux

Enfin, la reconnaissance visuelle des lettres et des mots par l'accès au lexique orthographique peut se faire par un traitement indirect. En effet, les traitements orthographiques pré-lexicaux impliquent un accès au lexique mental indirect en passant par l'activation de représentations intermédiaires entre le niveau des lettres et le niveau des mots. Ces traitements orthographiques pré-lexicaux peuvent s'effectuer à différents niveaux

linguistiques comme le graphème, l'attaque, la rime, la syllabe ou le morphème. Dans les systèmes d'écritures alphabétiques comme le français contenant des graphèmes complexes (e.g., *an, on, oin, ien*), les graphèmes représentent les unités fonctionnelles de la lecture, ce qui n'exclut pas bien sûr le rôle des lettres (ou d'autres unités) dans la reconnaissance des mots ayant des graphèmes simples (e.g., *p, t, o, i*). En ce qui concerne l'unité morphémique, certains auteurs (Gonnerman et al., 2007) proposent que le codage morphologique soit la conséquence de la convergence des codes orthographique, phonologique et sémantique. D'autres auteurs (Caramazza et al., 1988) suggèrent un niveau de représentation morphologique à part entière. Cette différence d'interprétation du codage morphologique apparaît également dans les résultats d'études en imagerie cérébrale qui identifient pour certaines une aire cérébrale spécifique à la morphologie (Fabre, 2006), et pour d'autres concluent que les aires cérébrales sensibles à la morphologie recouvrent presque entièrement celles sensibles à l'orthographe et à la sémantique (Devlin et al., 2004).

Les modèles de reconnaissance visuelle de mot

Chez le lecteur expert, les hypothèses de traitements orthographiques lexicaux et pré-lexicaux d'un accès direct ou indirect aux représentations orthographiques des mots ont été validées par des tâches expérimentales de reconnaissance visuelle de mots par identification perceptive ou par décision lexicale. Plusieurs modèles computationnels descriptifs ou abstraits ont été ainsi validés en simulant les performances comportementales observées lors de ces tâches expérimentales. Les premiers modèles descriptifs ont tenté de décrire l'ensemble des processus de reconnaissance visuelle des mots et ont validé la nécessité d'un traitement perceptif des traits visuels et des lettres avant d'accéder au traitement lexical.

Les modèles descriptifs de reconnaissance visuelle de mot

Le modèle à activation interactive (ou IA pour *Interactive Activation*) est un modèle connexionniste inspiré de la neurobiologie. Ce modèle simule un réseau de neurones composé de nœuds et de connexions qui codent en parallèle les traits visuels, les lettres et les mots sur trois niveaux localisés (McClelland & Rumelhart, 1981). Ce réseau de connexions excitatrices et inhibitrices permet d'activer successivement les traits, les lettres et les mots qui à leur tour activent les lettres par rétroaction. Ainsi, les traitements perceptifs des traits visuels et des lettres sont dépendants et progressifs, et permettent la reconnaissance du mot, selon sa fréquence lexicale (e.g., McClelland & Rumelhart, 1981).

D'autres modèles descriptifs permettent également de simuler la décision lexicale et son déroulement temporel. Dans le *Multiple Read-Out Model* (MROM : (Grainger & Jacobs, 1996), le seuil d'identification du mot n'est plus fixe et identique comme dans le modèle IA mais varie selon une distribution de probabilités gaussienne qui reflèterait plus écologiquement les mécanismes de la lecture.

Le *Spatial Coding Model* (SCM : Davis, 2010) propose un codage spatial parallèle de la position des lettres. Les traits visuels, les lettres et les mots sont codés en parallèle selon la même structure connexionniste que dans le modèle IA (McClelland & Rumelhart, 1981) mais bénéficient de composants supplémentaires pour traiter des stimuli plus longs (12 lettres au lieu de 4) et de longueur variable.

Au contraire, le modèle SERIOL (Whitney, 2001) propose un codage spatial sériel de la position des lettres effectué sur cinq niveaux. Cependant, certaines parties du modèle ne sont pas implémentées. La position des lettres extraite de la représentation rétinotopique active le niveau lexical. L'ajout d'un gradient d'acuité au niveau « rétinien » et d'un gradient positionnel au niveau « lettres » permet de moduler l'activation du point de fixation et des champs visuels droit et gauche et ainsi d'expliquer les effets d'asymétrie de traitement des lettres ou les effets

de position optimale du regard (O'Regan & Jacobs, 1992). Le niveau « bigrammes ouverts » qui n'est pas implémenté dans ce modèle mais le sera dans d'autres modèles (Grainger & Van Heuven, 2003), permet d'encoder des paires de lettres non adjacentes et ainsi expliquer la flexibilité du codage positionnel. Le modèle SERIOL peut donc en partie expliquer les processus visuels et visuo-attentionnels impliqués dans la lecture et leur déficit chez les LD. En effet, le codage de la localisation spatiale des lettres en lecture est influencé par l'attention visuelle. Chaque lettre activée va donc être associée à une représentation phonologique selon une correspondance qui est temporelle. Les graphèmes et les représentations phonologiques se chevauchant temporellement permettent au lecteur de former des représentations *graphonémiques*. Lorsque le lecteur est incapable de focaliser son attention visuelle sur une seule lettre dans un mot afin de permettre aux représentations phonologiques et graphémiques correspondantes de se chevaucher temporellement, des représentations phonologiques et graphémiques non correspondantes peuvent alors être associées. Ainsi, l'établissement d'une correspondance phonologique-graphémique fiable et stable sera perturbé (Whitney & Cornelissen, 2005).

Les modèles abstraits de la reconnaissance visuelle de mots

À la différence des modèles descriptifs, des modèles plus abstraits décrivent les effets d'un seul processus cognitif sur la reconnaissance visuelle de mots. Ainsi, des processus cognitifs tels que le codage de l'identité des lettres (Modèle *Bayesian Reader* : (Norris, 2006), le codage positionnel des lettres (Modèle *Overlap* : (Gomez et al., 2008) ou le codage de l'identité et de la position des lettres (Modèle *Letters in Time and Retinotopic Space* - LTRS : (Adelman, 2011) dont le dysfonctionnement serait responsable d'une mauvaise reconnaissance visuelle du mot, ont été simulés.

Pour coder l'identité des lettres, le modèle BR, *Bayesian Reader* (Norris, 2006; Norris & Kinoshita, 2012) combine les informations perceptives (lettres) normales ou bruitées aux informations lexicales « a priori » (mots) basées sur la fréquence des mots connus par le lecteur. Ici, les unités mots ne sont plus activées mais calculées selon une probabilité d'apparition du mot à identifier. Cette probabilité est calculée par le théorème de Bayes qui combine les nouvelles données issues des informations perceptives des lettres d'un mot à celles des mots connus en mémoire orthographique¹. Ce modèle permet de simuler l'effet de fréquence en reconnaissance de mots et en décision lexicale.

Le modèle *Overlap* (Gomez et al., 2008) n'utilise pas les informations perceptives mais calcule le codage positionnel des lettres dans le mot par une distribution de probabilité gaussienne permettant la comparaison de deux séquences de lettres. Ce modèle permet de simuler les effets de transposition de lettres, de répétition de lettres, de migration de lettres, d'insertion ou suppression de lettres.

Selon le modèle LTRS (Adelman, 2011), l'appariement graduel entre les informations perceptives et lexicales n'est pas nécessaire. Seules les informations correctes (non bruitées) sur l'identité et la position des lettres sont nécessaires pour identifier le mot. En effet, le modèle simule le décours temporel nécessaire à l'identification et à la position de chaque lettre dans le mot. Le traitement parallèle des lettres d'un mot est modulé par différents facteurs (l'attention, la visibilité des lettres, la distance au point de fixation et les effets de masquage latéral) responsables de la variabilité du temps d'identification et de positionnement de chaque lettre du mot à lire.

¹Capacité à former, stocker et accéder à des représentations orthographiques de mot stockées en mémoire à long terme

Bases neurales de la reconnaissance visuelle

Le codage visuel de l'information orthographique dépend de l'interaction des deux voies dorsale et ventrale (Vidyasagar & Pammer, 2010). La voie dorsale occipito-pariétale gauche ou magnocellulaire est impliquée dans le traitement visuo-attentionnel nécessaire à la segmentation et à la localisation des lettres. La voie ventrale occipito-temporale gauche ou parvocellulaire est impliquée dans le traitement de l'identification des lettres (cf. dans ce chapitre, section *Les modèles en « cascades »*).

Au niveau de la voie dorsale, le lobule pariétal supérieur bilatéral serait impliqué dans le traitement parallèle de plusieurs éléments visuels définissant une fenêtre attentionnelle pour accéder à la reconnaissance automatique et rapide des mots écrits (Reilhac et al., 2013) (cf. le Modèle multitraces décrit p. 31 de ce chapitre).

Au niveau de la voie ventrale, l'aire cérébrale du cortex ventral occipito-temporal située dans le gyrus fusiforme gauche ou *Visual Word Form Area* (VWFA) permettrait la reconnaissance visuelle des lettres, des chaînes de lettres et des mots écrits (Cohen et al., 2000). La VWFA traite les combinaisons de traits élémentaires constitutifs de la forme des lettres et des mots, permettant peu à peu d'extraire une représentation visuelle stable des mots. L'activation de cette aire se développe à la condition que l'individu soit exposé à des lettres et des mots (Dehaene et al., 2015a), et cette activation augmente progressivement avec l'apprentissage de la lecture (Dehaene-Lambertz et al., 2018). Cette aire stockerait également les informations concernant l'ordre des lettres dans un mot, leur fréquence et les règles graphotactiques d'une langue donnée (Ferrand, 2007).

Résumé 1.1

Le codage orthographique

La présentation des modèles computationnels de reconnaissance de mots écrits souligne la complexité des traitements orthographiques nécessaires pour identifier visuellement des lettres et des mots. Le codage orthographique peut s'effectuer à des niveaux perceptifs (traits et lettres), pré-lexicaux (graphèmes, syllabes, morphèmes) et lexicaux (mots). Les hypothèses de traitement orthographique perceptif postulent un codage de l'identité et de la position des lettres qui peut être absolu (modèles IA et PDP) ou relatif (modèles DRC et RCM) en fonction du contexte local (modèle IA) ou du contexte spatial (modèles SOLAR, SERIOL).

D'autres hypothèses de traitement orthographique à la fois perceptif et lexical postulent soit un codage parallèle des traits, des lettres et des mots (modèle IA et SCM), soit un codage sériel de la position des lettres (modèle SERIOL), soit un codage du traitement lexical variable temporellement (modèle MROM). Les hypothèses de traitement orthographique pré-lexical impliquent un codage de l'identité des lettres (modèle BR), de leur position (Overlap) ou les deux à la fois (LTRS).

La co-existence de plusieurs hypothèses théoriques souligne la nécessité de prendre en compte les traitements perceptifs visuels et les traitements visuo-attentionnels dans la compréhension des processus cognitifs impliqués dans la lecture ainsi que dans l'évaluation et la remédiation des troubles de la lecture. L'information visuelle orthographique une fois traitée est transformée en information auditive phonologique. A cet effet, d'autres modèles computationnels simulent plus précisément le traitement phonologique de la lecture.

1.2. Codage phonologique

Pendant l'activité de lecture, le codage phonologique transforme une information visuelle orthographique en information auditive phonologique. Nous n'aborderons ici que le codage phonologique dans les langues alphabétiques.

Rôle du codage phonologique

Bien que le rôle du codage phonologique dans la lecture à voix haute soit une évidence dans la mesure où cette tâche implique explicitement un code phonologique, le rôle de ce codage dans la lecture silencieuse a opposé trois théories : (1) la théorie de l'accès direct selon laquelle le codage phonologique ne joue aucun rôle et seul le codage orthographique intervient (Morton, 1969; Taft & van Graan, 1998), (2) la théorie de la médiation phonologique selon laquelle le codage orthographique ne joue aucun rôle et seul le codage phonologique intervient (Van Orden et al., 1990), (3) la théorie plus probable selon laquelle les codages phonologique et orthographique jouent un rôle conjoint (Ferrand & Grainger, 1994).

Les preuves en faveur d'un codage phonologique au cours de la lecture silencieuse sont nombreuses et reposent sur deux types d'effets principaux : les effets d'homophonie et de pseudo-homophonie d'une part, et les effets de régularité et de consistance grapho-phonologique, d'autre part. Ainsi, l'activation phonologique a été observée et confirmée lors de plusieurs tâches expérimentales. Les tâches de décision lexicale (e.g., Ziegler, Ferrand, et al., 2000), de masquage rétroactif (e.g., Berent, 2003), d'identification perceptive avec double masquage (Brysbart, 2001), de catégorisation sémantique et de jugement sémantique (e.g., Coltheart et al., 1994), de jugement de phrases (e.g., Jared et al., 1999), l'enregistrement des mouvements des yeux (e.g., Sparrow & Mielliet, 2002) et la tâche de détections de lettres avec masquage (e.g., Ziegler, 1997) montrent que le code phonologique est activé de façon automatique et irrépressible au cours de la lecture silencieuse, dans de nombreuses langues. Le rôle du codage phonologique dans la lecture silencieuse apparaît donc comme indispensable, automatique et universel (Van Orden & Kloos, 2005), ce qui réfute la théorie de l'accès direct.

Accès au code phonologique

Il existe deux façons d'obtenir l'information phonologique à partir des mots écrits. (1) Le codage phonologique par assemblage pré-lexical s'effectue en convertissant chacun des segments orthographiques en segments phonologiques pour construire une représentation phonologique pré-lexicale du mot. C'est le processus de conversion des graphèmes en phonèmes décrit par exemple par Coltheart et al. (2001) avec le modèle DRC. (2) Le codage phonologique par adressage lexical s'effectue en convertissant la représentation orthographique globale du mot en représentation phonologique pour la stocker directement en mémoire (Perfetti et al., 1992). C'est le processus de conversion d'une représentation orthographique en représentation phonologique décrit dans le modèle DRC (Coltheart et al., 2001). Le code phonologique est activé 50 ms après le code orthographique, soit 250 ms après la présentation de la cible (Grainger et al., 2006). La plupart des modèles de lecture à voix haute décrivent comment le codage phonologique intervient pour générer une réponse articulatoire.

Les modèles de lecture incorporant un codage phonologique

Différents modèles de lecture computationnels ont modélisé le codage phonologique c'est-à-dire les processus cognitifs activés pour produire une séquence phonologique de sons à partir d'une séquence visuelle de lettres. Le codage visuel orthographique et le codage sémantique ne sont pas explicités précisément par ces modèles de lecture à voix haute ou « modèles de dénomination » mais sont mentionnés. Leur objectif premier est de modéliser le codage phonologique en simulant les performances de lecture de différents types d'items (mots réguliers, irréguliers ou pseudo-mots) chez le lecteur expert ainsi que dans les dyslexies acquises et développementales. Trois types de modèles de dénomination sont décrits pour

simuler le traitement phonologique de la lecture à voix haute de mots isolés (e.g., la transformation d'une information visuelle orthographique en information auditive phonologique) : le modèle double-voie, le modèle en triangle et le modèle multitraces.

Les modèles connexionnistes à double voie

Les modèles connexionnistes à double-voie décrivent deux voies de lecture qui fonctionnent en parallèle : la lecture à voix haute d'un mot est générée par une voie lexicale médiée et par une voie sublexicale directe. Après des décennies d'expériences comportementales avec des lecteurs experts et des patients cérébrolésés, le « Dual Route Cascade » ou DRC a pu simuler la lecture à voix haute et la lecture silencieuse de mots et de pseudomots monosyllabiques jusqu'à 8 lettres, en anglais (Coltheart et al., 2001), en allemand (Ziegler, Perry, et al., 2000), et en français (Ziegler et al., 2003). L'information est transmise en cascade d'un niveau à l'autre (un niveau activé déclenche l'activation du niveau suivant) par deux voies implémentées : une voie lexicale/non sémantique et une voie sublexicale/phonologique. La voie lexicale convertit une suite de lettres, de façon parallèle à toutes les positions, en unité orthographique qui active directement une unité phonologique sans activer le système sémantique. Cette unité phonologique active ensuite les phonèmes correspondants, en parallèle, à toutes les positions. La voie lexicale utilise le même mécanisme que le modèle connexionniste à activation interactive - IA (McClelland & Rumelhart, 1981). La voie sublexicale convertit une suite de lettres en une suite de phonèmes grâce à des règles de conversion des graphèmes en phonèmes (CGP), de façon sérielle, lettre après lettre, puis phonème après phonème, de la gauche vers la droite. Le modèle DRC présente une troisième voie lexicale/sémantique non implémentée.

Plus performant, le modèle « Connectionist Dual Process » CDP + simule la lecture à voix haute en anglais de mots et pseudo-mots monosyllabiques (Perry et al., 2007),

dissyllabiques avec le modèle CDP ++ (Perry et al., 2010) et la lecture à voix haute en français et en italien de mots plurisyllabiques (Perry et al., 2014a, 2014b), selon les principes du décodage phonologique et de la théorie de l'auto-apprentissage (Share & Stanovich, 1995; Ziegler et al., 2014). Les différents graphèmes sont codés selon leur position syllabique grâce à un buffer graphémique. Ces informations grapho-syllabiques vont structurer un réseau d'assemblage à deux couches pour encoder les correspondances graphème-phonème. Deux voies lexicale et sublexicale sont implémentées selon une architecture connexionniste où les codes phonologiques lexicaux et sous-lexicaux sont intégrés en temps réel grâce à un buffer phonologique de sortie. Ces modèles, très puissants, lisent à voix haute la majorité des mots et des pseudomots et sont capables de simuler tous les effets expérimentaux recommandés (Coltheart et al., 2001) de fréquence, de lexicalité, de consistance, de longueur, de régularité, de voisinage, d'amorçage, de pseudo-homophonie, contrairement au modèle DRC qui ne simulent pas les effets de consistance et de voisinage. De plus, l'altération des sous-composants du modèle a montré les mêmes déficits que ceux des enfants LD. Notamment, la simulation d'un déficit d'attention visuelle ou l'ajout d'un bruit au niveau des lettres altère plus particulièrement la lecture des pseudo-mots (Ziegler et al., 2014).

Basé sur l'architecture de CDP ++, le récent *modèle multi-déficits* développemental connexionniste d'apprentissage de la lecture permet de simuler l'hétérogénéité et les différences individuelles dans les profils de dyslexie, en altérant les composants pertinents du modèle (Perry et al., 2019; Ziegler et al., 2020) (cf. section 1.4 de ce chapitre, *Vers des modèles intégratifs de la lecture*).

Les modèles en triangle

Contrairement aux modèles à double voie, le modèle en triangle inclut l'information sémantique qui réduit l'ambiguïté au niveau des correspondances graphème-phonème

(Brysbaert, 2022) et la lecture à voix haute d'un mot est générée par un ensemble de connexions phonologique, orthographique et sémantique. Selon une approche distribuée, le modèle en triangle à traitement parallèle distribué ou modèle PDP (*Parallel Distributed Processing*) à une seule route, inclut trois composantes interconnectées pour coder les informations orthographiques, phonologiques et sémantiques des mots (Harm & Seidenberg, 2004; Plaut et al., 1996; Seidenberg & McClelland, 1989). Grâce à une procédure d'apprentissage, la *rétropropagation de l'erreur* (Aghababian & Jacobs, 1998) qui permet de diminuer la différence entre la réponse obtenue et la réponse attendue, ce modèle est capable d'apprendre les relations statistiques entre l'orthographe et la phonologie sans utiliser des représentations symboliques des codes orthographique et phonologique.

La version initiale du modèle a implémenté seulement la connexion orthographe-phonologie (Seidenberg & McClelland, 1989). Une extension du modèle (Harm & Seidenberg, 2004) a ensuite implémenté les deux connexions menant au code sémantique : la connexion « directe » orthographe-sémantique en accédant au code phonologique par adressage lexical et la connexion « indirecte » orthographe-phonologie-sémantique en accédant au code phonologique par assemblage pré-lexical. Cette extension a mis en évidence que l'activation de l'information sémantique d'un mot serait déterminée simultanément par les deux connexions directe et indirecte. L'information sémantique d'un mot est alors activée par les composantes phonologique et orthographique, simultanément. Le réseau implémenté qui relie les unités orthographiques, phonologiques et les unités cachées (lien entre les unités orthographiques et phonologiques), s'oppose au modèle double-voie car il fait intervenir une procédure unique, et non deux procédures parallèles différentes, pour lire les mots irréguliers et les pseudomots (Seidenberg & McClelland, 1989), et permettre ainsi une récupération sémantique efficace (Harm & Seidenberg, 2004). Les représentations orthographiques, phonologiques et sémantiques ne sont pas locales c'est-à-dire stockées dans des lexiques

séparés mais au contraire sont représentées de façon distribuée dans le cerveau du lecteur. La lecture d'un mot entraîne le calcul d'un patron d'activations orthographiques, phonologiques et sémantiques (Harm & Seidenberg, 2004; Seidenberg & McClelland, 1989). Ainsi, l'orthographe active la phonologie, la phonologie active l'orthographe et une altération de ces connexions expliquerait les déficits en lecture. Pour simuler la DD, les auteurs ont altéré la représentation des informations phonologiques avant que le modèle n'apprenne les relations statistiques. L'altération de la lecture était proportionnelle à l'intensité du déficit phonologique introduit dans le modèle.

Le modèle multitraces

Un des premiers modèles basé sur des mots multisyllabiques en langue française, le modèle multi-traces MTM, *MultiTrace Memory Model* (Ans & Carbonnel, 1998) propose une conception théorique du fonctionnement cognitif de la lecture encore différente des deux modèles précédents, en proposant deux procédures globale et analytique au sein d'un réseau unique (Phénix et al., 2016). Le réseau connexionniste de ce modèle MTM a adopté la proposition fondamentale du modèle de simulation multitraces de mémoire épisodique Minerva 2 (Hintzman, 1984, 1988) qui postule un traitement local lors de l'apprentissage et un traitement parallèle à la propagation lors de la récupération. Dans son principe général, ce modèle Minerva rejette l'existence d'une mémoire sémantique permanente, et postule une mémoire entièrement épisodique. En d'autres termes, lors de l'apprentissage, les événements vécus donnent lieu à des traces localisées et l'ensemble des traces permettent la récupération. Toutefois, contrairement à ce modèle, dans le modèle MTM seuls les nouveaux épisodes qui n'ont jamais été traités en mémoire, donne lieu à des traces localisées. Ainsi, la mémorisation d'un événement orthographique est systématiquement associée à la mémorisation de son contexte environnemental (y compris sémantique).

Une autre originalité de ce modèle, inspirée du modèle MORSEL (Mozer & Behrmann, 1990) est de postuler l'existence d'un composant visuo-attentionnel qui joue un rôle majeur dans le choix de la procédure utilisée. Dans le modèle MTM, une fenêtre visuo-attentionnelle détermine la procédure de lecture utilisée, globale ou analytique, au sein d'un réseau unique pour simuler la lecture à voix haute de mots plurisyllabiques en français. La phase d'apprentissage analytique permet un codage de toutes les associations de chaque pattern orthographique avec le pattern phonologique correspondant, par un traitement localisé où les lettres et les phonèmes sont codés selon leur position. La phase de rappel, globale permet l'activation de ces associations stockées en mémoire épisodique, par un traitement distribué où toutes les lettres de la séquence orthographique sont traitées simultanément pour générer une sortie phonologique globale en une seule étape. Le traitement, initialement global, bascule en mode analytique si le mot n'a pas été codé et stocké en mémoire épisodique. La réduction de la fenêtre visuo-attentionnelle permet ainsi la lecture à voix haute du mot par un traitement séquentiel analytique des lettres puis des phonèmes, grâce à la mémoire à court terme phonologique (non implémentée). Les mots et les pseudo-mots sont lus par le biais d'une procédure unique et leur traitement n'est pas spécifique à une procédure de lecture comme dans le modèle à double voie. Ce modèle peut simuler les effets classiques de la performance de lecteurs experts, les formes de dyslexies phonologique et de surface et les formes périphériques de dyslexie acquises. Fait intéressant, il peut prédire l'existence de formes de dyslexies développementales par réduction de l'empan visuo-attentionnel (Dubois et al., 2010; Zoubrinetzky et al., 2014).

Bases neurales du codage phonologique

Le codage phonologique de l'information orthographique dépend également de l'interaction des deux voies dorsale et ventrale dont le point de départ est la VWFA. Au niveau

de la voie dorsale occipito-pariétale gauche, l'accès phonologique par assemblage pré-lexical s'effectue dans le trajet passant par le lobe pariétal (gyrus angulaire et cortex pariétal inférieur) et allant jusqu'au gyrus frontal inférieur impliqué dans la perception et la production de la parole.

Au niveau de la voie ventrale occipito-temporale gauche, l'accès phonologique par adressage lexical s'effectue dans le trajet passant par le gyrus fusiforme antérieur impliqué dans le traitement orthographique et allant vers le gyrus temporal moyen et le gyrus angulaire, impliqués dans l'accès au sens (Brysbaert, 2022).

Résumé 1.2

Le codage phonologique

Les modèles computationnels pour simuler le codage phonologique de la lecture évoquent également des traitements à différents niveaux pré-lexical et lexical, nécessaires pour identifier des mots ou des pseudomots.

L'accès au code phonologique s'effectue soit par assemblage pré-lexical par le processus de conversion graphème-phonème pour construire une représentation phonologique du mot, soit par adressage lexical par la conversion de la représentation orthographique globale du mot en représentation phonologique pour l'adresser directement en mémoire (modèles à deux voies).

L'accès au code phonologique peut aussi se faire simultanément avec l'accès aux codes orthographique et sémantique par une procédure d'apprentissage statistique (modèles en triangle) ou par un traitement visuo-attentionnel en amont du codage phonologique (modèle multi-traces).

1.3. Codages morphologique et sémantique

Nous avons tenté dans les sections précédentes de comprendre comment les traitements de l'information orthographique et phonologique interviennent dans la lecture et comment des

modèles computationnels d'identification de mots simples peuvent simuler ces traitements cognitifs. Soulignons néanmoins que de nombreuses études ont également étudié le rôle du codage morphologique dans l'identification des mots complexes, le rôle du codage sémantique dans l'accès au sens des mots lus et le rôle du codage syntaxique dans une phrase ou un texte (pour une revue voir Rayner & Reichle, 2010).

Codage morphologique

Le codage morphologique est activé chez l'apprenti lecteur (Colé et al., 2018), chez l'adolescent (Goodwin et al., 2013) et chez l'adulte normolecteurs (Wilson-Fowler & Apel, 2015) et participe à l'identification des mots écrits et à la compréhension de phrases lues. Certains auteurs ont décrit des modèles où les mots morphologiquement complexes sont représentés de façon non décomposable c'est-à-dire par un accès lexical ou supra-lexical dépendants des traitements orthographiques et phonologiques (Giraud & Grainger, 2003). D'autres auteurs ont décrit des modèles où les mots sont décomposables selon leur structure morphologique par un accès pré-lexical (Taft, 1979) indépendamment des traitements phonologiques et orthographiques. Enfin, d'autres auteurs ont évoqué une absence de niveau « morphologique » dans le sens où les représentations des unités morphémiques sont le résultat des corrélations entre les représentations orthographiques, phonologiques et sémantiques (Gonnerman et al., 2007; Seidenberg & Gonnerman, 2000). Par exemple en français, « chanteur » peut être représenté comme un seul mot (niveau lexical) ou comme deux morphèmes décomposés « chant » et « eur » (niveau pré-lexical), de sorte que la racine « chant » puisse participer à la représentation d'autres mots comme « chanteuse » ou « chanter ». Soulignons enfin que les modèles du codage morphologique de la lecture semblent très dépendants de la complexité morphologique de la langue étudiée mais aussi de la fréquence des mots. Par exemple, un modèle de morphologie supra-lexicale a été décrit en français

(Giraud & Grainger, 2000) alors qu'un modèle de morphologie pré-lexicale a été décrit en hébreu (Deutsch et al., 1998) et un modèle de morphologie lexicale pour les mots fréquents et pour les mots rares, en italien (Caramazza, 1991).

Codage sémantique

D'autres modèles ont tenté de modéliser le codage sémantique dans la lecture. De nombreux travaux ont montré que le code sémantique d'un mot lu est activé de manière automatique, irrépessible et non consciente chez les adultes normolecteurs (pour une revue voir : Neely & Kahan, 2001). Les modèles du codage sémantique de mots dans la lecture diffèrent essentiellement par la nature distribuée (e.g., Plaut & Booth, 2000, 2006) versus locale (e.g., Neely, 1991) des représentations sémantiques pour simuler le passage d'une forme orthographique d'un mot à sa signification. D'autres modèles ont également tenté de simuler l'intégration sémantique de mots individuels vers l'intégration sémantique de phrases pour expliquer comment la syntaxe d'une phrase guide la construction des représentations nécessaires à sa compréhension. Alors que certains modèles, *garden-path models*, traitent en priorité la structure grammaticale de la phrase (Frazier & Clifton, 1997; Frazier & Rayner, 1982), d'autres, *constraint-based models*, traitent simultanément la structure grammaticale, la plausibilité, le contexte ou la pertinence de la phrase (MacDonald et al., 1994; McRae et al., 1998). Une récente étude souligne le rôle central des processus d'identification des mots dans la médiation entre le traitement sublexical de niveau inférieur et le traitement de niveau supérieur de la phrase pendant la compréhension de la lecture (Brossette et al., 2022). Les résultats ont montré en effet, des corrélations significatives dans la performance des niveaux de traitement adjacents (lettre-mot ; mot-phrase) mais pas entre des niveaux non adjacents (lettre-phrase) lors de tâches de décision alphabétiques, lexicales et grammaticales proposées à des adultes normolecteurs. Ainsi, le traitement des trois niveaux constituant l'épine dorsale

de la lecture dans une écriture alphabétique (lettre, mot, phrase) serait hiérarchique. En s'appuyant sur les représentations au niveau du mot et de la phrase, d'autres modèles ont également tenté de simuler le traitement de la compréhension d'un texte, par exemple le modèle *Construction-Intégration* ou CI (Kintsch & Van Dijk, 1978; Schmalhofer et al., 2002). Le modèle CI prédit avec précision les types d'informations mémorisées par le lecteur, les types d'inférences susceptibles d'aider le lecteur à la compréhension du texte et au repérage d'incohérences contextuelles. Cependant, ces modèles ne prédisent pas l'évolution temporelle de la lecture c'est-à-dire comment les différents processus cognitifs de la lecture déterminent le mouvement instantané des yeux du lecteur qui lit un texte (Rayner & Reichle, 2010).

1.4. Vers des modèles intégratifs de la lecture

Pendant de nombreuses années les modèles de reconnaissance des mots ont été développés indépendamment des modèles de contrôle des mouvements oculaires et les modèles d'identification des mots écrits ont été développés en sous spécifiant la modélisation de la reconnaissance visuelle des mots. Or, lors de la lecture de phrases ou de textes, le traitement visuel des lettres se fait en vision fovéale grâce au déplacement des yeux par des saccades oculaires. Des modèles ont tenté de simuler quels processus sous-tendent ces mouvements oculaires. De toute évidence, des capacités visuo-attentionnelles sont nécessaires d'une part pour traiter les informations fovéales afin de différencier des lettres visuellement proches (b et p) et d'autre part pour traiter les indices visuo-spatiaux afin de programmer les saccades (Leibnitz et al., 2017). Ainsi, de nombreux modèles de contrôle des mouvements oculaires ont intégré le rôle et la distribution de l'attention pendant la lecture (pour une revue voir Rayner & Reichle, 2010). Ces modèles peuvent simuler un déplacement d'une saccade oculaire et une répartition de l'attention en série sur un mot à la fois comme les modèles *EZ Reader* (Reichle et al., 1998), une répartition de l'attention en parallèle sur plusieurs mots comme dans les

modèles *SWIFT* (Engbert et al., 2005) et *Glenmore* (Reilly & Radach, 2006) et des mouvements oculaires du lecteur sans guidage de l'attention comme dans les modèles *SERIF* (McDonald et al., 2005) ou *SHARE* (Feng, 2006).

Modèle OBI-reader

Dans le prolongement de cette approche intégrative de la lecture (Grainger et al., 2016), des modèles plus récents impliquent les mouvements oculaires et l'attention visuelle dans le traitement orthographique. Ainsi, le modèle *OBI-reader* (Snell et al., 2018) associe les connaissances sur la reconnaissance d'un mot à celles sur le contrôle des mouvements oculaires pour simuler la lecture d'un texte en montrant le rôle clé joué par l'attention visuo-spatiale dans la reconnaissance des mots (Meeter et al., 2020).

Les modèles BRAID

Par ailleurs, le modèle *Bayesian word Recognition with Attention, Interference and Dynamics- BRAID* et ses extensions, *BRAID-Learn* et *BRAID-phon* associent la reconnaissance des mots à une variété de processus visuels connus pour affecter le traitement des chaînes de lettres, à savoir un gradient d'acuité, l'interférence latérale entre les lettres adjacentes et le déploiement de l'attention visuelle (Ginestet et al., 2019, 2022; Saghiran et al., 2020). Le modèle *BRAID-Learn* (Ginestet et al., 2022) intègre ces mécanismes visuo-orthographiques pour modéliser l'apprentissage orthographique de mots nouveaux. Enfin, l'innovant modèle *BREAD-phon* inclut à la fois une composante de reconnaissance de mots entièrement spécifiée et une composante phonologique (Saghiran et al., 2020).

Modèle multi-déficits

Enfin, le Modèle Multi-déficits (Perry et al., 2019; Ziegler et al., 2020) basé sur l'architecture de CDP ++, est le premier modèle à implémenter *l'hypothèse d'auto-apprentissage du décodage phonologique* (Share, 1995). Ce modèle intègre un processus probabiliste dans lequel le développement du lexique orthographique varie en fonction de la capacité orthographique de chaque enfant. De plus, il permet d'établir un lien de cause à effet entre un déficit cognitif sous-jacent présent avant l'apprentissage de la lecture et ses conséquences sur le développement de l'apprentissage de la lecture. Enfin, ce modèle permet de simuler l'hétérogénéité et les différences individuelles dans les profils de dyslexie, en altérant certains composants pertinents du modèle. Ainsi, il devrait pouvoir, dans le futur, prédire des trajectoires développementales, des résultats d'intervention ou évaluer des programmes d'apprentissage ou de remédiation de la lecture (Ziegler et al., 2019). Nous développons les aspects novateurs de ce modèle, plus en lien avec *l'hétérogénéité sémiologique* des LD, dans la deuxième section de ce chapitre (*Modèle multifactoriel de la dyslexie développementale*).

Résumé 1.3

Multimodalité des processus cognitifs de la lecture

De multiples théories ont tenté de modéliser les processus cognitifs de la lecture. Ainsi, de nombreux modèles computationnels simulent le traitement d'informations multimodales comme les mouvements oculaires, les codages orthographique, phonologique, morphologique et sémantique. Chaque modèle, même s'il ne peut rendre compte totalement de l'activité très complexe qu'est la lecture, est donc le reflet d'une partie de cette activité. Par conséquent, la connaissance et la compréhension de chaque modèle et des liens qui les unissent est indispensable à la compréhension globale des processus multimodaux de la lecture.

Alors que l'apprentissage orthographique est principalement conditionné par l'efficacité du recodage phonologique dans les modèles d'auto-apprentissage, il apparaît que les mécanismes de traitement visuel et attentionnel impliqués dans l'identification de la chaîne de lettres peuvent également conditionner l'apprentissage orthographique. Une approche plus intégrative de la lecture associe ces deux hypothèses en proposant des modèles innovants capables de simuler les processus orthographique, phonologique et visuo-attentionnels.

Enfin, l'intérêt majeur de la modélisation de tous ces processus cognitifs est de déterminer les relations de cause à effet entre un ou plusieurs processus qui dysfonctionnent et ses conséquences sur l'apprentissage de la lecture. En effet, la prise en compte simultanée de ces aspects multimodaux est essentielle dans la compréhension, l'apprentissage et la remédiation de ce processus complexe qu'est la lecture. Ces modèles permettent donc également de tester dans quelle mesure la multifactorialité étiologique de la dyslexie peut expliquer la variabilité sémiologique de ce trouble.

2. Modèles multifactoriels de la dyslexie développementale

Nous avons vu dans le chapitre précédent que la lecture implique des traitements sous-jacents multimodaux à la fois phonologiques, orthographiques, morphologiques, sémantiques, oculomoteurs et visuo-attentionnels. Un déficit d'un ou plusieurs de ces processus cognitifs peut donc provoquer un trouble d'apprentissage de la lecture. Selon de nombreuses études qui

confirment le profil hétérogène de déficiences cognitives et linguistiques des LD, la cartographie de ces déficits cognitifs sous-jacents (DCSJ) serait différente pour chaque individu (Pennington et al., 2012; Peterson & Pennington, 2015). Cette hétérogénéité des DCSJ et déficits comportementaux de la lecture et de l'orthographe peut s'expliquer par l'interaction complexe entre les facteurs biologiques, cognitifs, comportementaux et environnementaux (Carrion-Castillo et al., 2013). Ainsi, le « *Multiple Deficit Model* » (Pennington, 2006) propose un cadre à quatre niveaux d'analyse interdépendants pour expliquer l'aspect multifactoriel de la dyslexie développementale : un niveau neurobiologique (Paulesu et al., 2014; Vandermosten et al., 2012), un niveau cognitif (Menghini et al., 2010; Saksida et al., 2016; Zoubrinetzky et al., 2014), un niveau comportemental (McArthur et al., 2020) et un niveau environnemental (Fluss et al., 2009).

Dans la première section de ce chapitre, la *multifactorialité étiologique* est décrite à travers différents modèles de déficits de la DD, *le modèle à déficit unique, les modèles de déficits en cascade, et les modèles à déficits multiples*. La deuxième section décrit plus en détail *l'hétérogénéité sémiologique* avec les différents déficits cognitifs sous-jacents et les déficits comportementaux de la lecture et de l'orthographe. Dans la troisième section, nous abordons la *variabilité nosographique* liée aux différentes définitions et concepts de la DD et par conséquent à leur impact sur le diagnostic et la remédiation de la DD.

2.1. Multifactorialité étiologique

Les difficultés à isoler une cause possible de la DD sont très certainement en lien avec d'une part, l'effet de l'hétérogénéité des DCSJ sur les compétences en lecture et d'autre part, l'effet possible d'une sous-exposition à la lecture, effets qui entretiennent le dilemme corrélation versus causalité. Comme nous venons de l'évoquer dans le chapitre précédent, l'apprentissage de la lecture dépend de l'interaction des différents processus sensoriels et/ou

cognitifs spécifiques à la lecture, eux-mêmes dépendants en retour de l'exposition à la lecture. Actuellement, trois types de modèles théoriques, le *modèle à déficit unique*, le *modèle en cascades* et les *modèles à déficits multiples* rendent compte d'une *multifactorialité étiologique* de la DD.

Le modèle à déficit unique

Dans le modèle à déficit unique (Morton & Frith, 1995), la DD est causée par un seul déficit cognitif sous-jacent à un niveau de traitement supérieur. Le déficit de traitement le plus communément cité est le déficit phonologique considéré comme cause « essentielle » de la DD dans un certain nombre de langues alphabétiques (Ramus, 2003; M. Snowling, 1998; Wagner, 1986). D'après la théorie d'un déficit unique phonologique, le trouble d'apprentissage de la lecture est expliqué par un déficit cognitif spécifique dans le traitement des sons de la parole (Snowling, 2000) et/ou dans l'accès de leurs représentations (Ramus & Szenkovits, 2008). Le déficit de traitement phonologique peut s'exprimer de trois manières différentes en altérant (1) la capacité à manipuler les sons de la parole (conscience phonologique), (2) la capacité à récupérer les sons de la parole dans la mémoire à long terme (dénomination rapide automatisée), (3) et/ou dans la mémoire à court terme (répétition de pseudomots). Une étude de cas multiples (Saksida et al., 2016) comparant trois causes possibles d'une DD : un déficit phonologique, un déficit visuel (stress visuel) et une capacité d'attention visuelle réduite (empan visuo-attentionnel), confirme l'importance des déficits phonologiques alors qu'un déficit de traitement visuo-attentionnel jouerait un rôle mineur. Ces résultats en désaccord avec ceux de Zoubrinetzky et al. (2014) sont discutés, laissant le débat ouvert sur le choix des épreuves utilisées pour évaluer des déficits cognitifs sous-jacents phonologiques et visuo-attentionnels. Récemment, une étude analysant les réseaux de substance blanche confirme l'indépendance des circuits neuronaux correspondants au déficit de l'empan visuo-attentionnel

et au déficit phonologique (Liu et al., 2022). Cependant, les résultats étant corrélationnels, seule une étude longitudinale pourra préciser la nature étiologique du déficit de l'empan visuo-attentionnel.

D'un point de vue théorique, la principale limite du modèle à déficit phonologique unique, d'après Pennington (2006), était que l'approche neuropsychologique modulaire postulait que les troubles du développement neurologique seraient consécutifs à un déficit d'un module cognitif inné et localisé dans le cerveau (Morton & Frith, 1995). Dans le cas de la DD, le planum temporale et la partie postérieure du gyrus temporal supérieur sont les deux zones cérébrales impliquées dans le traitement de l'information auditive, et plus particulièrement dans le traitement des sons de la parole. Ces zones temporales supérieures gauches contribuent à l'identification (e.g., /p/ dans la syllabe /pa/) et à la discrimination (e.g., /p/et b/) des phonèmes. Cette approche modulaire « localisationniste » a été remise en question puisqu'elle ne tient pas compte de la dynamique développementale des zones cérébrales, ni de la spécialisation interactive de ces zones qui évoluent et changent au fil du développement. Comme l'a montré (Johnson, 2001), le développement d'un comportement chez l'enfant dépend de trois facteurs : la « maturation » d'une zone cérébrale spécifique, la « spécialisation interactive » ou « connectivité » de différentes zones cérébrales entre elles et « l'apprentissage d'habiletés ». Ainsi, les régions corticales temporales supérieures gauches impliquées dans le traitement des sons de la parole sont intégrées dans un réseau périsylvien gauche plus large incluant le gyrus frontal inférieur et le lobule pariétal inférieur. Ce réseau périsylvien gauche est lui-même intégré dans un vaste réseau de faisceaux de substance blanche reliant toutes les régions corticales impliquées dans la lecture (le faisceau arqué, le faisceau occipital inférieur et le faisceau longitudinal inférieur). Certaines études en tractographie montrent que la partie postérieure du faisceau arqué permet d'interconnecter l'aire cérébrale impliquée dans la reconnaissance de la forme visuelle des mots, *Visual Word Form Area-VWFA* (Cohen et al.,

2000; Dehaene et al., 2015a; Dehaene & Cohen, 2011) aux aires périsylviennes gauches impliquées dans le traitement du langage oral (Wandell et al., 2012). Cette connexion favoriserait la transmission plus rapide des informations entre les aires visuelles et les aires auditivo-verbales et par conséquent la construction des liens entre unités phonologiques et orthographiques indispensables à l'apprentissage de la lecture (de Schotten et al., 2014). L'apprentissage de la lecture requiert donc l'activation de ces régions corticales mais aussi des interactions entre ces différentes zones afin d'assurer la transmission d'informations visuelles, auditives, phonologiques, orthographiques et sémantiques.

D'un point de vue empirique, trois limites à l'hypothèse d'un déficit phonologique unique ont été évoquées par Pennington (2006). La première limite était que tous les LD ne présentent pas de déficit de traitement phonologique (Pennington et al., 2012; Valdois et al., 2011; Zoubrinetzky et al., 2014), tous les lecteurs présentant un déficit phonologique ne sont pas dyslexiques (Snowling, 2008) et aucun déficit unique ne peut expliquer tous les symptômes comportementaux de tous les sous-types de dyslexie (Ramus & Ahissar, 2012). La deuxième limite concerne le rôle de la cooccurrence des déficits phonologiques avec des troubles sensoriels, attentionnels et moteurs chez les lecteurs dyslexiques. Marqueurs potentiels ou caractéristiques fondamentaux de la dyslexie (Snowling, 2000), ces troubles sensoriels attentionnels et moteurs pourraient définir des sous-types de dyslexies. Par exemple, le dysfonctionnement moteur a été décrit dans un sous-groupe particulier de LD présentant également un TDAH (Wimmer et al., 1999). Ce qui nous amène à la troisième limite : l'hypothèse d'un déficit phonologique unique n'expliquerait pas la comorbidité entre la DD et d'autres troubles neurodéveloppementaux. Notamment, la comorbidité hétérotypique (i.e. comorbidité de deux troubles différents (par exemple, la DD et le TDAH) est caractérisée par des déficits cognitifs spécifiques à chacun des troubles et par un déficit cognitif partagé (Pennington, 2006) : le déficit de traitement phonologique pour la DD, le déficit d'inhibition

comportementale pour le TDAH et le déficit en vitesse de traitement pour la DD et le TDAH. Cette description cognitive s'accorde donc avec un chevauchement partiel des deux troubles sur le plan génétique (Gayán et al., 2005; Loo et al., 2004) et cognitif (Willcutt et al., 2005) et ne confirme pas l'indépendance des troubles prônée par le modèle à déficit unique (Pennington, 2006). De même, la comorbidité homotypique (deux troubles du langage) entre la DD et le trouble développemental du langage oral et/ou des sons de la parole est caractérisée par une étiologie génétique partiellement partagée (Smith et al., 2005; Stein et al., 2004). L'hypothèse d'un déficit unique phonologique commun, plus ou moins sévère ou de nature différente selon les études, ne permet pas d'expliquer pas totalement cette comorbidité entre la DD et le trouble développemental du langage (Bishop et al., 2016). Certains LD n'ont pas présenté de trouble développemental du langage à l'âge préscolaire et certains enfants ayant présenté un trouble développemental du langage ne développent pas un trouble du langage écrit. L'hypothèse de déficits multiples expliquerait ces différences par des facteurs de risque et de protection génétiques et cognitifs en partie partagés et en partie distincts. Ainsi, l'hétérogénéité cognitive de la DD peut s'expliquer par une interaction de plusieurs déficits cognitifs dont certains sont partagés avec d'autres troubles comorbides (Pennington, 2006).

En somme, comme le résume McGrath et al. (2020), l'approche modulaire neuropsychologique statique d'un modèle à déficit unique, inné et localisé dans le cerveau, ne tient pas compte de l'interaction avec les autres traitements cognitifs, ni de la plasticité cérébrale évoluant avec le développement et n'explique ni la comorbidité des troubles neurodéveloppementaux, ni la variabilité interindividuelle des profils neuropsychologiques.

Récemment, de nouvelles données anatomo-fonctionnelles mises en évidence dans une étude longitudinale chez des enfants LD, confirment qu'un déficit de l'organisation de la substance blanche au niveau du faisceau arqué gauche, impliqué dans le traitement

phonologique est présent chez les LD avant (5-6 ans) et tout au long de l'apprentissage de la lecture (7-8 ans et 9-10 ans) (Van Der Auwera et al., 2021).

Cependant, le déficit de traitement phonologique est lui-même hétérogène puisqu'il peut s'exprimer chez les LD, par des combinaisons différentes de déficits entre la dénomination rapide automatisée ou DRA (Norton & Wolf, 2012; Wolf, Bowers, et al., 2000) ; la mémoire verbale à court terme (pour une revue voir, Bishop & Snowling, 2004) et la conscience phonologique (Dandache et al., 2014; Pennington et al., 2012). Par exemple, Lehongre et al., (2011) mettent en évidence des profils phonologiques différents chez certains adultes LD. D'une part, des LD qui présentent plutôt des déficits dans la tâche de production phonologique (DRA) mais pas dans la tâche de réception phonologique (contrepèteries et répétition de pseudomots) et d'autre part des LD qui présentent plutôt le profil inverse. De même, d'après le modèle de *double déficit* de Wolf et Bowers (1999), les LD peuvent présenter un déficit unique soit de la DRA, soit phonologique ou une association des deux. Ces différents profils de déficit phonologique reflètent leur hétérogénéité et les trajectoires individuelles de compensation neuronale dans la DD (Wagner, 1986; Wolf et al., 2002). Enfin, rappelons que le déficit de la DRA décrit comme la conséquence d'un déficit d'accès aux représentations phonologiques, est également décrit comme la conséquence d'un déficit dans le traitement visuel ou auditif, dans le traitement sériel rapide des informations ou dans les processus exécutifs (Pecini et al., 2019). Considérée comme " un microcosme de la lecture " (Norton & Wolf, 2012) qui nécessite une intégration multimodale rapide et plusieurs processus neurologiques et cognitifs, la DRA implique la motricité oculaire, la reconnaissance perceptive, les déplacements de l'attention visuelle, la mémoire de travail, l'accès lexical et la planification articulatoire (Norton & Wolf, 2012). De plus, la relation entre la lecture et la DRA ne reste pas constante tout au long du développement (Protopapas et al., 2013). Enfin, les effets en « cascades » d'un déficit unique affecteraient des sous-composants distincts du système de

lecture de différentes manières, selon la gravité du déficit initial et des facteurs individuels de risque et de protection.

Résumé 1.4

Le modèle à déficit unique phonologique

Le déficit de traitement phonologique, cause essentielle de la DD, reste la fondation de nos connaissances actuelles et des interventions de remédiation. Trois types de tâches, la conscience phonologique, la dénomination rapide automatisée, la répétition de pseudomots, définissent différents profils cognitifs.

Cependant, ce modèle n'explique pas la variabilité des profils cognitifs incluant d'autres types de déficits sensoriels ou visuo-attentionnels, ni la comorbidité avec d'autres troubles neurodéveloppementaux.

Les modèles en cascades

À la différence du modèle à déficit unique, le déficit de traitement phonologique pourrait être la conséquence d'un déficit fondamental sensoriel auditif (Lehongre et al., 2011) ou visuel (Vidyasagar, 2019) ou d'un déficit non sensoriel plus général de l'apprentissage. En effet, de nombreuses études neuroscientifiques et psychophysiques sur les troubles de la lecture, décrivent : (1) un déficit fondamental central auditif ou visuel à l'origine la DD (Archer et al., 2020), (2) un déficit d'utilisation optimale des capacités sensorielles (Ramus & Ahissar, 2012), (3) un déficit plus général de la vitesse de traitement ou de l'apprentissage procédural ou statistique (Gabay et al., 2015; Nicolson & Fawcett, 2018; Vandermosten et al., 2019). Le déficit sensoriel de bas niveau engendre un déficit de traitement phonologique qui, à son tour, engendre un trouble d'apprentissage de la lecture. Cette succession de déficits interdépendants est illustrée par les « modèles en cascades » (O'Brien & Yeatman, 2021) qui supposent l'implication de ces déficits fondamentaux dans les troubles de la lecture.

Le déficit fondamental sensoriel

Un déficit central de bas niveau du traitement visuel (Stuart et al., 2006; Talcott et al., 2002) ou auditif (Hämäläinen et al., 2012; Noordenbos & Serniclaes, 2015) serait la cause du déficit de traitement phonologique qui à son tour entraînerait un trouble de la lecture. Les « modèles en cascades », par exemple la théorie du déficit de la voie magnocellulaire prônant un déficit d'attention visuo-spatiale (Vidyasagar, 2019) ou encore la théorie de l'échantillonnage temporel prônant un déficit de traitement auditif temporel (Goswami, 2015), pour ne citer que les plus célèbres, permettraient d'expliquer la multifactorialité étiologique de la DD. En effet, certains auteurs émettent l'hypothèse que chacun de ces deux « modèles en cascades » dont l'origine est certes, un dysfonctionnement neurobiologique unique, affecterait à la fois le traitement de l'information auditive et le traitement de l'information visuelle chez le LD (Archer et al., 2020; Hari & Renvall, 2001; Talcott et al., 2000).

Théorie du déficit de l'échantillonnage temporel

Le traitement de bas niveau de l'information auditive qui permet l'intégration de la parole, est sous tendu par un mécanisme cérébral de synchronisation des oscillations neuronales où les ondes sonores et les ondes cérébrales se mettent en phase au cours de l'encodage de la parole. Cette synchronisation entre les rythmes électriques neuronaux et les rythmes de la parole, appelée *alignement en phase* ou *entraînement neuronal*, est déclenchée par les temps de montée ou *rise time* (Goswami, 2015). Le *rise time* est la durée entre le début du son d'une syllabe et le moment où son amplitude maximale est atteinte et correspond à des variations d'intensité sonore (Goswami, 2019). Dans le signal de parole, chaque syllabe est un son modulé en amplitude, caractérisé par le *rise time* qui intègre des informations relativement lentes et concerne l'intensité (amplitude), plutôt que la hauteur (fréquence). La perception du *rise time* permet la perception des frontières syllabiques acoustiques dans les basses fréquences

delta (1-3 Hz) et *thêta* (4-7 Hz) à modulations temporelles lentes. Dans une activité d'écoute de la parole, les oscillations à modulations temporelles lentes *delta* et *thêta* régissent l'activité des bandes oscillatoires à modulations temporelles rapides *beta* (13-30 Hz) et *gamma* (25-60 Hz). Le rythme *delta* qui caractérise le traitement prosodique contrôle le rythme *thêta* qui caractérise la segmentation des syllabes environ toutes les 200 à 300 ms. Le rythme *thêta* contrôle le rythme *gamma* qui caractérise la segmentation des phonèmes environ toutes les 20 à 40 ms (Gross et al, 2013). Le cortex auditif droit est composé majoritairement de cellules de petite taille oscillant au rythme *thêta*, alors que le cortex auditif gauche contient majoritairement une proportion de grandes cellules oscillant dans la bande de fréquence *gamma*.

Un déficit des oscillations en phase des ondes neuronales dans les bandes de basses fréquences *delta* (1-4 Hz) et *thêta* (4-7 Hz) chez le LD a été décrit par Goswami (2011). « L'alignement en phase » altéré va ainsi perturber la perception du *rise time* et par conséquent la perception de l'accentuation des syllabes nécessaire à la perception du rythme syllabique de la parole. L'altération de la perception des modulations d'amplitude du signal de parole et les difficultés à s'appuyer sur les indices prosodiques de la parole perturberaient alors l'extraction de syllabes, entraveraient le développement de la conscience phonologique et secondairement l'apprentissage des règles graphème-phonème (Goswami et al., 2013). Plus les difficultés à percevoir le *rise time* sont importantes et plus les performances en lecture et en orthographe sont faibles (Thomson & Goswami, 2008). Ce modèle de déficit en cascades est nommé *Temporal Sampling Framework* ou théorie de l'échantillonnage temporel (Goswami, 2011). De nombreux travaux menés par Usha Goswami depuis de nombreuses années confirment la présence de liens neurocognitifs entre le *rise time*, le rythme, la conscience phonologique et les compétences en lecture. Des études confirment en effet que les LD présentent des réponses oscillatoires *delta* réduites ou absentes dans l'hémisphère droit par rapport aux témoins en

réponses à des stimuli vocaux (Keshavarzi et al., 2022; Molinaro et al., 2016; Power et al., 2013, 2016) et des réponses oscillatoires *delta* et *thêta* réduites en réponses à des stimuli non vocaux (Hämäläinen et al., 2012). Une diminution de la perception des fréquences des sons de la parole a également été identifiée chez les nouveau-nés à risque dont un des parents est dyslexique (Thiede et al., 2019).

Pourtant, d'autres travaux décrivent un déficit des oscillations en phase des ondes neuronales dans les bandes de hautes fréquences *gamma* faible (25-35 Hz) chez le LD, en lien avec le déficit de représentations ou d'accès aux représentations des unités phonémiques (Giraud & Poeppel, 2012). Certains jeunes adultes dyslexiques présentent des réponses oscillatoires *gamma* réduites à 30 Hz dans le cortex auditif gauche et des réponses anormalement fortes à 40 Hz dans le cortex auditif droit par rapport aux témoins soit en réponse à un bruit blanc, soit lors de la visualisation d'un film audio-visuel (Lehongre et al., 2011, 2013). Cette hypothèse d'un déficit des oscillations dans les bandes de hautes fréquences *gamma* est renforcée par les résultats d'une intervention par stimulation transcrânienne à courant alternatif chez les adultes dyslexiques (Marchesotti et al., 2020). Une stimulation de 30 Hz a ainsi permis d'augmenter l'activité oscillatoire du cortex auditif gauche, de diminuer celle du cortex auditif droit et de rétablir une dominance gauche pour la réponse oscillatoire. L'amélioration du traitement phonologique et de la précision de lecture mesurés immédiatement après l'intervention confirmerait le rôle causal du déficit de synchronisation des oscillations *gamma* faible (30 Hz) dans le traitement phonémique et la lecture (Marchesotti et al., 2020). Ces constatations sont tout à fait en accord avec un déficit des représentations phonologiques (Serniclaes et al., 2004; Vellutino et al., 2004) ou un déficit d'accès à ces représentations (Giraud & Ramus, 2013; Ramus & Ahissar, 2012; Ramus & Szenkovits, 2008).

Il semblerait que l'hypothèse d'un déficit d'un *alignement en phase* dans les bandes *delta* et *thêta* (Goswami, 2011; Van Hirtum et al., 2019) semble s'opposer à l'hypothèse d'un

déficit dans la bande de fréquence *gamma* (Lehongre et al., 2011, 2013; Lizarazu et al., 2015) chez le LD. En tentant de répliquer ces résultats contradictoires, une récente étude (Lizarazu et al., 2021) ne confirme pas globalement de différences significatives entre les normolecteurs et les LD dans toutes les bandes de fréquences. Cependant en analysant les corrélations croisées d'amplitude entre les stimuli sonores et les réponses cérébrales, les réponses des LD sont plus faibles pour les fréquences *gamma* dans l'hémisphère gauche et pour les fréquences *delta* dans l'hémisphère droit, mais seulement pour les réponses neuronales aux stimuli non vocaux. Les faiblesses méthodologiques de ce domaine de recherche (petite taille des échantillons, hétérogénéité des méthodes de mesures et d'analyse) et la difficulté pour mesurer des réponses neuronales en utilisant la parole, peuvent expliquer la difficulté à répliquer des résultats d'une étude à l'autre (Lizarazu et al, 2021).

De plus, le couplage à fréquence croisée des oscillations *thêta* à verrouillage de phase aux oscillations *gamma* (Gross et al., 2013; Lehongre et al., 2011, 2013; Lizarazu et al., 2015) pourrait lier le déficit de synchronisation neuronale observé chez les LD dans les fréquences rapides *gamma* au déficit observé pour les fréquences plus lentes (Goswami, 2011; Van Hirtum et al., 2019). Autre fait intéressant, les résultats de Lehongre et al. (2013) ont été obtenus dans une situation écologique d'écoute de la parole (film audio-visuel) où les informations sémantiques et visuelles (mouvements des lèvres) étaient également présentes et pouvaient améliorer le rapport signal/bruit. En effet, l'aspect multisensoriel du traitement auditif de la parole et par conséquent, plus tard, de la lecture (Goswami, 2015) reste omniprésent. Par exemple, il est intéressant de souligner que les informations rythmiques visuelles modulent automatiquement les oscillations auditives (Schroeder et al., 2008) et que les oscillations de la bande *delta* du cortex auditif régissent l'amplitude de la bande *bêta* du cortex moteur (Arnal et al, 2014). Il semblerait donc que le traitement primaire de l'information auditive soit étroitement lié aux traitements primaires visuels et moteurs. Ce qui nous amène au deuxième

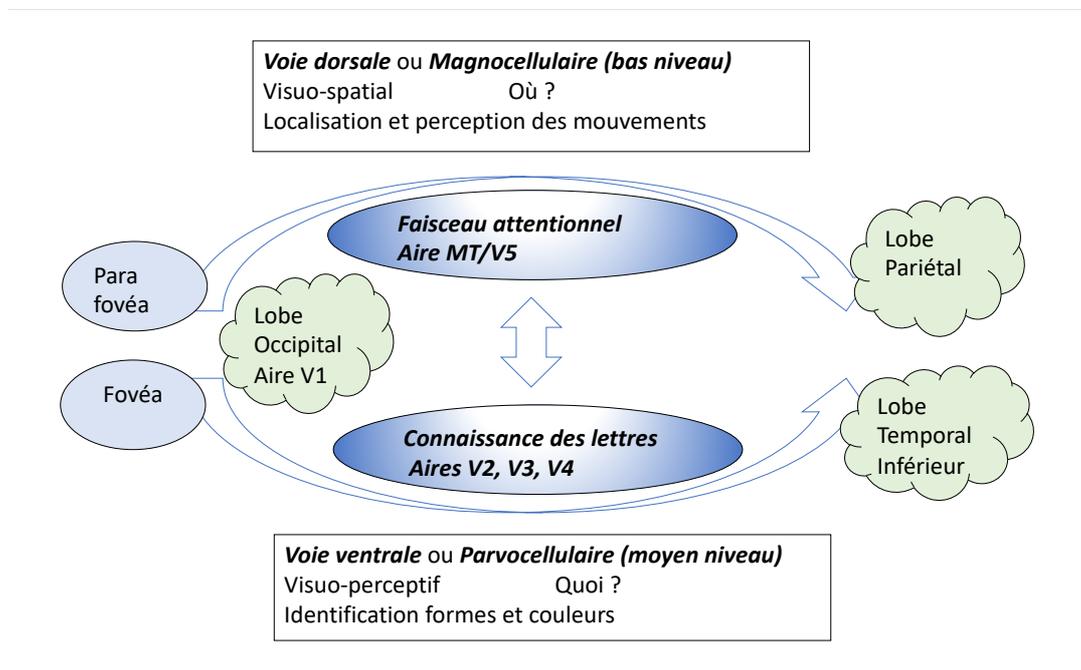
déficit fondamental sensoriel décrit dans la DD, le déficit du traitement visuel en lien avec l'hypothèse d'un déficit central magnocellulaire.

Théorie du déficit magnocellulaire dorsal

Le traitement de bas niveau de l'information visuelle qui permet la reconnaissance des lettres est sous-tendu par la voie visuelle dorsale magnocellulaire (MC). Alors que le système visuel parvocellulaire (PC) traite les informations visuelles stables en vision centrale (fovéale) pour permettre la reconnaissance des détails, de leur forme, couleur et texture, le système visuel MC traite les informations visuelles rapides, en vision périphérique (parafovéale) pour permettre la perception de stimuli de faible fréquence spatiale et de haute fréquence temporelle (clignotement) ou la perception de vitesse d'un mouvement. Pendant la lecture, la voie dorsale MC est impliquée dans le déplacement rapide du faisceau attentionnel (neurones MC rapides) qui permet d'encoder l'identité des lettres et leur position sérielle. Le déplacement séquentiel et rapide du faisceau attentionnel sur l'image du mot dans le cortex visuel permet le traitement des unités linguistiques (lettres, graphèmes, morphèmes, mots). Ces unités linguistiques sont ensuite adressées aux aires temporales de la voie ventrale PC qui permet le décodage des lettres en sons (Vidyasagar, 2005). L'analyse du mot écrit dépend donc initialement de capacités de recherche visuelle (cf. Figure 1.1). La voie ventrale PC impliquée dans la connaissance des lettres permet de transformer l'image visuelle rétinotopique formée sur l'aire visuelle primaire en une représentation orthographique plus abstraite grâce à un traitement spécifique spécialisé en lecture. Cette représentation orthographique (ou abstraction des codes graphémiques), indépendante de la casse et de la police, permet le développement de la conversion grapho-phonologique et le développement du lexique orthographique.

Figure 1.1

Voies visuelles parvocellulaire et magnocellulaire impliquées dans la lecture



Note. Le système visuel parvocellulaire traite les informations visuelles stables en vision centrale fovéale. Le système visuel magnocellulaire traite les informations visuelles rapides, en vision périphérique parafovéale.

L'hypothèse d'un déficit de la voie dorsale MC dans la DD altérerait le traitement visuel pendant la lecture (Stein, 2019). Plus précisément, le transfert ascendant rapide de l'information sensorielle visuelle vers le réseau d'attention visuo-spatiale essentiel à la lecture serait altéré (Vidyasagar & Pammer, 1999). Ainsi, certains LD présenteraient des déficits visuels de bas niveau tels qu'une déstabilisation de la fixation binoculaire nécessaire à la convergence des images traitées par les deux yeux, une altération des saccades oculaires entraînant la superposition d'images successives (Stein & Walsh, 1997) ou une altération du contrôle oculomoteur et de la perception du mouvement (Demb et al., 1998; Eden et al., 1996). Des déficits du traitement dorsal de haut niveau comme des difficultés de déplacement spatial et temporel de l'attention visuelle sont également décrits chez le LD et refléteraient une atteinte de la voie dorsale MC (Gori et al., 2016).

Mais, ce qui paraît particulièrement pertinent dans la perspective d'un lien possible entre les deux théories de déficits sensoriels, est que le déficit de traitement MC chez le LD serait amodal, autrement dit se manifesterait à la fois en modalité visuelle et auditive. En effet, l'intensité des déficits auditifs de bas niveau est corrélée à l'intensité des déficits visuels de bas niveau et ces déficits de traitement sont souvent associés aux déficits phonologiques (Cestnick & Coltheart, 1999). Le traitement MC visuel serait plus spécifiquement impliqué dans le développement des compétences orthographiques alors que le traitement MC auditif serait plus spécifiquement impliqué dans le développement des processus phonologiques chez des enfants normolecteurs (Talcott et al., 2000). L'atteinte du système MC auditif et visuel pourrait donc constituer une hypothèse explicative de la cooccurrence des déficits phonologiques et visuels chez le LD (Witton et al., 2002). En outre, à l'origine neurologique de la dyslexie, les premiers travaux neuropathologiques relevaient des anomalies structurelles du thalamus à la fois au niveau du noyau géniculé latéral du système magnocellulaire visuel et du noyau géniculé médian du système magnocellulaire auditif (Galaburda et al., 1994; Galaburda et al., 1985). Des études en neuro-imagerie ont également confirmé des liens spécifiques entre le traitement MC visuel et auditif et la lecture (Boets et al., 2008). Cependant, des études montrent que les déficiences sensorielles n'affectent qu'un sous-ensemble de dyslexique et que contrairement, à l'hypothèse MC amodale, seul un faible pourcentage de LD adultes universitaires présentent à la fois des déficits aux tâches de traitement des sons de la parole et de traitement visuel magnocellulaire (e.g., Ramus, 2003; White et al., 2006). Certains auteurs ont contesté l'origine magnocellulaire de la DD, en cherchant à démontrer que la plupart des adultes LD de leur échantillon présentaient des capacités perceptives altérées non spécifiques au déficit de traitement magnocellulaire (Amitay et al., 2002). D'autres auteurs ont mis en évidence une absence de déficits oculomoteurs et visuo-perceptifs chez les enfants LD (Hutzler et al., 2006).

Théorie d'un déficit central de traitement intermodal

Une autre hypothèse permettant d'expliquer les deux théories précédentes, celle d'un déficit de traitement magnocellulaire et celle d'un déficit de l'échantillonnage temporel de traitement de l'information auditive chez les LD, est l'hypothèse d'un déficit central de traitement intermodal (Archer et al., 2020). En effet, un verrouillage de phase instable aux fréquences nécessaires à l'échantillonnage et au traitement du texte écrit pourrait se produire dans le domaine visuel d'une manière similaire au cadre d'échantillonnage temporel auditif (Archer et al., 2020). D'après Vidyasagar (2019), le déficit des oscillations neuronales synchronisées décrit dans le déficit du traitement temporel auditif par Goswami (2015) pourrait également altérer le traitement temporel visuel.

Ainsi, les déficits de traitements visuels pour expliquer les troubles de la lecture pourraient être réinterprétés de deux manières. La première interprétation serait que le déficit du système visuel MC (instabilité oculaire) en lien avec un déficit de synchronie neuronale des oscillations *thêta* (González et al., 2016) serait ascendant, de type *bottom up* : l'instabilité du contrôle oculomoteur perturberait le rythme du déplacement oculaire pendant la lecture. Or, le déplacement oculaire est caractérisé par des fixations toutes les 255 ms et ces fixations correspondent à une synchronisation oscillatoire dans les fréquences *thêta* de 4 Hz (McLelland et al., 2016). La deuxième interprétation serait qu'un déficit de l'attention lors du traitement visuel du texte en lien avec un déficit de synchronisation des oscillations *gamma* faible (25-45 Hz) (Saalman et al., 2007) serait descendant, de type *top down* : l'altération de l'attention lors du traitement visuel du texte entraînerait un déficit de synchronisation des oscillations *gamma* faible qui, à leur tour, entraînerait un déficit de synchronisation sur une fréquence *thêta* des cellules MC (Hutcheon & Yarom, 2000; Vidyasagar, 2013). Fait intéressant allant dans le même sens, un déficit spécifique de synchronisation oscillatoire MC au niveau de la rétine, a été mis en évidence à des fréquences *gamma* chez le LD (Gori et al., 2014; Pammer &

Wheatley, 2001), les adultes analphabètes (Flint & Pammer, 2011), le prélecteur à risque de DD (Kevan & Pammer, 2008), et ce déficit est prédictif des performances en lecture chez les enfants dyslexiques (Gori et al., 2014).

Pour conclure, nous retenons trois hypothèses, émanant de la littérature : (1) la différence de traitement cognitif ascendant ou descendant pour expliquer les déficits visuels magnocellulaires, (2) le déficit de traitement magnocellulaire se manifestant à la fois en modalité visuelle et auditive, (3) un verrouillage de phase instable aux fréquences nécessaires à l'échantillonnage et au traitement du texte écrit pouvant se produire dans le domaine visuel d'une manière similaire au cadre d'échantillonnage temporel auditif (Archer et al., 2020). Ces hypothèses pourraient ainsi justifier certaines divergences théoriques. Notamment, l'interprétation d'une différence de traitement cognitif ascendant ou descendant pourrait expliquer les résultats contradictoires évoqués dans la théorie de l'échantillonnage temporel auditif entre un déficit impliquant les ondes *thêta* et un déficit impliquant les ondes *gamma*. De même, les hypothèses d'un traitement magnocellulaire amodal et d'un lien entre la théorie magnocellulaire et la théorie de l'échantillonnage temporel pourraient expliquer l'hétérogénéité des déficits cognitifs sous-jacents décrits dans la DD.

Nous constatons à travers la lecture de ces travaux que la nébuleuse opposition entre les origines auditives ou visuelles de la DD semble s'effacer très progressivement. En effet, une approche étiologique, sémiologique et thérapeutique multimodale se dessine dans le paysage de la littérature scientifique, plus en phase avec l'hétérogénéité des profils cognitifs sous-jacents décrits chez le LD. Enfin, l'hypothèse d'un déficit d'échantillonnage temporel auditif et visuel intermodal confirmerait la nécessité d'entraînements intermodaux dans la remédiation de la DD (Gori et al., 2014; Goswami, 2011; Hancock, Pugh, et al., 2017; Johnston et al., 2008; Kraus, 2012; Pammer, 2014; Stein, 2019; Vidyasagar, 2013; Vidyasagar, 2019).

Le déficit général non sensoriel

D'autres théories explicatives de la DD évoquent un déficit d'apprentissage et d'automatisation plus général, non sensoriel qui pourraient également expliquer les nombreuses comorbidités de la DD avec d'autres troubles neurodéveloppementaux. Ainsi, l'hypothèse de l'apprentissage statistique soutient qu'un déficit plus général perturbe la capacité à prendre une décision sur la base d'informations sensorielles. Après l'encodage de l'information, le déficit peut altérer la prise de décision et l'exécution motrice. Les informations sensorielles ne pouvant pas être utilisées efficacement, la sensibilité aux régularités du langage sera réduite et la correspondance grapho-phonémique altérée. Ce déficit non sensoriel de la prise de décision perceptive (Lieder et al., 2019) pourrait expliquer pourquoi des LD ont de faibles performances dans de nombreuses tâches psychophysiques (Ahissar, 2007; Nicolson & Fawcett, 2018). Par exemple, le déficit d'ancrage empêcherait les LD de bénéficier de l'effet de répétition de stimuli de référence au niveau perceptif (Ahissar, 2007; Ahissar et al., 2006) et de l'apprentissage répété de séquences de stimuli fréquents (Kimel et al., 2022).

Des déficits des fonctions exécutives sont également décrits pour expliquer la DD. La flexibilité mentale, la catégorisation, l'inhibition de la réponse, la planification peuvent être altérés chez certains LD (Reiter et al., 2005) et expliquer certains DCSJ à la lecture, comme le déficit de mémoire de travail phonologique (Barbosa et al., 2019). Une récente étude montre qu'entraîner le contrôle attentionnel et les fonctions exécutives impliqués dans la lecture, améliore les compétences en lecture de l'enfant normolecteur (Pasqualotto et al., 2022).

Des déficits dans les capacités d'apprentissage implicite et procédural caractérisés par un déficit d'automatisation des procédures en lien avec des dysfonctionnements cérébelleux ont également été décrits dans la DD (Nicolson et al., 2001; Nicolson & Fawcett, 2006; Vicari et al., 2005). Plus précisément le système neuronal qui sous-tend l'apprentissage procédural

incluant les zones linguistiques préfrontales, les noyaux gris centraux, les régions pariétales et cérébelleuses, serait altéré chez le LD (Nicolson & Fawcett, 2007). Ainsi, ce déficit d'apprentissage procédural altérerait à la fois les traitements cognitifs linguistiques, phonologiques, moteurs et visuels et par conséquent l'apprentissage de la lecture. Au-delà des difficultés de traitement auditif et visuel, certains enfants LD présentent des difficultés de motricité fine et d'équilibre mais aussi des difficultés d'articulation qui nécessitent des compétences verbales motrices et kinesthésiques (Fawcett & Nicolson, 1995; Nicolson & Fawcett, 1994). Ces difficultés motrices pourraient être en lien avec l'altération du traitement magnocellulaire (Stein, 2019).

Les modèles en cascades basés sur des causes uniques de la dyslexie, telles que la théorie du traitement auditif temporel ou la théorie magnocellulaire pourraient constituer une explication à la multiplicité des déficits décrits chez le LD. Un déficit unique à l'âge de 5 ans peut avoir des conséquences sur le développement des processus phonologiques, visuo-attentionnelles, orthographiques et sémantiques et devenir un déficit multiple à l'âge de 10 ans, d'où la nécessité de mener des études longitudinales (Goswami, 2015). Cependant, aucun déficit sensoriel ou cognitif unique ne peut expliquer tous les symptômes comportementaux de tous les LD (Ramus & Ahissar, 2012). Une autre explication fondée sur une apparition probabiliste des déficits selon quatre niveaux interdépendants a également été décrite par le Modèle à Déficits Multiples.

Résumé 1.5

Les modèles en cascades

Le déficit de traitement phonologique pourrait être la conséquence d'un déficit fondamental sensoriel auditif ou visuel. Le déficit des oscillations en phase des ondes neuronales (*delta* et/ou *gamma*) altère la perception du rythme de la parole et de l'extraction des syllabes et/ou des phonèmes qui altère à son tour la conscience phonologique et la lecture. Le déficit de la voie dorsale magnocellulaire altère l'identité et la position sérielle des lettres au cours du déplacement du faisceau attentionnel pendant la lecture et par conséquent altère la conscience phonologique et la lecture.

L'hypothèse d'un lien entre ces deux théories pouvant être interprétées en modalité visuelle et auditive et engendrer des déficits de traitement ascendants ou descendants, pourrait ainsi expliquer l'hétérogénéité des DCSJ chez les LD.

Un déficit non sensoriel plus général de l'apprentissage ou un déficit de la vitesse de traitement pourraient aussi expliquer les comorbidités de la DD avec les autres troubles neurodéveloppementaux.

Les modèles à déficits multiples

Le Multiple Deficit Model (MDM)

Afin d'expliquer l'occurrence des troubles neurodéveloppementaux comme la DD, Pennington (2006) a proposé un modèle à déficits multiples (MDM) qui inclut quatre niveaux d'analyse. Le niveau génétique implique l'interaction de nombreux facteurs de risque et de protection (gènes, environnements et interaction gène-environnement). Le niveau neuronal implique les mécanismes cérébraux altérés. Le niveau neuropsychologique implique les déficits cognitifs sous-jacents. Le niveau comportemental implique les symptômes comportementaux (déficits des compétences en lecture et en orthographe). Les 4 niveaux d'analyse sont interdépendants et s'influencent dans les deux sens soit par un traitement

bottom-up, soit par un traitement *top-down*. Au niveau génétique, de nombreux gènes agissent de manière probabiliste (i.e., la polygénicité), chacun n'ayant qu'un faible effet contributif sur l'étiologie de la dyslexie (Bishop, 2009). Une étiologie multifactorielle de la DD, a permis de proposer des modèles probabilistes de déficits cognitifs multiples où chaque facteur de risque n'est ni nécessaire ni suffisant pour expliquer le trouble de la lecture (Pennington, 2006). Le point le plus important de ce modèle multi-déficits est que la probabilité d'apparition d'une maladie neurodéveloppementale donnée est souvent continue et quantitative, plutôt que discrète et catégorielle. La différence entre le normal et le pathologique est envisagée comme un continuum avec un spectre de différentes atteintes cliniques ce qui implique que la définition d'un seuil pathologique d'un trouble apparaît arbitraire (Pennington, 2006) (cf. section sur la *variabilité nosographique*, p.81).

Dans le contexte de la dyslexie développementale, ces modèles à déficits multiples ont été très performants et ont représenté jusqu'à 75 à 85 % de la variance (McGrath et al., 2011; Peterson et al., 2017). Le MDM confirme ainsi l'existence de multiples facteurs de risques qui expliquent la variabilité interindividuelle des profils neuropsychologiques des LD et la prévalence importante d'une comorbidité de la DD avec d'autres troubles neurodéveloppementaux. Cette variabilité interindividuelle s'explique par la relation probabiliste et non déterministe entre chaque facteur de risque et le trouble neurodéveloppemental et par le fait que certains facteurs de risques sont partagés avec d'autres troubles comorbides. En effet, tous les déficits cognitifs identifiés jusqu'à présent sont des prédicteurs probabilistes et ne peuvent pas être considérés à eux seuls comme « essentiels ». Par exemple, le lien de causalité fort entre la conscience phonologique et les capacités de lecture (Hulme & Snowling, 2013) est remis en question par ce modèle avec une prévalence de 50 % des enfants LD sans déficit de la conscience phonologique (Pennington et al., 2012). En revanche, 25 % environ des LD présentent un déficit unique (Pennington et al., 2012), ce

qui n'exclut donc pas la possibilité d'un déficit unique dans la probabilité d'apparition des troubles. Pour illustrer la comorbidité, le modèle indique qu'une faiblesse de la vitesse de traitement contribue à la comorbidité entre DD et TDAH (McGrath et al., 2011; Peterson et al., 2017), alors qu'une faiblesse des compétences linguistiques contribue à la comorbidité entre dyslexie et dyscalculie (Peterson et al., 2017).

Pennington (2006) conclut que les modèles de déficits cognitifs multiples sont plus cohérents avec l'étiologie multifactorielle et probabiliste des troubles neurodéveloppementaux. Le MDM, basé sur une étiologie complexe et multifactorielle polygénique et environnementale, permet donc d'expliquer pourquoi les LD présentent des déficits cognitifs sous-jacents, multiples et individuels. En revanche, il reste encore à identifier les facteurs de risques à chaque niveau d'analyse du modèle (génétique, cérébral, neuropsychologique et comportemental) et à comprendre les connexions entre les quatre niveaux d'analyse du MDM. Dans une perspective de développement du MDM, Mc Grath et al. (2020) proposent d'y intégrer les différences de résilience à un trouble, expliquées en termes de facteurs de promotion et de protection (Haft et al., 2016). Les facteurs de promotion (i.e. l'identité ethnique, le soutien social, l'engagement prosocial) améliorent les résultats de manière égale pour tous les individus quel que soit le risque élevé ou faible de développer un trouble (Masten, 2011). Les facteurs de protection (i.e. la motricité fine précoce, le vocabulaire, l'estime de soi) jouent un rôle de protection plus fort chez les individus à risques élevé de développer un trouble que chez les individus à faible risque de développer un trouble (Masten, 2011). Par exemple, un enseignement approprié est un facteur de promotion pour les enfants qui ne sont pas à risque alors que c'est un facteur de protection pour les enfants à risque de développer un trouble d'apprentissage (Catts & Petscher, 2022). Une perspective intéressante serait alors d'intégrer au MDM les facteurs de protection et de nommer le modèle « Modèle à facteurs multiples » au lieu de « Modèle à déficits multiples » (McGrath et al., 2020).

Le modèle « multifactoriel » ou « additif »

Comme décrit dans la première section de ce chapitre, la lecture experte nécessite une communication rapide entre un réseau distribué de systèmes de traitement visuel, auditif et linguistique. Une déficience de l'un de ces systèmes, ou des connexions entre eux, entraînerait des difficultés à apprendre une compétence complexe comme la lecture (Wandell & Yeatman, 2013). Le modèle « multifactoriel » ou « additif » de (O'Brien & Yeatman, 2021) illustre bien le fait que d'une part, différents aspects des fonctions sensorielles, cognitives et linguistiques contribuent, chacun indépendamment, au développement de la lecture et que d'autre part, ces différents aspects constituent ainsi des facteurs de risque additifs au développement de la DD.

Plus précisément, ce modèle conceptualise la DD comme un trouble pouvant provenir de plusieurs loci distincts (position fixe d'un gène ou d'un marqueur génétique sur un chromosome), où chacun des facteurs sous-jacents phonologiques, visuels ou non sensoriels explique la variance unique des capacités de lecture des enfants (O'Brien & Yeatman, 2021). En effet, l'analyse de médiation et l'analyse factorielle sont toutes deux cohérentes avec la présence de plusieurs variables latentes distinctes qui se combinent de manière additive pour expliquer les compétences en lecture. Comme le MDM, le modèle « additif » contredit les affirmations selon lesquelles un seul mécanisme phonologique, visuel ou non sensoriel, peut être considéré comme le déficit « fondamental » ou « essentiel » de la dyslexie (O'Brien & Yeatman, 2021; Pennington, 2006).

Bien que les modèles multifactoriels ou additifs rendent compte des symptômes multiples issus des déficits cognitifs sous-jacents, il faut bien comprendre que ceux-ci ne sont pas nécessairement une cause directe des difficultés de lecture. Par exemple, (O'Brien & Yeatman, 2021) précisent que les différences dans le traitement du mouvement visuel qui prédisent une variance unique dans les compétences en lecture de certains LD ne signifient pas nécessairement qu'une mauvaise perception du mouvement visuel est la cause de leur difficulté

à lire. En revanche, les mesures de la performance des tâches peuvent être un indicateur de la fidélité avec laquelle le système visuel construit une représentation sensorielle d'un stimulus bruyant (Sperling et al., 2005, 2006), ou l'efficacité du transfert d'informations entre différentes régions visuelles (Yeatman et al., 2012, 2013), ou encore l'intégration des signaux sensoriels dans le temps (Joo et al., 2017). De plus chaque mauvaise performance sur une tâche donnée peut indiquer certes des déficits de la fonction ciblée mais peut aussi être la conséquence d'un déficit beaucoup plus large. Par exemple, de nombreux travaux mettent en évidence le rôle des compétences en vocabulaire dans le développement de la lecture (Catts et al., 2017; Snowling, 2008; Snowling & Melby-Lervåg, 2016). Ces compétences peuvent alors représenter un facteur de risque ou de protection dans le développement de l'apprentissage de la lecture, selon le profil cognitif et environnemental du lecteur.

Une théorie qui présente la DD comme un trouble déterminé par plusieurs DCSJ, eux-mêmes modulés par des facteurs de risque et de protection, semble donc être plus adaptée à l'hétérogénéité clinique que la théorie d'une seule cause sous-jacente de la dyslexie (McGrath et al., 2020; O'Brien & Yeatman, 2021). Les implications cliniques sont par conséquent évidentes dans la mesure où l'on admet que plusieurs déficits au sein des processus sensoriels, cognitifs et linguistiques sont des facteurs de risque distincts et additifs qui contribuent aux troubles de la lecture.

Résumé 1.6

Les modèles à déficits multiples

Le Modèle à Déficiets Multiples est fondé sur une étiologie complexe et multifactorielle où quatre niveaux d'analyse interdépendants (génétique, neurologique, cognitif et comportemental) s'influencent par un traitement ascendant et descendant. Ces multiples facteurs de risques expliquent ainsi pourquoi les LD présentent des déficits cognitifs sous-jacents, multiples et individuels et une comorbidité importante avec les autres troubles neurodéveloppementaux. La probabilité d'apparition de la DD est continue et quantitative, plutôt que discrète et catégorielle.

Le *modèle multifactoriel additif* explique la variabilité des profils cognitifs des LD par les déficits des processus sensoriels, cognitifs et linguistiques, des facteurs de risque distincts et additifs qui contribuent aux troubles de la lecture. Ces facteurs ne représentent pas spécifiquement des causes du trouble de la lecture mais renvoient à des dysfonctionnements plus larges de traitement ascendant ou descendant. Ainsi l'apparition du trouble de la lecture est sous l'influence de la présence de facteurs de risque ou de protection, variables individuellement.

La sous-exposition à la lecture

Si l'effet de l'hétérogénéité des DCSJ sur les compétences en lecture ne facilite pas la compréhension de la DD, il n'en reste pas moins vrai qu'une sous-exposition à la lecture peut aussi entretenir le dilemme corrélation versus causalité. La sous-exposition à la lecture est généralement mesurée par deux paramètres : l'exposition à la lecture de livres lus par les parents dans la petite enfance et le retard de développement de la lecture lors de la première année d'apprentissage. De nombreuses études se sont intéressées à évaluer l'impact de l'environnement familial sur l'acquisition du langage (particulièrement sur le développement du vocabulaire) et sur l'alphabétisation précoce des enfants avant leur scolarisation en école primaire (Lonigan et al., 2000; Sénéchal & LeFevre, 2002; Whitehurst & Lonigan, 1998).

Selon une méta-analyse (Scarborough & Dobrich, 1994), la fréquence de lectures partagées de livres lors des années préscolaires représenterait 7 % de la variance des compétences en lecture des enfants de la maternelle à la 3^e année primaire, et 7 % de la variance du développement du vocabulaire des enfants en âge préscolaire. Mais cette stimulation de compétences favorisant l'apprentissage de la lecture est fortement dépendante de l'environnement familial et particulièrement du niveau socio-économique (Roberts et al., 2005; Walberg & Ling Tsai, 1985).

De plus, les enfants qui apprennent à lire sans grande difficulté sont les plus à même de devenir de bons lecteurs, et donc de bénéficier d'une plus grande exposition aux mots écrits que les enfants souffrant de difficulté d'apprentissage de la lecture qui auront des risques de rester des faibles lecteurs tout au long de leur scolarité (Cunningham & Stanovich, 1997). Selon Anderson et al. (1988), le temps que passe un enfant à lire est lié à son niveau de lecture. Une étude américaine de Nagy & Anderson (1984) estime que les enfants les plus motivés dans des « classes moyennes » pourraient lire 100 000 mots par an, alors que les enfants de plus faible niveau de lecture, scolarisés dans la même classe, ne liraient que 1 000 mots. Au-delà d'une mesure d'efficacité d'une performance du nombre de mots lus par an, « un succès précoce dans l'acquisition de la lecture est l'une des clés qui déverrouille les habitudes de lecture de toute une vie » (Cunningham & Stanovich, 1997). Les lecteurs dyslexiques évitent la lecture et cet évitement déclenche « l'effet Matthieu » (Stanovich, 1986) d'après lequel "les riches deviennent plus riches et les pauvres plus pauvres". Cependant, le facteur de motivation à lire n'est pas seulement relié à un niveau de dysfonctionnement spécifique de la lecture, telle qu'une DD, mais également une fois de plus au contexte socio-économique et au niveau de scolarisation de la mère (Billard et al., 2008; Fluss et al., 2009; Noble et al., 2006). Cet aspect des facteurs environnementaux est donc fondamental à prendre en compte dans l'analyse des

résultats des études de remédiation évaluant des gains de compétences de lecture et des compétences reliées à la lecture.

L'effet de la sous-exposition à la lecture sur les DCSJ pourrait expliquer les difficultés à isoler une cause possible de la DD (Goswami, 2015). Apprendre à lire augmente la connectivité cérébrale fonctionnelle (Dehaene et al., 2015b; Skeide et al., 2017). Plus spécifiquement, l'accès aux représentations phonologiques (Araújo et al., 2019), l'attention visuo-spatiale (Kermani et al., 2018), ainsi qu'un ensemble de processus cognitifs (Dehaene, 2010) augmentent avec une activité de lecture efficiente, suggérant un effet neurodéveloppemental. Cet effet neurodéveloppemental de la lecture a été mis en évidence chez les adultes analphabètes qui améliorent leurs compétences phonologiques lorsqu'ils apprennent à lire. De même, une asymétrie de l'attention visuelle dans l'hémichamp visuel droit ou gauche a été montrée chez les lecteurs selon le sens de la lecture, de droite à gauche ou de gauche à droite (Kermani et al., 2018). Afin de pondérer cet effet de l'exposition de la lecture sur les processus cognitifs sous-jacents de la lecture, des études suggèrent de comparer le niveau de DCSJ des LD avec des NL ayant le même niveau de lecture (Sprenger-Charolles et al., 2009) et d'évaluer le développement cognitif et cérébral par des études longitudinales et des études interventionnelles (Goswami, 2015). Cependant, même si la lecture semble avoir un effet sur le développement cognitif et cérébral, cela n'exclut pas que les DCSJ, qu'ils soient phonologiques, visuo-attentionnels ou autres, puissent être à l'origine de la difficulté de lecture (Kermani et al., 2018).

Résumé 1.7

Multifactorialité étiologique de la dyslexie développementale

Parmi les multiples théories explicatives de la DD, le déficit de traitement phonologique, cause essentielle de la DD, reste la fondation de nos connaissances actuelles et des interventions de remédiation. Cependant, les théories impliquant un déficit sensoriel plus fondamental comme la théorie du traitement temporel auditif ou la théorie magnocellulaire visuelle sont également indispensables et nécessaires pour guider la recherche scientifique et les conduites de soin de la DD. Très certainement liées entre elles, ces théories impliqueraient des processus intermodaux en lien avec la cooccurrence des déficits phonologiques et visuels chez le lecteur dyslexique.

C'est dans ce contexte que les *modèles à déficits multiples et les modèles multifactoriels* ou *additifs*, fondés sur une étiologie multifactorielle de la DD, expliquent la variabilité des profils sémiologiques des LD modulés par des facteurs de risque et de protection et la comorbidité avec les autres troubles neurodéveloppementaux.

Concernant la sous-exposition à la lecture des LD, l'effet neurodéveloppemental de la lecture peut entraîner des conséquences sur les DCSJ mais cela n'exclut pas leur responsabilité dans le trouble de la lecture. Les facteurs environnementaux comme le niveau socio-économique et le niveau de scolarisation de la mère influencent la motivation à lire et les stimulations favorisant l'apprentissage de la lecture.

2.2. Hétérogénéité sémiologique

L'hypothèse de déficits multiples dans la dyslexie est très ancienne (e.g., (Mattis et al., 1975) et décrivait déjà des déficits phonologiques et visuels (Badian, 1997; Watson & Pitt, 1993). Cette théorie des déficits multiples est d'abord apparue avec l'hypothèse d'un continuum multivarié (Morris et al., 1998; Stanovich, 1988; Wolf & Bowers, 1999) puis avec l'hypothèse d'une interaction entre les multiples déficits (M. Snowling et al., 2000; M. J. Snowling, 2002) basée sur les modèles connexionnistes de lecture normale et altérée (Harm & Seidenberg, 1999; Plaut et al., 1996; Seidenberg & McClelland, 1989).

Plus récemment, avec les modèles à déficits multiples, la notion de facteurs de risque et de protection au niveau génétique et environnemental (Haft et al., 2016; McGrath et al., 2020; Pennington, 2006) a apporté une explication supplémentaire à la variabilité individuelle des LD. C'est cette grande variabilité individuelle des DCSJ et des symptômes comportementaux de la lecture et de l'orthographe, décrite dans la plupart des langues alphabétiques que nous nommerons *hétérogénéité sémiologique* dans le cadre de notre approche de remédiation de la DD.

Les déficits cognitifs sous-jacents

L'utilisation généralisée des statistiques au niveau d'un groupe de LD ne permet pas de rendre compte du nombre de LD présentant un ou des DCSJ parmi les compétences évaluées. Afin de confirmer les modèles à déficits multiples (O'Brien & Yeatman, 2021; Pennington, 2006), des études de cas multiples dans différentes langues opaques et transparentes ont été menées pour analyser les profils individuels cognitifs chez les LD à travers une batterie de tâches diverses pour évaluer les différents processus cognitifs sous-jacents.

Ainsi, une hétérogénéité sémiologique a été confirmée auprès de LD français (Saksida et al., 2016; Valdois et al., 2021; Ziegler et al., 2008; Zoubrinetzky et al., 2014), anglais (O'Brien & Yeatman, 2021; Ramus, 2003; White et al., 2006), italiens (Menghini et al., 2010), néerlandais (Boets et al., 2007), polonais (Dębska et al., 2022), allemand (Wimmer, 1993) et chinois (Ho et al., 2002). Afin de rendre compte des différences de prévalence et de nature des déficits, nous décrivons brièvement ces études de cas multiples dont la revue n'est pas exhaustive.

Une des premières études en français ayant illustré la présence de déficits multiples dans la DD est menée auprès de 24 LD et 24 NL âgés de 8 à 11 ans (Ziegler et al., 2008). Les tâches proposées visent à évaluer chaque composant du modèle DRC (Coltheart et al., 2001). Une tâche de recherche de lettres parmi cinq consonnes ou parmi un mot évalue la perception visuelle et l'accès au lexique orthographique. Une tâche de dénomination rapide d'images évalue l'accès au lexique phonologique. Une tâche de similitude phonologique évalue la correspondance graphème-phonème. Avec un critère de déficit équivalent à 1.65 écarts-types en dessous de la moyenne du groupe contrôle de NL, sur 24 LD, 5 enfants ont un triple déficit, 9 ont un double déficit, 6 ont un simple déficit et 4 n'ont pas de déficit. La majorité des enfants présentent un déficit phonologique, soit pour la tâche de similitude de phonèmes (80 %), soit pour la tâche de dénomination rapide d'images (70 %) mais ce déficit n'est pas isolé et souvent associé à un déficit de perception de lettres parmi cinq consonnes (40 %). Les auteurs soulignent que l'ampleur des déficits varie considérablement et que les troubles de la lecture ne peuvent être attribués à un seul DCSJ. De plus, en altérant les composants spécifiques du modèle DRC, proportionnellement aux résultats individuels des LD, les déficits en lecture simulés par le modèle sont très proches des déficits en lecture présentés par les LD.

Une autre étude (Zoubrinetzky et al., 2014), menée auprès de 71 LD français sélectionnés avec un profil de dyslexie mixte, d'âge moyen 10 ans 5 mois et des performances

inférieures à 1.65 écarts-types en dessous de la moyenne aux tâches d'empan visuo-attentionnel en report global et partiel et aux tâches d'analyse phonémique en précision sans prise en compte de la vitesse, montre une prévalence respective de 34 % pour les déficits de l'empan VA et 32 % pour les déficits phonologiques. Seulement 12 % des enfants présentent un double déficit à la fois phonologique et visuo-attentionnel et les 17 % restants ne montrent aucun de ces deux déficits cognitifs. Deux processus cognitifs phonologiques et visuo-attentionnels distincts et indépendants sont ainsi mis en évidence pour expliquer les troubles de la lecture. Cependant, il est intéressant de noter qu'aucun lien ne relie les processus cognitifs altérés phonologique et/ou visuo-attentionnel avec les procédures de lecture altérées sublexicale et/ou lexicale. À noter que dans cette étude, l'utilisation de matériel alphanumérique est justifiée par le fait que l'identification d'un caractère visuel inconnu nécessite des milliers d'expositions et que malgré une identification efficace d'un seul caractère, le traitement de plusieurs éléments à la fois n'est pas possible (Pelli et al., 2006; Shovman & Ahissar, 2006).

Une autre étude française (Saksida et al., 2016) similaire, menée auprès de 164 LD âgés de 8 à 13 ans, sans sélection de leur profil de lecture, évalue la prévalence de trois types de déficits cognitifs sous-jacents (phonologiques, visuo-attentionnels et stress visuel) à un seuil de pathologie équivalent à 1.5 écarts-type en dessous de la moyenne. La prévalence totale du déficit phonologique de 97,6 %, est calculée en associant les performances pathologiques aux tâches de DRA et d'analyse phonémique. Contrairement à l'étude précédente les mesures du traitement phonologique sont ici estimées en nombre de réponses correctes et en temps de réponse. La prévalence de la DRA est de 85 %, celle des autres processus phonologiques est de 92 % et celle du double déficit phonologique et DRA est de 79 %. La prévalence du déficit visuo-attentionnel n'est que de 29 % mais le calcul n'inclut pas ici les performances pathologiques à la tâche de report global, contrairement à la précédente étude (Zoubrinetzky et al., 2014). Cette étude met en évidence une prévalence de 50,5 % pour un déficit phonologique

unique, de 28,8 % pour le double déficit phonologique et visuo-attentionnel et aucune prévalence pour un déficit visuo-attentionnel unique. Ces résultats contradictoires s'expliquent par le type de mesures (précision/vitesse) et la sélection des variables (report partiel/report partiel) différents entre cette étude et celle de Saksida et al. (2016).

Élargissant le champ des processus évalués, une étude princeps paradigmatique (Ramus, 2003) menée auprès de 16 étudiants universitaires LD anglais, a évalué leurs performances aux tests phonologiques (DRA d'images et de chiffres, acronymes auditifs, répétition de pseudomots), auditifs (audition, masquage, discrimination et catégorisation de phonèmes, détection de fréquence, jugement d'ordre temporel des sons non verbaux), visuels (acuité, sensibilité au contraste, discrimination de vitesse, détection de mouvements cohérents) et cérébelleux (équilibre statique en double tâche, enfilage de perles, rotation pouce/index, tapotements, estimation de la durée de sons non verbaux). Les résultats révèlent que 100 % de ces étudiants présentent un déficit phonologique de base auquel s'associent d'autres troubles : auditifs (62 %), moteurs (25 %) et visuels (12 %). Les déficits moteurs sont constatés en absence de trouble déficitaire de l'attention comorbide. Le faible effectif, le sexe ratio, l'âge et le niveau académique élevé peuvent cependant biaiser ces résultats.

Pour répondre à ces limites, une étude similaire a été répliquée chez 23 LD anglais âgés de 8 à 12 ans (White et al., 2006). Les auteurs concluent, comme dans l'étude précédente de Ramus et al. (2003), que les déficiences sensorielles et motrices n'affectent qu'un sous-ensemble de LD et ne peuvent expliquer à elles seules le déficit phonologique et le trouble de la lecture. Cependant, 52 % des LD présentent un déficit aux tâches impliquant des processus phonologiques (rimes, acronymes auditifs, lecture de pseudo-mots, DRA, fluence phonologique et sémantique, mesurés en précision), 26 % un déficit aux tâches impliquant des traitements auditifs (détection de sons purs et de modulation de fréquence, catégorisation phonémique, discrimination de formants), 43 % un déficit dans les tâches impliquant un

traitement visuel (cohérence de mouvements et de formes, stress visuel), et 21 % un déficit dans les tâches impliquant un traitement moteur (enfilage de perles, dextérité digitale, tenir sur un pied, marcher pied à pied). De plus, 21 % des LD ne présentaient aucun déficit. Les déficiences auditives, visuelles et motrices affectent donc chacune entre 30 et 50 % des LD. Les auteurs soulignent qu'il est donc indispensable d'adapter les remédiations de la dyslexie individuellement en s'adaptant aux troubles présentés plutôt que de proposer une conduite de remédiation unique à tous les LD sans discernement. Si les hypothèses phonologique, magnocellulaire et cérébelleuse sont évaluées dans ces deux études, l'hypothèse de déficits attentionnels n'a pas été testée.

O'Brien et Yeatman (2020) ont mené deux études qui confirmeraient que plusieurs prédicteurs distincts et additifs (ou facteurs de risques) prédisent les compétences en lecture, selon le modèle à déficits multiples. La première étude impliquant 126 LD américains âgés de 5 à 17 ans et 119 NL appariés en âge et en QI non verbal, montrent qu'un modèle de déficit phonologique unique est insuffisant pour expliquer les troubles de la lecture. La deuxième étude évalue les processus phonologiques et visuels de 42 LD et 48 NL âgés de 8 à 12 ans, par des mesures psychophysiques de discrimination du mouvement au niveau du traitement sensoriel visuel (encodage) et par des mesures des temps de prise de décision perceptive au niveau de l'apprentissage statistique du traitement non sensoriel (planification) associées à des mesures standardisées du traitement phonologique (conscience phonologique et DRA), des compétences cognitives verbales (vocabulaire) et non verbales (raisonnement) auprès de 42 LD et 48 NL âgés de 8 à 12 ans. Les résultats montrent que les déficits des processus sensoriels visuels et les déficits des processus non sensoriels d'apprentissage perceptif peuvent être différents chez le même enfant et que ces déficits expliquent chacun une part de la variance des compétences en lecture indépendamment du traitement phonologique. Les auteurs proposent un mode de facteurs de risque additifs où plusieurs dimensions des processus

sensoriels, cognitifs et linguistiques contribuent à un risque distinct de difficulté de lecture (O'Brien & Yeatman, 2021).

L'étude menée par Menghini et al. (2010) met également en évidence une hétérogénéité des DCSJ chez 60 LD italiens d'âge moyen 11 ans 4 mois, en évaluant le traitement phonologique (fluidité phonologique, acronymes auditifs mesurés en précision et en vitesse et répétition de pseudomots), le traitement perceptif visuo-spatial (discrimination visuo-spatiale, rotation mentale), la perception de mouvement, le traitement attentionnel visuo-spatial et auditif (test de barrage et détection d'une cible auditive), le traitement exécutif (fluence sémantique, flexibilité mentale) et la capacité d'apprentissage de la mémoire implicite (mémoire procédurale). 76,6 % des enfants LD de cet échantillon présentent des troubles phonologiques associés à d'autres troubles cognitifs attentionnels, exécutifs et visuo-spatiaux alors qu'une faible prévalence d'enfants (18,3 %) présente uniquement un déficit phonologique. Par exemple, parmi les 76,6 % d'enfants présentant des troubles phonologiques, 16,6 % présentaient des déficits exécutifs, 13,3 % des déficits de perception visuo-spatiale, des déficits d'attention et exécutifs, 8,3 % (5/60) des déficits d'attention et de perception et 8,3 % des déficits d'attention et d'exécution. La déficience dans la plupart des domaines neuropsychologiques observés dans cette étude ne serait pas due à la relation entre les différentes variables cognitives mesurées puisque l'analyse multivariée des variables par un modèle linéaire généralisé a permis de tenir compte d'éventuelles corrélations réciproques entre les variables. Les auteurs concluent que la DD est un trouble complexe causé par des déficiences hétérogènes du fonctionnement neuropsychologique. Différents déficits cognitifs présents chez différents individus peuvent conduire à des capacités de lecture médiocres similaires, soutenant ainsi les modèles de déficits multiples de la DD (Pennington, 2006).

Par ailleurs, Boets et al. (2007) montrent la difficulté d'établir une relation causale entre les déficits de traitement auditif, phonologique et les compétences en lecture en évaluant des

enfants néerlandais à risque familial de développer une DD (n = 31) et des enfants sans risque familial (n = 31). Des tâches mesurant le traitement auditif de bas niveau (détections d'un silence dans un bruit blanc, d'une modulation de fréquence et d'impulsions de tonalité), la perception de la parole dans le bruit et la capacité phonologique (identité sonore, tâche de rime, répétition de pseudomots et DRA de couleurs) sont effectuées un an avant l'apprentissage de la lecture et un an après le début de cet apprentissage. Cette étude est particulièrement intéressante car elle souligne avec pertinence les différences d'interprétations des résultats selon une analyse des données soit au niveau du groupe, soit au niveau individuel. Au niveau du groupe, la détection d'une modulation de fréquence et le traitement phonologique apparaissent comme des facteurs causaux potentiels. Au niveau des données individuelles, cette causalité n'est pas confirmée puisque certains LD ne présentent pas de déficits de traitement temporel auditif ou phonologique. De façon réciproque, certains enfants sans trouble de la lecture présentent des déficits de traitement temporel auditif ou phonologique. Fait intéressant, les deux enfants sans trouble phonologique significatif présentaient les mesures les plus pathologiques dans la détection visuelle de mouvements cohérents (Boets et al., 2006), mesure sensible du traitement magnocellulaire visuel impliqué dans le développement des compétences ultérieures de lecture et d'orthographe (e.g., Stein, 2001). Cette analyse individuelle des résultats confirme la nécessité d'une analyse individuelle multifactorielle des DCSJ à la lecture. Les auteurs concluent que même si le déficit de traitement phonologique explique en grande partie le déficit développemental de la lecture, le déficit des traitements auditif et magnocellulaire visuel de certains enfants LD pourraient aggraver ou contribuer indépendamment au développement d'un trouble de la lecture.

Une récente étude de Dębska et al. (2022) a exploré les modèles individuels de déficits cognitifs de 51 lecteurs dyslexiques et 71 normolecteurs, de langue polonaise, âgés de 7 à 12 ans. Les tâches mesurent la conscience phonologique (fusion, segmentation et suppression

syllabiques et phonémiques), en dénomination rapide automatisée de couleurs et d'objet, en attention sélective, en empan visuo-attentionnel (report partiel et global de symboles graphiques), en perception du rythme, en comparaison de tonalités et en apprentissage implicite. Les résultats, selon un seuil pathologique de 1.65 écarts-types en dessous de la moyenne, révèlent une prédominance des déficits phonologiques (51 % en conscience phonologique et 26 % en DRA dont 14 % avec ces deux déficits conscience phonologique/DRA et une moindre prévalence des autres déficits : 13 % avec un déficit de l'apprentissage implicite, 7 % avec un déficit de l'empan visuo-attentionnel. Parmi les 77 % de LD présentant un déficit phonologique, 19 % ont un autre déficit associé. Cependant, comme dans l'étude précédente, alors que l'étude de groupe désigne les processus phonologiques comme principal prédicteur des compétences en lecture, l'étude de cas multiples montre que 37 % des LD ne présentent pas de déficits phonologiques en conscience phonologique ou en DRA et que 25 % des LD ne présentent aucun des déficits testés. Soulignons que les scores en vitesse pour les tâches de conscience phonologique et les scores en précision pour les tâches de DRA ne sont pas mentionnées et nous pouvons supposer qu'elles n'ont pas été mesurées, alors que ces mesures sont présentes dans d'autres études (e.g., Saksida et al., 2016). De plus, l'empan visuo-attentionnel est mesuré avec des symboles graphiques et non des lettres. Dans l'étude de Zoubrinetzky et al. (2014), l'utilisation de matériel alphanumérique est justifiée par le fait que l'identification d'un caractère visuel inconnu nécessite des milliers d'expositions et que malgré une identification efficace d'un seul caractère, le traitement de plusieurs éléments à la fois n'est pas possible (Pelli et al., 2006; Shovman & Ahissar, 2006). Les résultats de cette étude vont dans le sens de la théorie du double déficit (Wolf & Bowers, 1999) selon laquelle les deux déficits en DRA et en conscience phonologique seraient deux sources distinctes de difficultés de lecture et leur association provoquerait des déficits en lecture plus sévères. Cependant, le point le plus intéressant de cette

étude reste la comparaison de deux critères de seuils pathologiques en dessous de la moyenne, l'un à 1.65 écarts-types (déficit sévère) et l'autre à 1 écart-type (déficit modéré). Cette comparaison a permis de constater que 95 % des LD et un seul NL présentent à la fois des déficits modérés en DRA et en conscience phonologique alors que 61 % de LD et 39 % de NL présentent uniquement un déficit modéré en conscience phonologique et qu'un nombre égal de LD et de NL (n = 10) présentent un déficit modéré en DRA. Par conséquent, il est fort possible que des déficits multiples plus modérés puissent provoquer des troubles de la lecture et par conséquent que le critère de 1,65 écarts-types en dessous de la moyenne soit un seuil trop strict pour révéler l'influence de ces déficits sur les troubles de la lecture. De plus, un seul déficit sévère ou modéré n'entraîne pas nécessairement un trouble de la lecture. Cliniquement, il faudrait donc intervenir sur des déficits modérés s'ils sont multiples. De même, des déficits multiples avant l'apprentissage de la lecture pourraient prédire une DD.

Une autre étude menée auprès de 162 mauvais lecteurs (âge moyen : 12 ans) et 119 normolecteurs (âge moyen : 11 ans 8 mois) confirme l'hétérogénéité des DCSJ à un seuil de pathologie équivalent à 1.5 écarts-types en dessous de la moyenne sur la base des mêmes critères d'évaluation de l'empan visuo-attentionnel, de l'analyse phonémique et de la vitesse de DRA de chiffres (Valdois et al., 2021). Les compétences en conscience phonologique, en dénomination rapide automatisée et en empan visuo-attentionnel apparaissent comme des prédicteurs concurrents et indépendants des performances en lecture. De plus, cette étude a montré que parmi 110 LD âgés en moyenne de 12 ans, 20 % des LD présentaient un déficit unique de la conscience phonologique, 18 % présentaient un déficit unique de l'empan visuo-attentionnel et que 15 % présentaient un déficit unique de la dénomination rapide automatisée. Les autres LD présentaient soit un double déficit (41 %), soit aucun déficit (20 %), soit un triple déficit (4 %), confirmant la prévalence importante des multiples déficits chez le LD.

Si l'on synthétise les résultats de toutes ces études de cas multiples, la principale conclusion que l'on peut émettre est que différents DCSJ, de nature et d'intensité variable, coexistent chez différents LD et qu'il est nécessaire d'intervenir individuellement sur ces multiples déficits même s'ils sont modérés. Une analyse individuelle multifactorielle de ces DCSJ est donc indispensable, d'autant qu'ils conduisent à des profils de lecture similaire. Même si le déficit phonologique explique en grande partie le déficit développemental de la lecture, les déficits sensoriels, cognitifs et linguistiques contribuent indépendamment au trouble de la lecture ou peuvent l'aggraver. Enfin, il est intéressant de souligner que la plupart des mesures phonologiques incluent la DRA, processus cognitif complexe qui implique l'accès aux représentations phonologiques mais aussi d'autres processus cognitifs comme le traitement visuel, attentionnel ou exécutif.

Les troubles comportementaux de la lecture et de l'orthographe

À cette hétérogénéité des DCSJ s'associe également une hétérogénéité des déficits comportementaux de la lecture et de l'orthographe. L'hypothèse d'une variabilité des profils comportementaux de lecture est également très ancienne. Les premières tentatives de classifications des DD, « auditives » vs « visuelles » (Myklebust, 1965), « dysphonétique » vs « dyseidétique » (Boder, 1973), « P-types » vs « L-types » (Bakker & Vinke, 1985), « alphabétique » vs « orthographique » (Frith, 1985), « dyslexie développementale phonologique » vs « dyslexie développementale de surface » (Coltheart et al., 2001) ont introduit l'hypothèse de l'existence de deux profils de lecture dissociés. Ces profils de lecture sont classiquement identifiés par l'évaluation de deux procédures de lecture lexicale et sublexicale lors de la lecture de mots irréguliers et de pseudomots (Castles & Coltheart, 1993; Sprenger-Charolles et al., 2000, 2011). Une procédure de traitement lexical permet l'analyse globale du mot et l'activation des connaissances sur la forme orthographique puis

phonologique du mot. Dans le cas d'une procédure sublexicale, le traitement séquentiel du mot permet la conversion des graphèmes identifiés en phonèmes puis l'assemblage des phonèmes pour obtenir la forme phonologique globale du mot.

Pendant très longtemps, l'approche consensuelle, basée sur le modèle à double voie (Coltheart et al., 2001; Perry et al., 2010) déterminait principalement deux sous-types spécifiques de dyslexie : la dyslexie phonologique et la dyslexie de surface. Le phénotype de dyslexie phonologique se caractérise par un déficit plus marqué de la procédure sublexicale ou phonologique s'exprimant par des scores pathologiques en lecture de pseudo-mots, alors que le phénotype de dyslexie de surface se caractérise par un déficit plus marqué de la procédure lexicale ou orthographique s'exprimant par des scores pathologiques en la lecture de mots irréguliers (Castles & Coltheart, 1993; Sprenger-Charolles et al., 2000, 2011). Mise en évidence sur la base d'études menées auprès d'adultes cérébrolésés présentant une dyslexie acquise liée à une lésion cérébrale (Marshall & Newcombe, 1973), l'atteinte exclusive d'une procédure d'identification des mots écrits est très rare dans le cas de dyslexie développementale. Le plus souvent, le dysfonctionnement majeur d'une procédure est associé à un dysfonctionnement variable sur l'autre procédure (Share, 1995) et la variabilité interindividuelle est importante.

Des études de cas multiples (Castles & Coltheart, 1993; Sprenger-Charolles et al., 2000) ont permis de rendre compte de cette variabilité en classant les lecteurs dyslexiques en trois catégories selon qu'ils présentent un déficit uniquement aux tâches de lecture de pseudomots (dyslexie phonologique), uniquement aux tâches de lecture de mots irréguliers (dyslexie de surface) ou des déficits aux deux tâches (dyslexies mixtes). La prévalence de ces trois types de dyslexies varie considérablement en fonction de l'âge, de la langue, des mesures utilisées et des comparaisons à des normolecteurs de même âge chronologique ou de même âge de lecture. Par exemple, les profils phonologiques sont plus fréquents si l'on se réfère à des

normolecteurs de même niveau de lecture (Sprenger-Charolles et al., 2013). De plus, la plupart des études anglo-saxonnes qui évaluaient ces différences de performances en lecture de pseudomots et de mots irréguliers selon une méthode classique, le calculait sur la base de scores mesurés en précision et non pas en vitesse de lecture. Or lorsque, la précision et la vitesse de lecture sont mesurées, les profils mixtes deviennent majoritaires (Sprenger-Charolles et al., 2011), et plus spécifiquement dans les langues à orthographe transparente. Un autre problème majeur des classifications basées sur les profils de lecture est que ces profils ne sont pas stables dans le temps (Manis et Bailey, 2008).

Enfin, une prédominance des profils mixtes est mise en évidence chez la plupart des LD, comparés à des normolecteurs de même âge chronologique, en tenant compte des mesures évaluées en précision et en vitesse (Zoubrinetzky et al., 2014). La proportion des profils dissociés est donc très faible et la notion de sous-types apparaît fragile aussi bien chez l'enfant que chez l'adulte (Sprenger-Charolles et al., 2011).

Également basées sur le modèle à double voies, deux grandes catégories de dyslexies, périphériques et centrales, ont été définies par Friedmann & Coltheart (2018). Les dyslexies périphériques sont caractérisées par un déficit de traitement lors de la phase d'analyse orthographique-visuelle permettant de distinguer des dyslexies de position des lettres, attentionnelle, d'identification des lettres, visuelle. Les dyslexies centrales caractérisées par des déficits lors des étapes de traitements des procédures phonologique et orthographique telles que les dyslexies de surface, phonologique, des voyelles. Ainsi, en tenant compte des déficits dans chaque composante ou chaque connexion du modèle à double voie, ces auteurs ont différencié 10 sous-types de dyslexies, caractérisées par différents types d'erreurs.

L'hétérogénéité et la variabilité des profils de lecture et des profils cognitifs des LD est telle qu'il est difficile de comprendre comment et pourquoi un déficit d'identification du mot écrit évolue longitudinalement. Les modèles computationnels de lecture permettent de simuler

des trajectoires d'apprentissage individuelles et des résultats attendus des interventions de remédiation.

Vers une simulation informatique des profils sémiologiques individuels

Nous avons présenté dans la première partie de ce chapitre, des modélisations computationnelles de la lecture qui simulent l'intégration d'informations visuelles, orthographiques, phonologiques et sémantiques (Coltheart et al., 2001; Harm & Seidenberg, 1999, 2004; Perry et al., 2007, 2010; Plaut et al., 1996). Ces modèles peuvent également permettre de simuler des déficits potentiels en altérant un ou plusieurs composants du modèle afin d'en mesurer les conséquences sur les performances en lecture (Harm & Seidenberg, 1999; Woollams, 2014; Ziegler et al., 2008).

Afin de mieux comprendre l'hétérogénéité des DCSJ associée à la dyslexie développementale, des auteurs (Ziegler et al., 2019, 2020) ont récemment défini une approche de modélisation, qui consiste à simuler les différences individuelles des normolecteurs et des lecteurs dyslexiques. Ce modèle computationnel multi-déficits permet de comprendre comment des déficits présents au début du développement de la lecture pourraient affecter ce processus d'apprentissage dans des systèmes d'écriture alphabétique. Basé sur *la théorie de l'auto-apprentissage à décodage phonologique* (Share, 1995; Ziegler et al., 2014), ce modèle computationnel est capable d'apprendre 80 % des mots en anglais par un traitement connexionniste à double processus. À partir de 65 correspondances graphème-phonème implémentées dans le modèle, le réseau de décodage phonologique développe des représentations phonologiques et orthographiques de façon autonome. C'est la phase d'auto-apprentissage décrite dans le modèle développemental connexionniste d'apprentissage de la lecture (Ziegler et al., 2014). Les 20 % de mots restants, trop irréguliers pour être décodés

comme *yacht*, sont directement intégrés dans le composant *lexique orthographique* de ce modèle (Perry et al., 2019).

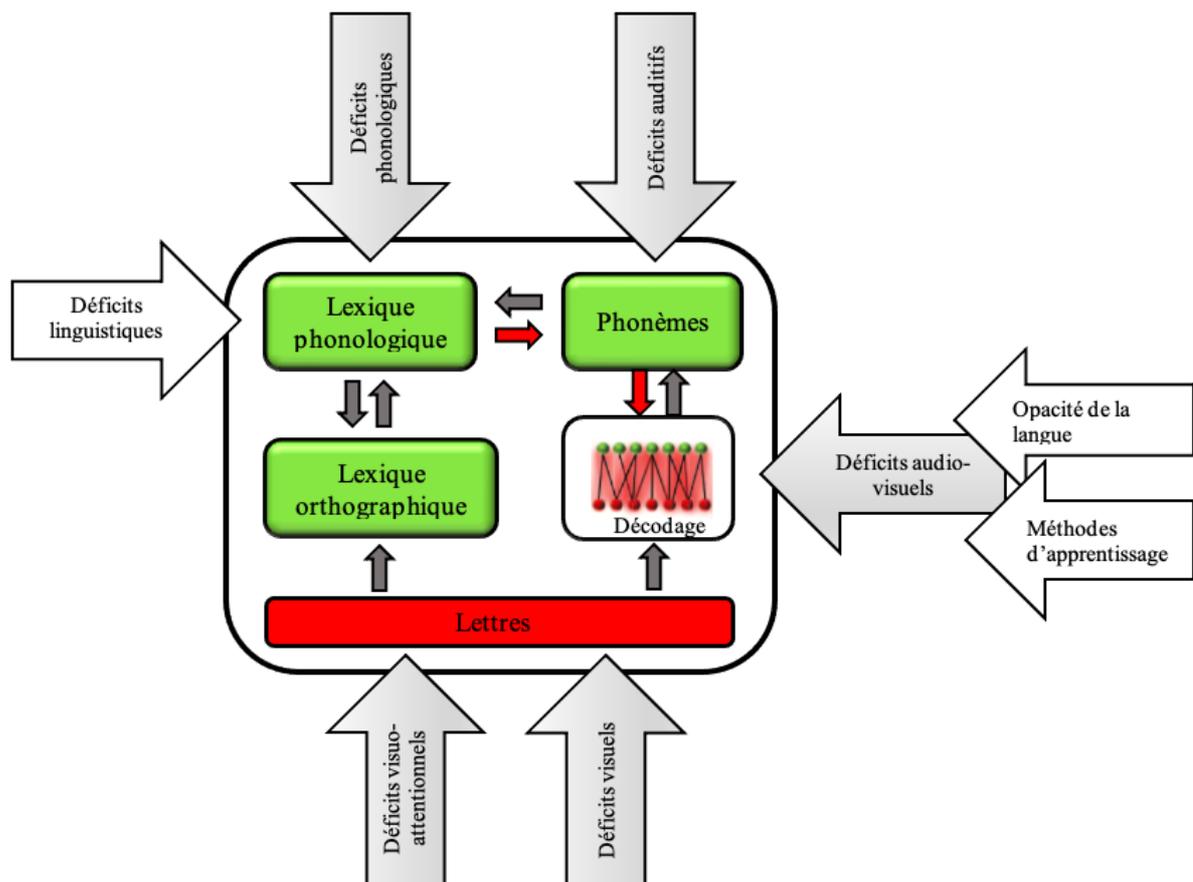
Les cinq composants du modèle, *les lettres, les phonèmes, un réseau de décodage phonologique (transformation des graphèmes en phonèmes), un lexique phonologique, et un lexique orthographique* (cf. Figure 1.2), peuvent être altérés indépendamment par trois types de déficits spécifiques décrits dans la DD afin d'altérer le processus d'apprentissage de la lecture. Par exemple, les déficits visuels (e.g., fixation binoculaire, saccades oculaires) et visuo-attentionnels (encombrement perceptif, empan visuo-attentionnel, attention visuo-spatiale) peuvent altérer le niveau de traitement *des lettres* dans leur identification et le codage de leur position. Les déficits auditifs (e.g., perception allophonique, traitement temporel auditif) et phonologiques (conscience phonémique, mémoire phonologique, dénomination rapide automatisée) peuvent altérer le traitement *des phonèmes* dans leur discrimination, le codage de leur position et l'accès aux représentations phonologiques dans *le lexique phonologique*. Les déficits de l'intégration audio-visuelle peuvent altérer *le réseau décodage phonologique*. Les composants du modèle peuvent aussi être altérés par des déficits non spécifiques à la DD. Par exemple, les déficits linguistiques (i.e., le vocabulaire) peuvent altérer l'accès au lexique phonologique. Ou encore, le degré d'opacité de la langue et/ou une méthode d'apprentissage globale peuvent altérer *le réseau de décodage phonologique*.

En simulant l'altération de trois composants (*phonèmes, lexique phonologique et lexique orthographique*) selon les performances individuelles d'un échantillon de 622 enfants anglophones dont 388 LD (Peterson et al., 2013), Perry et al (2019) ont obtenu une corrélation importante entre les prédictions du modèle et les scores en précision de la lecture de mots et de pseudo-mots. Plus précisément, en altérant un seul composant, le modèle de déficit phonologique (conscience phonologique, discrimination phonémique et perception catégorielle altérées) était le plus performant, suivi du modèle de déficit visuel (inversions de

lettres) et du modèle de bruit global (traitement global altéré). Cependant le modèle multi-déficits restait toujours le plus performant comparé aux modèles alternatifs n'affectant qu'un composant. Ainsi, ce modèle pourrait prédire les résultats d'une intervention sur un ou plusieurs composants et confirmer un lien causal entre le déficit et la lecture. Mais le plus important est qu'en simulant les différences individuelles, le modèle pourrait confirmer la nécessité d'intervenir différemment pour chaque individu sur plusieurs composants altérés en accord avec l'apparition probabiliste des DCSJ et de l'hétérogénéité des profils cognitifs soutenus par le modèle multi-déficits de Pennington (2006).

Figure 1.2

Phase d'auto-apprentissage du Modèle multi-déficits (adapté de Ziegler et al., 2020)



Note. Phase 1 : le réseau apprend les correspondances graphème-phonème de façon supervisée ; phase 2 : le réseau apprend à décoder les mots de façon non supervisée ; phase 3 : le réseau établit des représentations orthographiques des mots lus et renforce en retour la correspondance graphème-phonème et le décodage (flèches rouges). Déficiences spécifiques à la DD (flèches grises) et non spécifiques (flèches blanches) pouvant altérer les processus d'apprentissage de la lecture.

En définitive, il semble évident que la variabilité de la nature des déficits et de leur compensation doit être analysée de façon individuelle et longitudinale, compte tenu des profils cognitifs sous-jacents hétérogènes. Ainsi l'évaluation des DCSJ doit nécessairement définir un profil individuel cognitif en tenant compte de son évolution au cours du développement afin de cibler les déficits individuels par des remédiations. De même, l'évaluation des déficits en lecture et en orthographe permettra de définir des profils comportementaux individuels. Enfin, les données des modélisations interrogent sur le choix des seuils pathologiques et la nécessité de prendre en charge, particulièrement chez les enfants à risque d'apprentissage mais aussi chez les LD, les DCSJ même modérés lorsqu'ils sont multiples.

Résumé 1.8

Hétérogénéité sémiologique de la dyslexie développementale

Différents DCSJ, de nature et d'intensité variables, coexistent chez différents LD. Il est donc nécessaire d'intervenir individuellement sur ces multiples déficits même s'ils sont modérés. Une analyse individuelle multifactorielle de ces DCSJ est indispensable, d'autant qu'ils conduisent à des profils de lecture similaire. Même si le déficit phonologique explique en grande partie le déficit développemental de la lecture, les déficits sensoriels, cognitifs et linguistiques contribuent indépendamment au trouble de la lecture ou peuvent l'aggraver.

L'hétérogénéité des déficits comportementaux de la lecture et de l'orthographe confirmerait aussi que la DD ne peut pas s'exprimer comme un trouble unitaire et homogène mais serait plutôt interprétée comme « un modèle à risques multiples de phénotypes comportementaux complexes et variables » (Protopapas, 2014), soutenant ainsi les modèles de déficits multiples et multifactoriels de la DD.

Les modèles de lecture computationnels permettent actuellement de simuler des trajectoires d'apprentissage individuelles et de prédire les résultats attendus des interventions de remédiation en altérant les composants spécifiques du modèle (Ziegler et al., 2019, 2020).

2.3. Variabilité nosographique

À ce jour, les définitions, les critères diagnostiques et les classifications des DD sont toujours débattus. De plus, la frontière entre les troubles de la lecture des faibles lecteurs et ceux des LD est souvent difficile à tracer et n'a pas lieu d'être pour certains chercheurs qui vont jusqu'à remettre en cause le concept de spécificité de la dyslexie (Elliott, 2020; Elliott & Gibbs, 2008; Elliott & Grigorenko, 2014; Protopapas & Parrila, 2018). Cette question de consensus autour d'une terminologie diagnostique ne facilite pas les conduites cliniques en termes de décision de soin (diagnostic et remédiation).

Au-delà des divergences des classifications et des définitions, le choix des paramètres psychométriques pour évaluer les performances en lecture varie d'un clinicien à l'autre et induit des interprétations et des diagnostics différents. L'hétérogénéité des formations universitaires et post-universitaires influence aussi de manière inégale, voire contradictoire les pratiques cliniques des orthophonistes.

Ainsi à la variabilité inter et intra individuelle des déficits relevés chez le LD, s'ajoute une variabilité inter et intra-praticien qui augmente l'hétérogénéité dans le diagnostic et la remédiation cliniques. Après avoir analysé l'impact des divergences des critères diagnostiques des deux classifications internationales et l'impact des différentes définitions sur le diagnostic de DD, nous évoquons les « Recommandations de Bonne Pratique d'Évaluation, de Prévention et de Remédiation des troubles du langage écrit chez l'enfant et l'adulte », première étape d'une longue route pour homogénéiser les pratiques professionnelles en France.

Manuel diagnostique et statistique, DSM-5

Le DSM-5, *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders* (American Psychiatric Association, 2013), classe les troubles de la lecture, de l'expression écrite et du calcul dans les troubles spécifiques des apprentissages (TSA). Le TSA est défini comme « *un trouble neurodéveloppemental d'origine biologique qui entraîne des anomalies cognitives associées avec les symptômes comportementaux du trouble. L'origine biologique comprend une interaction de facteurs génétiques, épigénétiques et environnementaux qui affectent la capacité du cerveau à percevoir et à traiter les informations verbales et non verbales de manière précise et efficace* » (page 78). Cette classification permet d'établir un diagnostic selon la terminologie d'un « *trouble spécifique des apprentissages avec déficit de la lecture et/ou déficit de l'expression écrite* » qui inclut la présence d'au moins un des quatre symptômes suivants : l'exactitude et la fluence de la lecture des mots et/ou la compréhension de la lecture, et/ou l'exactitude orthographique des mots écrits et/ou l'organisation de l'expression écrite.

Soulignons que la nature du trouble de la compréhension de la lecture est probablement secondaire au trouble d'identification du mot écrit dans la mesure où le critère D exclut un trouble développemental du langage oral. Le manuel donne seulement un exemple « *(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)* », page 76. La « *dyslexie* » est définie comme un trouble d'apprentissage caractérisé par « *des difficultés dans la reconnaissance exacte et fluide des mots, un mauvais décodage et des difficultés en orthographe* », sans trouble de la compréhension de texte qui devra être spécifiée si elle est altérée (page 77).

Le terme de « *dyslexie* », « *une des manifestations les plus fréquentes du TSA* » apparaît ensuite entre parenthèses comme synonyme de « *difficultés à apprendre à élaborer des lettres avec les sons de sa propre élocution* », « *difficultés à lire des mots écrits* » (page 78) et de « *trouble de la lecture* » (page 83). Ainsi, les deux termes, *dyslexie* et *trouble spécifique des*

apprentissages avec déficit de la lecture et/ou déficit de l'expression écrite, coexistent et semblent renvoyer à la même définition du trouble.

L'anamnèse et l'évaluation du langage oral et écrit, conduite par l'orthophoniste ainsi que d'autres évaluations pédagogiques, médicales et psychologiques doivent réunir les quatre grands critères diagnostiques d'inclusion et de non-inclusion du DSM-5 très souvent cités (page 76), mais tenir compte surtout de leurs caractéristiques diagnostiques, moins citées, mais toutes aussi importantes (pages 78 à 80) car pondérées selon les caractéristiques cliniques de chaque patient. Le tableau 1.1 représente chaque critère diagnostique et ses caractéristiques correspondantes.

Tableau 1.1

Critères et caractéristiques diagnostiques du trouble spécifique des apprentissages avec déficit de la lecture et de l'expression écrite (DSM-5)

Critère A Persistence du trouble	Une difficulté à apprendre et à utiliser les compétences scolaires ou universitaires qui se manifeste par la persistance pendant au moins 6 mois d'au moins un des symptômes cliniques suivants : des difficultés de lecture de mots en précision ou en vitesse, des difficultés à épeler, des difficultés de compréhension écrite, d'expression écrite.
Caractéristiques diagnostiques	Cette difficulté est persistante malgré la mise en place d'aides pédagogiques ou d'aide aux devoirs ciblées sur les symptômes. « Par exemple, les difficultés à apprendre à lire des mots simples qui ne régressent pas complètement ou rapidement avec la mise en place d'un enseignement en compétences phonologiques ou en stratégies d'identification de mots peuvent indiquer un TSA » (page 79).
Critère B Performances altérées	Les compétences scolaires et universitaires sont nettement inférieures au niveau escompté pour l'âge chronologique du sujet ou peuvent se maintenir dans la moyenne attendue aux prix d'efforts et de soutien très intenses. Ces performances interfèrent de façon significative sur les performances scolaires, professionnelles et les activités de la vie courante.
Caractéristiques diagnostiques	Plus précisément, des performances se situant à au moins 1,5 écarts-types au-dessous de la moyenne de la population du même âge ou inférieures au 7 ^{ème} percentile d'au moins un test ou un sous-composant de test standardisé sont indiquées pour une plus grande certitude diagnostique. Cependant un seuil plus indulgent d'un écart-type au-dessous de la moyenne de la population peut être utilisé sur la base d'un jugement et d'une évaluation cliniques (page 79).
Critère C Apparition du trouble	Les difficultés d'apprentissage débutent au cours de la scolarité mais peuvent ne pas se manifester entièrement.
Caractéristiques diagnostiques	Elles apparaissent en général dès le début de la scolarité mais peuvent apparaître en fin de scolarité quand les demandes d'apprentissage ont augmenté et dépassent les capacités limitées du sujet, lors d'évaluation chronométrée ou de lecture d'un texte long et complexe (page 80).
Critère D Spécificité du trouble	Les difficultés d'apprentissage sont spécifiques ou « inattendues » quand elles ne sont pas dues à d'autres troubles sensoriels, cognitifs, neurologiques, moteurs, linguistiques ou à des contextes pédagogiques ou socio-économiques défavorisés, s'ils peuvent expliquer totalement le trouble de la lecture.
Caractéristiques diagnostiques	Le TSA affecte l'apprentissage chez des individus qui d'autre part présente des niveaux de fonctionnement normaux (note de QI supérieure à environ 70, plus ou moins 5 points). Un TSA peut survenir chez les individus identifiés comme étant intellectuellement « doués » qui vont maintenir un fonctionnement scolaire apparemment adéquat grâce à des stratégies compensatoires, un effort ou un soutien extraordinairement important, jusqu'à ce que les demandes d'apprentissage ou les procédures d'évaluation (par exemple tests chronométrés) imposent des barrières à la démonstration de leur apprentissage ou à l'accomplissement de tâches requises (page 80).

Le DSM-5 consacre également un chapitre sur les caractéristiques associées en faveur du diagnostic de TSA. Le diagnostic nécessite une évaluation clinique exhaustive fondée sur « la synthèse des antécédents médicaux, développementaux, éducatifs et familiaux de l'individu, l'histoire de la difficulté d'apprentissage, avec ses manifestations antérieures et

actuelles, l'impact de la difficulté sur le fonctionnement scolaire ou universitaire, professionnel ou social, les relevés scolaires antérieurs ou actuels, un recueil de travaux nécessitant des compétences scolaires ou universitaires, des évaluations reposant sur les programmes scolaires et des notes antérieures ou actuelles aux tests standardisés individuels de performances scolaires ou universitaires » (page 80). « Des performances médiocres aux tests psychologiques de traitement cognitif » sont évoquées mais l'évaluation de ces déficits de traitements cognitifs n'est pas requise pour l'évaluation diagnostique » pour deux raisons (p. 81). D'une part, « bien que les déficits associés à des difficultés à apprendre à lire des mots soient bien documentés, ceux associés avec d'autres manifestations du TSA (compréhension de la lecture, calcul arithmétique ou expression écrite) sont insuffisamment définis ou inconnus ». D'autre part, les déficits cognitifs sont variables chez les individus présentant des symptômes comportementaux et des scores de compétence similaires et « bon nombre de ces déficits de traitement sont aussi retrouvés dans d'autres troubles neuro-développementaux » (page 81). Cependant, dans le cas d'une suspicion d'un trouble intellectuel, sensoriel, neurologique ou moteur, « une évaluation exhaustive devra associer l'avis de professionnels ayant une expertise dans le TSA et une évaluation psychologique/cognitive » (page 80).

Un chapitre sur le développement et l'évolution du TSA (page 81 à 83) en fonction de l'âge indique les signes précurseurs avant la scolarisation et la variabilité des symptômes cliniques inter et intra individuelle au cours du développement. Des exemples très précis de symptômes sont décrits de l'âge préscolaire à l'âge adulte. Les DCSJ phonologiques spécifiques aux troubles de la lecture sont évoqués ici sous la forme de « problèmes pour reconnaître et manipuler des phonèmes » associés aux symptômes comportementaux en lecture, en orthographe et en compréhension écrite (page 82). Durant les années préscolaires, « un retard ou un trouble d'élocution ou de langage, ou un traitement cognitif altéré (par ex,

conscience phonologique, mémoire de travail et identification rapide de séries) prédisent un TSA de la lecture et de l'expression écrite ultérieur » (page 84).

Après un chapitre sur les questions diagnostiques liées à la culture et au genre, le diagnostic différentiel, les comorbidités et le retentissement fonctionnel du TSA sont également abordés. Les difficultés d'apprentissage dues uniquement à un enseignement insuffisant ou inadapté, à un handicap intellectuel, à des troubles neurologiques, sensoriels ou neurocognitifs, à un TDAH ou à des troubles psychotiques ne sont pas classifiées comme des troubles spécifiques d'apprentissage. Cependant, des comorbidités possibles avec un handicap intellectuel ou un TDAH ou d'autres troubles neurodéveloppementaux (e.g., trouble développemental du langage ou de la coordination) peuvent rendre difficile l'évaluation et le diagnostic différentiel (page 86). Par exemple, lorsque les difficultés d'apprentissage sont plus importantes que celles habituellement associées au handicap intellectuel, un diagnostic de trouble spécifique des apprentissages peut être posé, associé au diagnostic de handicap intellectuel (page 85). L'échec scolaire, un accès plus rare à l'enseignement supérieur, des niveaux élevés de détresse psychologique, une santé mentale globalement plus mauvaise, un risque accru d'idéation suicidaire et de tentatives de suicide, des taux plus élevés de chômage et d'emplois précaires et des revenus faibles peuvent être les nombreuses conséquences d'un trouble spécifique des apprentissages.

Pour conclure, le DSM-5 présente une définition plutôt écologique et complète d'un trouble spécifique de la lecture à travers des critères et des caractéristiques diagnostiques comportementaux précis, ainsi qu'une prise en compte de la variabilité inter et intra-individuelle des symptômes cliniques au cours du développement. En effet, le manuel énonce clairement que l'évaluation doit tenir compte de l'altération des performances, de la persistance, de l'apparition et de la spécificité du trouble (selon les critères A, B, C, D) mais aussi des stratégies compensatoires, des efforts et du soutien déployés, du niveau intellectuel

et cognitif, du contexte linguistique et culturel et des comorbidités (selon le jugement clinique). Fait intéressant, une intervention individualisée, systématique, intensive et fondée sur les preuves est recommandée pour « corriger, améliorer ou compenser » les difficultés d'apprentissage, face à une telle complexité diagnostique. (Page 84).

Classification internationale des maladies CIM-11

Comme dans le DSM-5, la onzième révision de *la Classification Internationale des Maladies* la CIM-11 (Organisation Mondiale de la Santé, 2022) classe les troubles de la lecture, de l'écriture et du calcul dans les troubles développementaux des apprentissages (TDA). Le TDA est défini comme un trouble neurodéveloppemental dont les manifestations comportementales et cognitives surviennent au cours du développement et impliquent des difficultés importantes dans l'acquisition et l'exécution de fonctions intellectuelles, motrices, langagières ou sociales spécifiques. L'étiologie présumée des troubles neurodéveloppementaux reste complexe et, dans de nombreux cas individuels, est inconnue.

Plus précisément, « *le TDA avec altération de la lecture se caractérise par des difficultés importantes et persistantes dans l'apprentissage des compétences académiques liées à la lecture, telles que la précision de la lecture de mots, la fluidité de la lecture et la compréhension de la lecture.* » Le TDA avec altération de l'expression écrite se caractérise « *par des difficultés importantes et persistantes liées à l'écriture, telles que la précision de l'orthographe, de la grammaire et de la ponctuation, ainsi que l'organisation et la cohérence des idées écrites* ».

La performance de l'individu en lecture doit être nettement inférieure à ce qui serait attendu pour l'âge chronologique mais aussi pour le niveau de fonctionnement intellectuel. Celui-ci est donc clairement désigné comme comparateur avec le niveau de lecture, alors que dans le DSM-5, la comparaison du niveau de lecture avec le niveau de fonctionnement

intellectuel n'apparaît pas dans les critères diagnostiques dans lesquels la comparaison se fait uniquement avec l'âge chronologique. Cependant, des extensions à ce critère sont mentionnées dans les caractéristiques diagnostiques « Les compétences scolaires et universitaires... peuvent se maintenir dans la moyenne attendue aux prix d'efforts et de soutien très intenses... un seuil plus indulgent d'un écart type au-dessous de la moyenne de la population peut être utilisé sur la base d'un jugement et d'une évaluation cliniques » (page 79). Plus particulièrement, le critère C explicite que les difficultés d'apprentissage peuvent apparaître plus tardivement, par exemple, « chez les individus identifiés comme étant intellectuellement « doués » quand les exigences scolaires dépassent les capacités altérées du sujet, lors d'évaluation chronométrée ou de lecture d'un texte long et complexe » (page 80).

Dans la CIM-11, comme dans le DSM-5, le fonctionnement scolaire et professionnel de l'individu est altéré de façon significative. Le TDA avec déficience en lecture n'est pas dû à un trouble du développement intellectuel, une déficience sensorielle, un trouble neurologique (ou moteur pour l'écriture), un manque de disponibilité de l'éducation, un manque de maîtrise de la langue d'enseignement scolaire ou une adversité psychosociale. Le seuil de diagnostic choisi pour que la difficulté devienne « significative » n'est pas mentionné, alors qu'il l'est dans le DSM-5. Enfin, la CIM-11 ne mentionne pas de différence entre les lecteurs avec ou sans trouble de compréhension écrite.

Impact des classifications sur la prévalence

Le choix d'une classification a une influence importante sur le diagnostic de DD et sa prévalence. En France, sur un échantillon de 25 000 élèves scolarisés en classe de sixième, la prévalence du trouble de la lecture, calculée sur des compétences de compréhension écrite uniquement (sans mesure de précision ou de vitesse en lecture), est de 3,5 % sur la base des critères diagnostiques de la CIM-11 et de 6,6 % sur la base des critères diagnostiques du

DSM-5, en utilisant un seuil raisonnable de sévérité de 1,5 écarts-types en dessous de la moyenne normative et un seuil d'interférence avec les performances scolaires de 0,5 écart-type. En faisant varier les seuils de diagnostics et d'interférence pour les deux classifications, les prévalences peuvent aller de 1,3 % à 17,2 % (pour plus de détails, voir l'étude épidémiologique de Di Folco et al., 2022).

Ainsi, selon cette étude épidémiologique, le seuil de divergence « QI-lecture » pourrait expliquer l'importante différence de prévalence entre la CIM-11 et le DSM-5. Cependant, cette différence a été établie sur la base d'une seule mesure de la lecture qui est la compréhension. Autre limite, la corrélation entre la compréhension en lecture et le QI est plus importante que la corrélation entre la précision et/ou la vitesse de lecture et le QI. Ceci pourrait avoir augmenté l'impact du critère de divergence QI-lecture. De plus, même si le critère de divergence QI-lecture n'apparaît pas dans les critères diagnostiques du DSM-5, le niveau intellectuel est pris en compte dans l'évaluation des déficits en lecture et en expression écrite.

Un autre résultat assez spectaculaire mis en évidence par cette étude (Di Folco et al., 2022) est l'impact du critère « interférence avec les résultats scolaires » sur la prévalence du trouble de la lecture qui passe de 4,8 % à 9,3 % si on le supprime du DSM-5. Certains LD parviennent à obtenir des performances scolaires au moins normales malgré leur déficit en lecture. Par exemple, les LD avec un haut potentiel intellectuel (HPI) présentent des compétences en lecture et en orthographe moins altérées que les LD non HPI mais plus altérées que les enfants normolecteurs non HPI. De même, les enfants HPI normolecteurs présentent des compétences en lecture et en orthographe supérieures aux enfants normolecteurs non HPI (Berninger & Abbott, 2013; van Viersen et al., 2016). Le diagnostic de DD chez les enfants HPI est donc plus difficile, d'autant que la précocité n'est pas toujours diagnostiquée. La prévalence d'enfants HPI présentant un TSA est de 3,75 % si l'on se réfère à un Indice d'Aptitude Générale ou IAG (qui correspond à un calcul du QI moins les scores en mémoire

de travail et en vitesse de traitement) supérieur à 130 et de 1 % si l'on se réfère au QI total inférieur à 130 (Toffalini et al., 2017). Ici encore, le degré d'expertise clinique du neuropsychologue et sa décision de prise en compte ou pas de l'IAG peuvent conduire à des diagnostics très différents. L'IAG est calculé à partir de la somme des six subtests principaux de compréhension verbale (ICV) et de raisonnement perceptif (IRP), les plus corrélés au facteur général d'intelligence. Les résultats scolaires devraient donc être interprétés selon le niveau intellectuel, mais aussi selon la quantité de travail fournie par l'enfant et le soutien dont il bénéficie. Autrement dit, le diagnostic de DD dépend d'un jugement clinique, comme indiqué dans le DSM-5 (cf. supra).

Cette étude épidémiologique et l'enquête PISA (2018) évoquée dans l'introduction de ce manuscrit (page 1) définissent un pourcentage de faibles lecteurs uniquement par une mesure de compréhension écrite. Parmi ces faibles lecteurs, sont inclus des LD sans trouble de compréhension orale ou tout du moins des performances relativement préservées en vocabulaire, et des faibles lecteurs avec un trouble de compréhension orale ou d'autres déficits non spécifiques au trouble d'identification des mots écrits.

Le diagnostic clinique de la dyslexie développementale

L'hétérogénéité des critères diagnostiques évoqués au sein des classifications internationales, ne facilite pas le diagnostic clinique pour différencier les lecteurs dyslexiques des faibles lecteurs ou des enfants présentant un trouble développemental du langage (TDL).

Le modèle Simple View of Reading

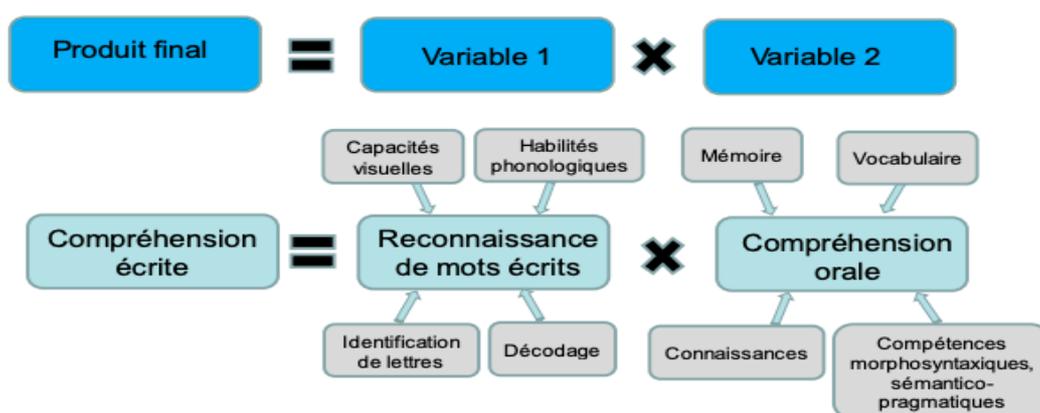
Selon le modèle *Simple View of Reading* de Gough & Tunmer (1986), la compréhension en lecture est le produit entre la capacité à reconnaître les mots écrits (i.e., l'identification des mots écrits) et la compréhension du langage oral. Ces deux composantes dépendent de leurs

compétences cognitives sous-jacentes (cf. Figure 1.3). Selon la combinaison de ces deux composantes, le modèle définit quatre catégories de lecteurs : les normolecteurs (identification et compréhension orale préservées), les LD (identification déficitaire et compréhension orale préservée), les faibles lecteurs (identification et compréhension orale déficitaires) et les hyperlexiques (identification relativement préservée et compréhension orale déficitaire). Ainsi, le modèle *Simple View of Reading* permet de différencier les LD sans trouble de compréhension orale, des faibles lecteurs avec un trouble de compréhension orale.

Les propositions de ce modèle permettent de dissocier les procédures de reconnaissance des mots écrits, des compétences du langage oral. Plus récemment, Sprenger-Charolles et Ziegler (2019), en accord avec le « *multi-deficit model* » (Perry et al., 2019 ; Ziegler et al., 2020) ont précisé les processus phonologiques et/ou visuels nécessaires au développement des procédures de reconnaissance des mots écrits (cf. Figure 1.3). Ces différentes propositions s’inscrivent dans le sens de déficits multifactoriels expliquant une dyslexie.

Figure 1.3

Le modèle Simple View of Reading de Gough & Tunmer (1986) d’après Sprenger-Charolles & Ziegler (2019)



Selon ce modèle, les LD sont donc caractérisés par un trouble d’identification des mots écrits qui concerne la fluence et/ou l’exactitude en lecture et se répercute sur l’orthographe des

mots, mais ne présentent théoriquement pas de trouble de la compréhension orale. Les difficultés de compréhension de lecture ne sont donc pas secondaires à un trouble de la compréhension orale mais secondaires au trouble de l'identification des mots écrit. Si la compréhension orale est altérée, et si le diagnostic de trouble développemental du langage (TDL) est confirmé, le trouble de la lecture n'est pas spécifique car consécutif, sur un continuum de trouble, au TDL, si celui-ci suffit à l'expliquer. Ce raisonnement d'un diagnostic différentiel, abordé mais non précisément détaillé dans le DSM-5, est applicable à tous les troubles neurodéveloppementaux pouvant être associés à un trouble de la lecture, comme un déficit de l'attention/hyperactivité (TDAH), un trouble développemental de la coordination ou un handicap intellectuel. Le diagnostic différentiel peut alors se faire en référence aux autres évaluations effectuées par des thérapeutes différents et spécialisés dans chaque TND (neuropsychologues, orthoptistes, ergothérapeutes, psychomotriciens) afin de préciser la spécificité du trouble d'apprentissage du langage écrit.

Ce diagnostic différentiel est complexe à poser cliniquement, et ce pour deux raisons. La première est la complexité des interactions entre le développement du langage oral, de l'identification des mots écrits et de la compréhension en lecture (Bianco, 2019). Généralement, un trouble de la compréhension du langage écrit évoque un trouble de la compréhension du langage oral (pour une revue : Snowling & Melby-Lervåg, 2016) mais ce lien ne semble pas exclusif et la relation entre le langage oral et écrit apparaît plus complexe. En effet, un retard dans le développement du langage oral sans déviance comportementale peut entraîner un déficit de compréhension en lecture (pour plus de détails, voir la méta-analyse de (Spencer & Wagner, 2018). Et inversement, un trouble initial de la compréhension orale n'entraîne pas systématiquement de trouble du langage écrit, que ce soit en identification ou en compréhension (Catts et al., 2012). De plus, le trouble d'identification des mots écrits définissant la DD peut avoir un impact sur le développement du vocabulaire et par conséquent

sur la compréhension écrite et orale. Seule une évaluation individuelle exhaustive du langage oral et du langage écrit peut permettre d'établir un diagnostic différentiel.

Or, ce qui nous amène à la deuxième raison pouvant expliquer la difficulté à établir ce diagnostic différentiel, est que la prise en compte d'un TDL est trop souvent tardive par une absence d'évaluation systématique d'évaluation des compétences de langage oral. Une enquête nationale de terrain menée en France (Helloin, 2019) relève que 31 % des orthophonistes n'évaluent que le langage écrit lorsque la plainte porte sur celui-ci, 45 % évaluent le langage oral et le langage écrit en un seul acte, et 6 % seulement jugent nécessaire de prévoir une deuxième prescription pour évaluer spécifiquement le langage oral (Helloin, 2019). Ceci pourrait, en partie, s'expliquer par les libellés des actes de soin orthophoniques (Nomenclature Générale des Actes Professionnels en France, UNCAM du 11 mars 2005²) qui associent les troubles du langage écrit, aux troubles de la communication sous les intitulés de « *bilan de la communication et du langage oral et / ou bilan d'aptitudes à l'acquisition de la communication et du langage écrit* », « *bilan de la communication et du langage écrit* », « *rééducation des troubles de la communication et du langage écrit* ». Cette association entre la prise en soin d'un trouble de la communication et d'un trouble du langage écrit présente deux inconvénients majeurs. Le premier est qu'elle peut rajouter du bruit à la complexité et la variabilité nosographique dans laquelle s'inscrit le diagnostic de DD. Le second est que la cotation de l'acte effectué représente une seule séance de bilan remboursée par la Caisse Primaire d'Assurance Maladie ce qui induit souvent la réalisation d'un seul bilan en pratique clinique. Or, effectuer un bilan du langage écrit et du langage oral dans la même séance est impossible. A titre indicatif, une heure environ est nécessaire pour évaluer toutes les compétences en lecture et en orthographe, une autre heure pour évaluer les déficits cognitifs sous-jacents phonologiques et visuo-attentionnels en lien avec la lecture et l'orthographe, une autre heure

² UNCAM (Union Nationale des Caisses d'Assurance Maladie)

encore pour évaluer les compétences linguistiques phonologiques, lexicales, morphosyntaxiques, pragmatiques et mnésiques. Ceci explique donc pourquoi, cette conduite de diagnostic différentiel soutenue par un jugement clinique, pourtant rappelé dans le DSM-5, n'est pas systématiquement menée.

Du choix des outils à celui des seuils pathologiques

Les difficultés à établir un diagnostic, qu'elles soient théoriques, méthodologiques ou économiques, sont aussi dépendantes de la variabilité du nombre de mesures psychométriques prises en compte par l'orthophoniste : scores en précision et/ou en vitesse de lecture et/ou score d'efficacité de la lecture de mots et/ou de textes signifiants et /ou de textes non signifiants et/ou score composite de toutes les mesures. De plus, le « seuil de déficit » appliqué, les critères d'inclusion et d'exclusion pris en compte, les tests utilisés, leur interprétation, l'expertise de l'orthophoniste dans la prise en charge de la DD ou le type de formations universitaires et post-universitaires participent aussi à cette variabilité. D'où parfois, des diagnostics différents pour le même enfant.

Homogénéiser les pratiques diagnostiques est donc d'une nécessité absolue pour obtenir une cohérence de soins et une communication des résultats entre les différents thérapeutes. Comment les institutions scolaires, les parents et les thérapeutes peuvent gérer un diagnostic contradictoire d'un même enfant ? En France, l'accès à la reconnaissance d'un handicap et aux aménagements pédagogiques est conditionné par le diagnostic d'un trouble spécifique du langage écrit en accord avec les classifications nosographiques et non par les besoins de l'enfant. Ils peuvent être refusés si le diagnostic ne mentionne pas le terme de trouble spécifique de la lecture ou celui de DD. Les enfants et les parents, très souvent déstabilisés et impuissants face aux difficultés ou à l'échec scolaire, ont aussi besoin d'informations et d'explications précises, donc d'un diagnostic précis et argumenté pour pouvoir reprendre

confiance en eux et envisager une perspective développementale de compensation ou de normalisation des troubles de la lecture. Les autres thérapeutes consultés (neuropsychologues, orthoptistes, psychologues, ergothérapeutes, psychomotriciens)³

Recommandations de soin de bonne pratique des troubles du langage écrit

Cette hétérogénéité des pratiques n'aide pas à optimiser le diagnostic et la prise en charge orthophonique de la DD, et encore moins ceux des troubles de la lecture en général. Franck Ramus énonçait récemment le caractère urgent de cette homogénéisation des pratiques : « Dans un souci de cohérence de la santé publique, on ne peut que souhaiter que les pratiques diagnostiques s'homogénéisent sur l'ensemble d'un pays, de manière à ce qu'un diagnostic de « trouble de la lecture » ou de « dyslexie » ait le même sens partout, et à minimiser les contradictions entre les diagnostics d'un même enfant par des cliniciens différents » (Ramus et al., 2021).

Pour favoriser l'homogénéisation des pratiques diagnostiques, le Collège Français d'Orthophonie a édité des « Recommandations de Bonne Pratique d'Évaluation, de Prévention et de Remédiation des troubles du langage écrit chez l'enfant et l'adulte » sous la responsabilité d'un groupe de pilotage et d'un groupe d'experts (Leloup et al., 2022). Ces recommandations se réfèrent à la classification internationale du DSM-5, et au « modèle simple vue de la lecture » de Gough et Tunmer (1986). Comme décrit précédemment, le DSM-5 permet de classer les lecteurs en difficulté selon que leur trouble de lecture est *spécifique* donc primaire, ou *non spécifique* donc secondaire à un ou des facteurs de complexité (bilinguisme, faible niveau de vocabulaire, adversité sociale, contextes pédagogiques ou socio-économiques défavorisés) ou secondaire à un ou des TND comorbides (TDAH, troubles de la communication, troubles

³ Haute Autorité de Santé (2017). *Améliorer le parcours de santé d'un enfant avec troubles spécifiques du langage et des apprentissages ?* https://www.has-sante.fr/jcms/c_2822893/fr/comment-ameliorer-le-parcours-de-sante-d-un-enfant-avec-troubles-specifiques-du-langage-et-des-apprentissages

moteurs, trouble du spectre de l'autisme ou handicap intellectuel), ou « non spécifié » lorsque le déterminisme du trouble de lecture ne peut être spécifié par un manque d'information. Dans le but d'améliorer les diagnostics cliniques sur le terrain et d'optimiser les remédiations, les recommandations de bonne pratique proposent de retenir quatre terminologies (cf Tableau 1.2).

Tableau 1.2

Terminologies des Recommandations de Bonnes Pratiques (Leloup et al., 2022)

Lecteurs dyslexiques	TSLE-sCO	Trouble Spécifique du Langage Ecrit sans déficit de la Compréhension Orale	Avec ou sans déficits intellectuel, perceptif, neurologique, psychosocial, linguistique ou pédagogique
Faibles lecteurs	TSLE-aCO	Trouble Spécifique du Langage Ecrit avec déficit de la Compréhension Orale	Avec ou sans comorbidités
	TLE	Trouble du Langage Ecrit	Secondaire à un déficit intellectuel, perceptif, neurologique, psychosocial, linguistique ou pédagogique ou à une comorbidité
	TDN non-spé	Trouble Neurodéveloppemental non spécifié	Informations insuffisantes

Ce choix terminologique permet de différencier les LD pour lesquels le trouble du langage écrit est spécifique sans trouble de la compréhension orale, des faibles lecteurs pour lesquels le trouble du langage écrit est spécifique donc primaire avec un déficit de la compréhension orale et des faibles lecteurs pour lesquels le trouble de la lecture n'est pas spécifique donc secondaire à une autre pathologie. Notre étude ne concernant que les LD, nous ne développerons pas plus ces critères (pour plus de détails, voir Leloup et al., 2022).

Résumé 1.9

Variabilité nosographique

La multifactorialité étiologique de la dyslexie développementale entraîne une hétérogénéité sémiologique. Cette hétérogénéité des symptômes ne facilite pas le diagnostic. De plus, dans un contexte où les critères diagnostiques et les classifications sont toujours débattus, ce que nous avons nommé variabilité nosographique, les conduites cliniques en termes de décision de soin sont très variables et induisent des interprétations et des diagnostics différents,

Pour homogénéiser les pratiques professionnelles en France, les « Recommandations de Bonne Pratique d'Évaluation, de Prévention et de Remédiation des troubles du langage écrit chez l'enfant et l'adulte » se réfèrent à la classification internationale des « troubles spécifiques des apprentissages avec déficit de la lecture ». et « avec déficit de l'expression écrite » du DSM-5, et au modèle *Simple View of Reading* de Gough et Tunmer (1986).

Chapitre 2. Les approches de remédiation de la dyslexie développementale

Selon les quatre niveaux d'analyse du modèle à déficits multiples, les interventions sur les troubles neurodéveloppementaux, peuvent s'effectuer aux niveaux génétique, neuronal, neuropsychologique ou comportemental. Pour répondre aux troubles de la lecture et de l'orthographe dans le contexte de la dyslexie neurodéveloppementale, au niveau génétique, une intervention précoce pourrait agir sur l'interaction entre les facteurs de risque et de protection environnementaux auprès des enfants à risque génétique de développer un trouble de la lecture. Au niveau neuronal, l'intervention pourrait agir plus directement sur la connectivité cérébrale par exemple, par des stimulations trans-crâniennes ou le biais du *neurofeedback*. Au niveau neuropsychologique, l'intervention pourrait cibler les déficits cognitifs sous-jacents (DCSJ) multifactoriels comme les déficits de traitement phonologique, auditif, visuel et/ou visuo-attentionnel. Au niveau comportemental, l'intervention pourrait cibler les déficits comportementaux de la lecture et de l'orthographe. Comme les quatre niveaux sont interdépendants et s'influencent dans les deux sens, intervenir sur un niveau influencera les autres niveaux.

De nombreux programmes d'intervention ciblent les DCSJ et/ou les déficits comportementaux de la lecture et de l'orthographe. Certains programmes d'intervention ne ciblent qu'un seul DCSJ tels que les programmes de remédiation des processus phonologiques (Pecini et al., 2019; Vander Stappen & Reybroeck, 2018; Williams, 1980; Wise et al., 1999; Yang et al., 2017), auditifs (Bhide et al., 2013; Cogo-Moreira et al., 2013; Habib et al., 2016; McArthur et al., 2008; Thomson et al., 2013; Van Hirtum et al., 2021), visuels (Bucci et al., 2018; Caldani et al., 2020; Chouake et al., 2012; Ebrahimi et al., 2019; Lawton, 2016; Solan et al., 2001), visuo-attentionnels (Franceschini, Bertoni, et al., 2017; Franceschini, Trevisan, et

al., 2017; Joo et al., 2018; Perea et al., 2012; Zorzi et al., 2012; Zoubrinetzky et al., 2019) ou intermodalitaire (i.e., audio-visuels) (Gonzalez et al., 2002; Kujala et al., 2001; Lassault et al., 2022; Magnan & Ecalle, 2006; Saine et al., 2011; Veillet et al., 2007). D'autres programmes de remédiation ont une action plus directe et proximale sur les déficits comportementaux de la lecture. Ces interventions proposent soit des entraînements spécifiques pour automatiser à la fois la procédure sublexicale (i.e., procédure de lecture graphophonologique ou décodage phonologique) et la procédure lexicale (i.e., procédure de lecture orthographique ou recodage lexical) (McArthur et al., 2015; Tilanus et al., 2019), soit des entraînements ayant une action uniquement sur la procédure sublexicale (Hatcher et al., 1994; Heikkilä et al., 2013) ou uniquement sur la procédure lexicale (Bogaerts et al., 2015; Horowitz-Kraus, Cicchino, et al., 2014; Leloup et al., 2021a; Stanké et al., 2021). Enfin, de nombreux programmes de remédiation agissent simultanément sur les procédures de lecture et leurs DCSJ, en proposant des entraînements qui ciblent les déficits phonologiques et les procédures de lecture, nommés *phonics instruction* (Torgesen et al., 2001; Wise et al., 2000) ou des entraînements qui ciblent les déficits auditifs et les procédures de lecture (Bonacina et al., 2015; Cancer et al., 2020) ou des entraînements qui ciblent les déficits visuels et les procédures de lecture (Facoetti et al., 2003; Lorusso et al., 2005).

La première section de ce chapitre est une réflexion sur des problématiques directement en lien avec notre protocole expérimental, autrement dit les principes généraux de la remédiation cognitive, les différentes stratégies de remédiation, leurs critères de validité, leurs limites et l'évaluation de l'efficacité d'une intervention. Dans une seconde section, nous tenterons de décrire différents programmes d'intervention ciblant les DCSJ, les procédures de lecture ou les deux à la fois. En considérant la quantité d'articles publiés dans ce domaine, l'extrême diversité de la nature des processus ciblés par ces interventions et l'extrême diversité de la méthodologie appliquée pour les évaluer, notre objectif n'est pas d'en faire une revue

systematique. Toutefois, il nous paraît nécessaire d'en souligner l'aspect pluri-componentiel afin de clarifier le paysage d'une littérature très dense et très complexe. Cette partie de notre réflexion est l'essence même de cette thèse dans la mesure où nous avons ainsi tenté de classer, décrire, comprendre différentes interventions scientifiques de remédiation de la DD mais surtout de mettre en lien ces méthodologies interventionnelles avec les aspects théoriques décrits dans le chapitre 1 afin de concevoir et justifier un protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle, cohérent, efficace et innovant, but ultime de ce travail de recherche.

1. Principes généraux de la remédiation cognitive

Avant d'aborder les principes généraux de la remédiation cognitive, il nous paraît indispensable de faire une clarification terminologique de ce concept. Plusieurs termes sont utilisés dans les Recommandations de Bonnes Pratiques des troubles du langage écrit : *traitement, intervention ou remédiation orthophonique* (Leloup et al., 2022), ainsi que dans la littérature scientifique : *rehabilitation, intensive instruction, training, remediation, instructional treatment, intervention, remedial training, remedial intervention, remedial instruction*. La nomenclature nationale des actes appliquée par les orthophonistes en France mentionne le terme de *rééducation des troubles de la communication et du langage écrit*.

Tous ces termes renvoient aux concepts de *remédiation* ou de *rééducation*, fréquemment employés par les cliniciens en France (Deforge, 2011). La *rééducation* des processus cognitifs représente les procédures mises en œuvre pour rétablir totalement ou partiellement une fonction en intégrant les dimensions de construction, d'éducation et d'apprentissage et en les réitérant pour les renforcer ou les rétablir (Peyroux & Seguin, 2018). La *remédiation* des processus cognitifs représente les procédures mises en œuvre pour réduire l'impact des troubles cognitifs dans la vie quotidienne en optimisant ou en améliorant le

fonctionnement cognitif, autrement dit en diminuant les déficits cognitifs et leurs conséquences fonctionnelles dans la vie quotidienne (Deforge, 2011).

Bien que les deux termes soient globalement équivalents dans leurs mises en œuvre, nous faisons le choix d'utiliser le terme de *remédiation cognitive* qui met le patient et son handicap au centre de préoccupations de soin, levier majeur du rétablissement, tout en soulignant l'importance des techniques de soin pour agir spécifiquement sur le déficit cognitif. Quelles sont alors les techniques de soin de la remédiation cognitive, ses critères de validité et ses limites et quelle méthodologie d'intervention appliquée pour évaluer l'efficacité d'une remédiation ?

1.1. Stratégies et techniques rééducatives

La remédiation cognitive vise, d'une part, à restaurer la fonction cognitive déficitaire, d'autre part, à mettre en place des stratégies alternatives de compensation pour permettre à l'individu de s'ajuster à son environnement. Ainsi, trois types de stratégies de remédiation peuvent interagir : la stratégie *curative* vise directement l'amélioration des fonctions cognitives déficitaires ; la stratégie *compensatoire* vise à optimiser des fonctions préservées ; la stratégie *adaptative* vise à aménager l'environnement (Seron & Van der Linden, 2016).

La remédiation cognitive curative

La stratégie curative a pour objectif la normalisation ou l'amélioration d'un ou plusieurs processus cognitifs sous-jacents identifiés comme déficitaires par l'évaluation initiale. Cette stratégie de remédiation est en lien avec une modélisation théorique de la lecture qui précise quels modules ou sous-composants du système de traitement de l'information vont être stimulés, entraînés, répétés. De type *Bottom Up*, cette stratégie curative vise à rétablir et à

automatiser le traitement d'informations de bas niveau sensoriel ou perceptif pour rétablir la fonction déficitaire, c'est-à-dire la lecture par le biais d'une réorganisation structurelle : par exemple, un programme de remédiation qui propose un entraînement des processus auditifs ou visuels altérés pour améliorer la lecture et l'orthographe.

Les effets d'une remédiation cognitive curative peuvent être directs ou indirects et renvoient à un objectif principal et à des objectifs secondaires. L'objectif principal vise l'amélioration d'un processus cognitif spécifique après un entraînement sur une tâche spécifique : l'effet de la remédiation est alors direct. Les objectifs secondaires visent l'amélioration de processus cognitifs non entraînés par *transfert proche* (tâches ou comportements similaires) ou *éloigné*, appelé aussi *généralisation* (tâches ou comportement éloignés) : l'effet de la remédiation est alors indirect. Par exemple, l'entraînement de la fusion de phonèmes a pour objectif principal d'améliorer la fusion de phonèmes (effet direct) et pour objectifs secondaires, d'améliorer la segmentation de phonèmes, la conscience phonémique par « *transfert proche* » et la lecture par « *généralisation* » (effet indirect). Venons-en à présent à la question de savoir quelles sont les techniques rééducatives qui fondent le socle de la remédiation cognitive curative ? Nous décrivons les techniques rééducatives suivantes : la spécificité de l'entraînement, la pratique intensive et répétée et l'apprentissage sans erreur.

La spécificité de l'entraînement est la caractéristique essentielle d'une remédiation cognitive curative pour atteindre son objectif principal qui est l'automatisation du processus cognitif entraîné. Par exemple, si le LD présente un déficit de l'empan visuo-attentionnel, la remédiation cible uniquement l'entraînement de tâches spécifiques afin d'augmenter l'empan visuo-attentionnel. L'objectif secondaire est d'obtenir une généralisation sur les compétences en lecture. La spécificité de l'entraînement dépend donc des déficits cognitifs propres à chaque individu. Il est recommandé d'entraîner un seul processus à la fois selon une modélisation théorique reliant le processus cognitif et la réponse comportementale, dans le but d'établir une

relation causale entre le processus cognitif entraîné et le déficit comportemental. Dans le contexte de la DD, plusieurs méta-analyses soulignent que l'entraînement à la conscience phonémique est fondamental à condition qu'il soit intensif et systématiquement associé à des entraînements de lecture (Bus & van IJzendoorn, 1999; Ehri et al., 2001; Galuschka et al., 2014). Il semblerait aussi que ce soit le cas pour les entraînements des processus auditifs, visuels et visuo-attentionnels (Cancer et al., 2020; Lorusso et al., 2011).

La pratique intensive et répétée d'une seule et même tâche est souvent utilisée dans les études menées auprès de lecteurs dyslexiques. Une durée de 10 à 20 minutes par jour, à une fréquence entre 3 à 5 fois par semaine, pendant un minimum de trois semaines, est recommandée pour augmenter l'efficacité d'un entraînement (Ehri et al., 2001; Melby-Lervåg et al., 2012; Suggate, 2016; Wanzek et al., 2016). À titre d'exemple, la durée moyenne d'intervention dans les essais cliniques randomisés rapportés dans la méta-analyse de Galuschka et al. (2014) est de 24 heures (4 séances de 40 minutes par semaine pendant 9 semaines). Cependant, dans la pratique clinique, ces résultats sont à adapter en fonction de la tâche, de l'objectif, de l'âge, de la motivation et de l'environnement pour maintenir l'engagement actif du patient.

L'apprentissage sans erreur permet au lecteur d'éviter de se tromper et de reproduire ses erreurs. D'après Rey et al. (2005), la production d'erreurs interfère négativement sur la mémorisation du mot écrit et le développement de l'orthographe. Au contraire, la recherche de mots « cachés » dans une grille avec les mots corrects écrits sur une liste (Stanké et al., 2016) et les entraînements de lecture répétée avec corrections immédiates des erreurs de lecture améliore le traitement orthographique (Leloup et al., 2021a).

De plus en plus récurrent, le recours à l'utilisation de supports numériques et de jeux vidéo dans la remédiation des troubles de la dyslexie développementale, optimise ces stratégies rééducatives. Notamment, la reproductibilité fidèle des tâches, la constance des stimuli auditifs

et visuels et le paramétrage précis des durées d'affichage favorisent la *spécificité de l'entraînement*. Par ailleurs, le contrôle des performances, de la progression et l'aspect ludique induisent l'engagement actif du patient et par conséquent le maintien d'une *pratique intensive et répétée*. De plus, le feed-back correctif favorise *l'apprentissage sans erreur*. Devenus incontournables et indispensables, ces outils numériques sont actuellement proposés aux enseignants, aux orthophonistes, aux enfants et aux parents pour optimiser l'apprentissage de la lecture, la remédiation des troubles de la lecture et la compensation de ces troubles (cf. Annexe 18, Harrar-Eskinazi et al., 2019). Outre l'amélioration d'un processus cognitif sous-jacent altéré pour restaurer la fonction déficitaire, la remédiation cognitive peut aussi optimiser un processus cognitif sous-jacent non altéré afin de compenser la fonction déficitaire par une stratégie dite compensatoire.

La remédiation cognitive compensatoire

La stratégie compensatoire ou stratégie alternative, a pour objectif l'optimisation d'un ou plusieurs processus cognitifs sous-jacents identifiés comme préservés, pour favoriser l'utilisation des procédures efficaces dans le but de compenser la fonction déficitaire et obtenir une réorganisation fonctionnelle. De type *Top Down*, cette stratégie vise à renforcer l'impact des représentations cognitives de haut niveau non altérées afin de rétablir les processus sensori-moteurs de bas niveau altérés. Fait intéressant, la combinaison des deux stratégies *Bottom up* et *Top down* serait plus efficace sur les compétences en lecture qu'une remédiation uniquement *Bottom up* ou uniquement *Top down* (Gustafson et al., 2011). La *métacognition*, *l'éducation thérapeutique* et le *renforcement positif* sont des stratégies compensatoires qui visent à favoriser les capacités d'autorégulation et la prise de conscience des difficultés afin de compenser la fonction déficitaire (Deforge, 2011).

La métacognition est définie comme un processus de compréhension de ses propres cognitions et de son propre fonctionnement sur lequel la personne peut exercer un contrôle (Snow, 2016). Cette stratégie favorise donc la prise de conscience des compétences préservées et des déficits et par conséquent, leur autorégulation. Considérons l'exemple de la conscience morphologique. Relativement préservée chez les LD en dépit du déficit de la conscience phonémique, la conscience morphologique peut s'avérer être un support facilitateur pour lire et orthographier les mots (Casalis et al., 2019; Cavalli et al., 2017). La prise de conscience des points forts et des points faibles constitue également un préalable essentiel au partage des objectifs de remédiation entre le clinicien et le patient, favorise l'alliance thérapeutique, ainsi que l'investissement du patient dans sa remédiation (Peyroux & Seguin, 2018).

L'éducation thérapeutique consiste à fournir au patient toutes les informations nécessaires sur la définition de la dyslexie développementale, son impact sur la lecture et l'orthographe et sa remédiation. Elle est essentielle pour favoriser la compréhension du soin et maintenir l'engagement et la motivation du patient. Cette éducation s'inscrit dans le cadre de la décision partagée, fondement d'une approche de soin centrée sur le patient ((Elwyn et al., 2012; Pomey et al., 2015).

Le renforcement positif systématique, comme les encouragements, les valorisations orales ou une récompense de la part du clinicien, sont des techniques définies dans les stratégies compensatoires mais aussi curatives. Le LD, confronté quotidiennement à l'échec dans le cadre scolaire, a besoin d'une revalorisation de son estime de soi pour s'engager avec confiance dans un partenariat de soin avec le clinicien.

La remédiation cognitive adaptative

La stratégie adaptative a recours aux aménagements de l'environnement et aux aides externes pour limiter les répercussions du ou des déficits cognitifs. Des aménagements

pédagogiques en milieu scolaire, comme le recours à la synthèse vocale de textes écrits pour maintenir l'appétence à la lecture ou à un correcteur orthographique numérique, à une dictée à « trous » pour diminuer les erreurs, peuvent réduire l'impact du trouble de l'apprentissage de la lecture. Récemment, une étude a montré que réduire la complexité d'un texte tout en conservant son sens, peut améliorer la fluidité et la compréhension de la lecture chez les enfants qui apprennent à lire, et plus particulièrement chez ceux exposés à des difficultés d'apprentissage de la lecture (Javourey-Drevet et al., 2022).

Toutefois, ces outils d'aide à la lecture et à la production écrite ne doivent pas être appliqués de façon systématique et comme pour les interventions curatives et compensatoires, être adaptés individuellement en les justifiant par une analyse précise du rapport coût/bénéfice (Peterson-Karlan, 2011). Tel est le cas, par exemple, de la lecture d'un texte sur un livre électronique qui entraverait certains aspects de la compréhension chez les adultes LD, comparée à la lecture traditionnelle d'un livre imprimé (Cavalli et al., 2019). De plus, une aide inadaptée peut maintenir un LD dans une situation de dépendance et inhiber une évolution vers des conduites autonomes de lecture. Cette stratégie adaptative est donc une réponse thérapeutique non systématique, soit à court terme pour diminuer le coût cognitif d'un trouble d'apprentissage du langage écrit, soit à plus long terme pour répondre à une persistance de ce trouble.

Dans le contexte d'une dyslexie développementale, ces trois stratégies sont donc à appliquer individuellement en fonction de la nature et de la sévérité des déficits cognitifs sous-jacents (stratégie curative), de la présence de facteurs de risques et de protection (stratégie compensatoire) et de l'impact du trouble de la lecture dans la vie quotidienne (stratégie adaptative). Le protocole de remédiation doit aussi élaborer des objectifs cohérents selon l'âge et le développement de l'enfant, ce qui nécessite de connaître le développement typique des fonctions cognitives. Considérons, par exemple, l'amélioration de l'analyse phonémique chez un LD. Il est recommandé que les mots entraînés ne dépassent pas 4 phonèmes à l'âge de 7 ans

alors qu'à 8 ans, les mots peuvent contenir jusqu'à 7 phonèmes. De même, définir une zone d'apprentissage possible où l'enfant peut progresser uniquement avec l'aide d'un adulte puis sans aide, s'avère très utile pour atteindre les objectifs de remédiation (Brossard, 2004). Cette notion d'étayage est très importante et devrait être appliquée même pour les entraînements informatisés à réaliser à domicile. En effet, l'étayage d'un adulte lors d'un entraînement augmente les gains obtenus après une intervention (McTigue et al., 2020).

Validité et limites de la remédiation cognitive

Lors de l'élaboration d'un protocole de remédiation cognitive, des critères de validité et des limites sont à prendre en compte. Classiquement, cinq critères de validité sont décrits (Hogan et al., 2017). La *validité de contenu* est la relation entre le contenu d'un outil et le processus cognitif visé. Il s'agit de choisir un outil dont les tâches sont spécifiquement conçues pour améliorer un processus cognitif, ce qui implique une connaissance parfaite du domaine visé et la prise en compte des données probantes dans la validation de l'outil. Tel est le cas, par exemple, de l'utilisation du logiciel *Maeva* (Lobier, 2008) conçu spécifiquement pour élargir la fenêtre attentionnelle en augmentant l'empan visuo-attentionnel. La *validité didactique* est l'expertise des utilisateurs dans la maîtrise du contenu et du référentiel de l'outil, ce qui implique souvent une formation préalable des cliniciens, ce qui n'est pas toujours le cas. La *validité de construit* implique une adéquation entre les bénéfices liés à l'utilisation de l'outil et le modèle théorique sur lequel il s'appuie. Or, les outils cliniques utilisés pour remédier aux troubles d'apprentissage de la lecture n'ont pas toujours de support théorique clairement identifié. La *validité de convergence* implique une corrélation élevée entre les gains obtenus avec un nouvel outil et ceux obtenus avec un outil plus ancien, dans le même domaine ciblé. La *validité de conséquence* représente les conséquences des usages et interprétations d'un outil.

Plus précisément, quelles sont les implications attendues au niveau de l'effet direct, du transfert et de la généralisation après l'utilisation d'un outil ?

Certaines limites ou effets méthodologiques doivent être contrôlés afin d'augmenter le niveau de preuve et éviter des risques de biais dans l'évaluation d'un protocole de remédiation (Peyroux & Seguin, 2018). Le tableau 2.1 illustre ces principaux effets et biais.

Tableau 2.1

Effets et biais méthodologiques à contrôler lors de l'évaluation d'une remédiation cognitive

Effet retest	Augmentation de la mesure d'efficacité due à l'utilisation répétée du même test.
Effet développemental	Augmentation de la mesure d'efficacité attendue avec le développement spontané du sujet.
Effet normatif	Changement dans les réponses pour se conformer aux attentes du groupe de référence.
Effet prise en charge	Amélioration spontanée et rapide du patient comparativement à l'absence d'une prise en charge.
Effet thérapeute	Effet en lien avec les compétences et la personnalité du thérapeute ou en lien avec sa croyance.
Effet lieu	Impact du lieu sur l'intervention (e.g., laboratoire de recherche, hôpital ou cabinet libéral).
Biais de confusion	Erreur de choix du critère de jugement pour mesurer un processus ciblé
Biais de mesure	Erreur systématique dans les tests cognitifs.
Biais de non-réponse ou de motivation	Réponse négative du patient par opposition et non par son incapacité à répondre.
Biais de sélection	Erreur dans la sélection des participants, échantillon non représentatif de la population.
Risques d'erreurs statistiques	Risque alpha : conclure à tort que la remédiation est efficace alors que la différence pré-post intervention est due au hasard. Risque beta : conclure à tort que la remédiation n'est pas efficace alors que la différence pré-post intervention n'est pas due au hasard.
Facteurs confondants	Erreur dans les liens statistiques.
Effets non contrôlés	État de fatigue ou d'anxiété du participant.

La remédiation cognitive implique donc la mise en œuvre d'une grande diversité de stratégies rééducatives, de formats, d'outils et de critères méthodologiques, auxquels s'ajoute la grande diversité de postulats théoriques concernant les hypothèses explicatives d'un trouble

de la lecture. Cette diversité se traduit par une *géométrie variable* des protocoles de remédiation permettant ainsi un ajustement et une adaptation à chaque patient. En revanche, le *noyau immuable* d'une démarche méthodologique structurée pour atteindre les objectifs fixés par la remédiation cognitive doit rester incontournable (Peyroux & Seguin, 2018). Ainsi, dans le contexte de la dyslexie développementale caractérisée par une très grande variabilité et hétérogénéité des manifestations comportementales et cognitives, nous nous sommes interrogés sur la manière d'évaluer l'efficacité d'une intervention dans le respect d'une rigueur méthodologique.

1.2. Méthodologie de l'intervention

Évaluer l'efficacité d'une remédiation cognitive, c'est-à-dire des procédures déployées pour réduire l'impact des troubles cognitifs, implique de mettre en œuvre une *intervention*. Une *intervention* est définie comme une manipulation expérimentale exercée sur la personne ou sur son environnement dans le but de modifier un ou plusieurs processus et/ou paramètres biomédicaux ou comportementaux liés à la santé. Les preuves de causalité, entre l'intervention et le résultat observé après l'intervention, sont mises en évidence par un *essai clinique* ou une *étude expérimentale fondamentale impliquant des personnes*. Toutefois, la distinction entre les deux est parfois confuse, et mérite d'être rappelée. Selon le paradigme de la médecine fondée sur les preuves (Sackett et al., 1996), les décisions de soin doivent s'appuyer sur des données probantes. Ces données probantes émanent de préférence d'*essais contrôlés randomisés, gold-standard* dans la conception d'*essais cliniques* (Murad et al., 2016) qui apportent les preuves les plus solides de causalité entre l'intervention et le résultat observé (Bhide et al., 2018; Zabor et al., 2020).

Une *étude expérimentale fondamentale impliquant des personnes* (*Basic Experimental Studies involving Humans, BESH*) est définie, selon le *National Institutes of Health*, à la fois

comme un *essai clinique* et une *recherche fondamentale* (étude systématique orientée vers une plus grande connaissance ou compréhension des aspects fondamentaux des phénomènes et des faits observables sans application spécifique vers des processus ou des produits).

Un *essai clinique* est défini, selon le *National Institutes of Health*, comme une étude de recherche dans laquelle une ou plusieurs personnes sont affectées prospectivement à une ou plusieurs interventions (pouvant inclure un placebo ou un autre contrôle) afin d'évaluer les effets de ces interventions sur les résultats biomédicaux ou comportementaux liés à la santé. Le terme "affectés prospectivement" fait référence à un processus prédéfini (par exemple, la randomisation) spécifié dans un protocole pré-enregistré et approuvé qui stipule l'affectation des individus de l'échantillonnage de la recherche (individuellement ou en groupes) à un ou plusieurs *bras* (par exemple, intervention, placebo ou autre contrôle) d'un *essai clinique*. L'affectation prospective ne se limite pas à une affectation aléatoire, à une manipulation ou à une condition mais signifie aussi que l'intervention (i.e., la manipulation expérimentale) est attribuée selon un protocole prédéfini.

L'essai contrôlé randomisé

Un *essai contrôlé randomisé* (ECR) est une étude prospective, comparative et quantitative réalisée dans des conditions contrôlées avec une attribution aléatoire à des groupes d'intervention et de contrôle (Bhide et al., 2018). Le groupe témoin peut effectuer un traitement standard, un traitement placebo ou n'effectuer aucun traitement. Le principal but d'un ECR est de minimiser les facteurs de confusion, connus et inconnus, qui amènent à biaiser l'estimation de la taille de l'effet. S'il existe des différences entre les groupes de participants attribués à l'une ou l'autre des interventions, ces différences peuvent être confondues avec les différences observées après l'intervention lorsqu'il n'y a pas de randomisation. En revanche, la randomisation, c'est-à-dire l'attribution au hasard des participants à l'une ou l'autre des

interventions induit la répartition aléatoire de tous les facteurs confondants susceptibles d'influencer les résultats, à condition que la taille de l'échantillon soit suffisante. Ainsi, les différences inter-groupes observées dans les résultats sont probablement dues à l'intervention plutôt qu'à tout autre facteur. L'ECR doit répondre à une question de recherche définie, claire, réalisable, spécifique, mesurable, éthique et représentant un intérêt clinique. Cette question de recherche est formulée selon le format « PICOT » : P (population d'intérêt), I (intervention à étudier), C (intervention de comparaison), O (résultats à évaluer) et T (durée d'intervention/délai de constatation du résultat).

Afin de promouvoir la transparence, la reproductibilité et éviter le biais de publication (publication de résultats positifs uniquement), le protocole de l'ECR doit être pré-enregistré dans un registre d'essais cliniques accessible au public avant le début du recrutement des participants. Le protocole peut aussi être publié dans une revue scientifique selon des lignes directrices précises (<http://www.consort-statement.org>). La population cible, les critères d'inclusion et d'exclusion, le processus de randomisation, la mise en aveugle de l'intervention, la description du traitement, l'évaluation des résultats, la taille de l'échantillon requis, les exigences éthiques, le processus de consentement, la gestion des données, les analyses statistiques et le comité de surveillance des données doivent être renseignés sur la base de recommandations précises (Altman et al., 2001; Torgerson & Torgerson, 2003). Réaliser un ECR multicentrique c'est-à-dire sur plusieurs sites, améliore la généralisation des résultats et permet d'atteindre la taille de l'échantillon requise plus rapidement. Si la procédure du protocole ne permet pas la mise en « double aveugle », l'ECR est mené en « simple aveugle », seulement pour les participants ou en « ouvert » s'il n'est pas possible de masquer l'attribution à un groupe.

Toute intervention sur la personne humaine nécessite l'approbation d'un comité d'éthique. Les principes éthiques incluent l'évaluation des risques et des avantages pour les

participants et la société ainsi que le recueil d'un consentement éclairé (*WMA Declaration of Helsinki. Ethical Principles for Medical Research Involving Human Subjects.*, 2018). Outre les risques inhérents à l'intervention, le recours à la randomisation pour inclure les participants à un groupe d'intervention ou à un groupe contrôle sans intervention ou avec une intervention placebo, doit respecter les principes éthiques. Par exemple, un ECR qui a recours à un groupe contrôle avec une intervention placebo ou une absence d'intervention pour valider une intervention expérimentale, alors qu'il existe des données probantes de la supériorité de l'intervention expérimentale sur les autres conditions, est contraire à l'éthique (Bhide et al., 2018). Pour se conformer aux principes éthiques, une conception en *crossover* ou croisée permet à tous les participants de l'essai clinique de bénéficier de deux interventions validées car l'attribution à un groupe diffère seulement par l'ordre des interventions. Cette conception en *crossover* atténue les différences individuelles entre les participants car chaque participant est son propre contrôle. Une autre conception avec un contrôle intra-sujets est l'évaluation des performances pendant une période sans intervention qui précède la période avec intervention.

La taille de l'échantillon requise pour tester statistiquement une hypothèse est déterminée par la taille de l'effet attendu. La puissance statistique dépend de l'hypothèse testée par l'ECR qui peut évaluer soit la supériorité, soit l'équivalence, soit la non-infériorité d'une intervention par rapport à une autre. Pour intégrer, dans l'analyse statistique, les données des participants qui ont abandonné en cours d'intervention, l'analyse en « intention de traiter » est recommandée dans les essais de supériorité afin de réduire les biais. Cependant l'analyse « par protocole » où seules les données des participants ayant terminé le traitement sont analysées, est aussi effectuée en analyse secondaire pour une estimation plus juste de l'effet du traitement.

L'application des résultats d'un ECR à une décision de soin individuelle reste néanmoins un problème épineux dans le contexte de la dyslexie développementale où l'hétérogénéité sémiologique étant omniprésente, augmente le pourcentage de réponses

différentes à l'intervention. Pour tenir compte d'un éventuel effet hétérogène de l'intervention, des analyses de sous-groupes de patients selon une variable (e.g., le sexe ou l'âge) peuvent renseigner sur la variabilité de l'effet, s'il existe, mais ne fournissent pas de prédictions des effets du traitement à un niveau individuel. Cependant, le recours à des modèles prédictifs (Collins et al., n.d.; Hingorani et al., 2013; Steyerberg et al., 2013) ou à des techniques d'apprentissage automatique (Jordan & Mitchell, 2015; Lipkovich et al., 2017) est une aide pour prédire l'effet d'un traitement à un niveau individuel. L'hétérogénéité de l'effet du traitement peut aussi être évaluée au moyen d'une analyse prédictive basée sur la régression pour fournir des prédictions individualisées et soutenir la décision de soin, selon des lignes directrices méthodologiques précises (Kent & Shah, 2012). Les auteurs décrivent deux catégories d'approche prédictive de l'hétérogénéité de l'effet de traitement. D'une part, la « modélisation du risque » prédit le risque pour un certain résultat en stratifiant les patients au sein de l'ECR grâce à un modèle multivariable. D'autre part, la « modélisation des effets » définit les interactions entre le traitement et les covariables de base grâce à un modèle sur les données de l'ECR. Cependant, ces approches sont à manipuler avec prudence car leur utilisation pour estimer les effets individuels du traitement reste fragile et limitée (Kent & Shah, 2012). Plus adaptée à la pratique clinique, la méthodologie du cas unique expérimental permet alors d'appréhender les variabilités individuelles soit en appliquant un protocole de remédiation déjà validé par un ECR, soit en le modifiant pour l'adapter aux caractéristiques individuelles au travers du cas unique expérimental.

Le cas unique expérimental

Alors que des interventions sont validées par le biais d'essais contrôlés randomisés dans un cadre théorique précis impliquant des critères d'inclusion et de non-inclusion homogènes, le clinicien doit toutefois être dans la capacité d'adapter les remédiations à l'hétérogénéité et à

la progression individuelle. Pour cela, il peut modifier l'ordre, le nombre, la fréquence ou la combinaison des entraînements au sein d'une intervention ayant été validée expérimentalement (e.g., dans le cas d'une comorbidité de type dyslexie/trouble déficitaire de l'attention). De plus, d'autres interventions, construites selon une problématique particulière, ne peuvent être appliquées qu'à un nombre réduit de patients (e.g., un enfant LD avec un profil de haut potentiel intellectuel). Le clinicien doit alors évaluer le plus objectivement possible l'impact de son intervention auprès d'un seul patient.

Les méthodologies en lignes de base multiples permettent d'évaluer des niveaux de compétences susceptibles de se maintenir ou d'augmenter dans le temps. Le principe est de collecter chez un même patient des mesures répétées lors de la phase pré-intervention, lors des phases de traitement et de suivi afin de mesurer le maintien des gains après l'arrêt de l'intervention. Le clinicien peut alors s'assurer de l'efficacité du traitement administré si ses effets sont spécifiques c'est-à-dire si les résultats vont dans le sens d'une amélioration des mesures qui évaluent la fonction ciblée par l'intervention alors que les mesures qui évaluent d'autres fonctions restent inchangées (Seron, 1995).

Trois types de lignes de base sont généralement appliqués pour valider l'efficacité d'une intervention. Ces lignes de base permettent de mesurer un changement entre le début et la fin de l'intervention ou entre les différentes phases de l'intervention et s'assurer d'une modification durable par un suivi à long terme. (1) Les lignes de bases *spécifiques* évaluent les processus directement ciblés par l'intervention et mesurent des items spécifiques entraînés et non entraînés (e.g., mesures de la conscience phonémique chez le LD). (2) Les lignes de bases de *transfert* ou de généralisation évaluent des processus indirectement ciblés par l'intervention mais qui présentent des liens étroits avec la fonction ciblée (e.g., efficacité en lecture de pseudomots chez le LD). (3) Les lignes de base de *contrôle* évaluent des processus non ciblés

par l'intervention et sans lien avec les processus entraînés et servent de contrôle pour vérifier la spécificité de l'intervention.

Chaque ligne de base est répétée 3 à 5 fois sur une courte période pour s'assurer de la *stabilité* des mesures (Tate et al., 2013) en tenant compte de l'effet test/retest. Ces mesures doivent être *sensibles* pour pouvoir refléter un changement. Si les items proposés sont trop faciles, les mesures atteindront un effet plafond de la mesure, et si les items proposés sont trop difficiles, la progression ne sera pas objectivable. Le clinicien doit donc être très prudent dans l'élaboration des lignes de base en veillant à privilégier une passation courte, une bonne fidélité inter-juges, peu d'effets test/retest, une bonne sensibilité au changement et à la validité du contenu de l'intervention.

Révéler l'efficacité d'un traitement pour un patient et en préciser l'origine peut aussi faire l'objet d'une étude expérimentale, nommée « *Single Case Experimental Design* » (SCED). Le SCED se réfère à une méthodologie rigoureuse basée sur un design planifié, publiée avant le début des inclusions et permettant de contrôler les différents biais cités supra (e.g., effets retest). Défini comme « une étude approfondie et prospective de certaines caractéristiques d'un individu, à travers l'observation systématique, la manipulation de variables, les mesures répétées et l'analyse de données » (Tate et al., 2013), le SCED présente trois avantages. Premièrement, il permet d'identifier les relations entre les variables dépendantes et indépendantes. Deuxièmement, il permet d'explorer la variabilité inter-individuelle gommée par les études de groupe en répliquant la procédure à d'autres patients. Troisièmement, il permet d'explorer la variabilité intra-sujet grâce aux mesures répétées.

Pour les designs expérimentaux de type ABAB, l'effet de l'intervention est démontré en alternant trois fois les phases avec et sans intervention. Pour le cas particulier de la méthodologie en lignes de base multiples où le design est de type ABC, sans retour à la phase initiale, il n'est pas possible d'appliquer cette recommandation. Cependant, d'autres

alternatives sont possibles comme le recours à trois patients ou trois contextes ou trois objectifs. Par exemple, dans le cas d'un SCED en lignes de base multiples à travers les participants, l'intervention est introduite séquentiellement pour chaque participant, et le nombre de mesures initiales varie selon le nombre de participants. Ce type de design permet de rapporter l'effet de l'intervention indépendamment du temps passé avec le thérapeute. Par conséquent, le SCED permet de générer des données pertinentes en termes de réponses individuelles à un traitement, de faire face à l'hétérogénéité des résultats dans une population de patients (Gabler et al., 2011) ou de vérifier l'effet d'une intervention validée par un ECR (Smith, 2012).

Nous avons participé à l'élaboration d'un protocole SCED en lignes de base multiples proposé à quatre participants LD avec un haut potentiel intellectuel pour évaluer les effets d'un protocole de remédiation de la dyslexie développementale basé sur l'entraînement des processus cognitifs audio-phonologiques. Avec une prévalence de 5 % de LD chez les enfants présentant un indice d'aptitude générale supérieur à 130 (Toffalini et al., 2017), la remédiation des troubles de la lecture chez ces LD reste peu étudiée. Ce protocole propose de comparer les effets sur les compétences en lecture d'une intervention intensive ciblant la perception catégorielle, la dénomination rapide automatisée et l'analyse phonémique, comparée à une remédiation orthophonique classique chez des LD avec un haut potentiel intellectuel. Ce protocole d'étude a été soumis pour publication (Darrot et al., 2022).

Nous avons également publié une étude de cas unique dans un contexte particulier (cf. Annexe 19, Harrar-Eskinazi et al., 2021). Cet article répondait initialement à une demande de soumission émanant d'une revue clinique française afin d'illustrer les « Recommandations de bonne pratique dans l'évaluation et la remédiation des troubles du langage écrit » (Leloup et al., 2022) et s'adresse à des orthophonistes. À travers cette étude de cas, notre objectif était donc de présenter un protocole de remédiation de la dyslexie développementale en accord avec ces recommandations de bonnes pratiques. Ainsi, nous avons décrit comment une méthodologie

de soin conçue pour un essai clinique randomisé pouvait s'adapter au profil sémiologique d'un enfant LD dans un contexte clinique de remédiation individuelle. D'abord, ce travail a permis de souligner l'intérêt d'une prescription individuelle des entraînements en fonction d'un profil sémiologique défini à la fois par l'évaluation initiale de la lecture, de l'orthographe et des processus cognitifs sous-jacents audio-phonologiques et visuo-attentionnels mais aussi par des lignes de bases spécifiques à chaque entraînement. Puis, ce travail nous a permis de mettre en évidence la nécessité de respecter les critères méthodologiques de la remédiation cognitive pour optimiser l'efficacité de la remédiation : pratique intensive et répétée, spécificité de l'entraînement, apprentissage sans erreurs, supports numériques, entraînements à domicile, implication des parents et éducation thérapeutique. Enfin, cette étude de cas a montré la possibilité d'appliquer un protocole expérimental de remédiation de la dyslexie en s'appuyant sur l'expertise du clinicien.

Résumé 2.1

Principes généraux de la remédiation cognitive

La remédiation cognitive se caractérise par trois principaux types de stratégies : curative, compensatoire et adaptative. La stratégie de remédiation curative vise la normalisation ou l'amélioration d'un ou plusieurs processus cognitifs sous-jacents identifiés comme déficitaires et en lien avec un modèle théorique. Elle se caractérise par la spécificité de l'entraînement, la pratique intensive et répétée et l'apprentissage sans erreur. La stratégie de remédiation compensatoire vise l'optimisation d'un ou plusieurs processus cognitifs sous-jacents préservés dans le but de compenser la fonction déficiente. Elle se caractérise par la métacognition, l'éducation thérapeutique et le renforcement positif. La stratégie de remédiation adaptative vise la limitation des répercussions du ou des déficits cognitifs en ayant recours aux aménagements de l'environnement et aux aides externes.

Un cadre méthodologique structuré selon des critères de validité de contenu, didactique, de construit, de convergence et de conséquence, constitue le noyau de la remédiation cognitive. Cependant, certains critères méthodologiques doivent être contrôlés afin d'augmenter le niveau de preuve de la remédiation. Les études validées par le biais d'essais contrôlés randomisés représentent le meilleur niveau de preuve. Les interventions validées individuellement par les cliniciens auprès de leur patient selon la méthodologie de cas unique limitent les risques de biais.

2. Remédiation des déficits cognitifs sous-jacents

Comme nous l'avons déjà décrit dans le chapitre 1, la dyslexie développementale serait l'expression de plusieurs déficits cognitifs sous-jacents (DCSJ) (Ziegler et al., 2020). Ces DCSJ doivent être identifiés individuellement dans un premier temps, puis ciblés par des entraînements selon une stratégie de remédiation curative afin de réorganiser la fonction cognitive déficiente dans un deuxième temps et obtenir des procédures d'identification des mots écrits optimales et automatisées dans un troisième temps (Lachmann et al., 2014).

Alors que certains programmes de remédiation interviennent directement sur les déficits de la lecture et de l'orthographe (McArthur et al., 2015; Tressoldi et al., 2007; Tucci et al.,

2015), d'autres s'orientent plus spécifiquement vers les déficits cognitifs sous-jacents à la lecture et à l'orthographe (Franceschini et al., 2013). Pour certains auteurs, ces approches de remédiation viseraient plus particulièrement à rétablir un ensemble complexe de processus cognitifs qui doivent fonctionner de concert pour garantir une lecture fluide, sans nécessiter d'activité de lecture (e.g., Zoccolotti et al., 2016). Ces approches seraient plus faciles, plus motivantes pour l'enfant car source de progression et par conséquent pourraient s'avérer particulièrement adaptées à la remédiation de la dyslexie développementale.

Même si la littérature n'a pas encore précisé si certains de ces DCSJ sont les causes, les corrélats ou les conséquences du trouble de la lecture, de nombreux travaux mettent en évidence une amélioration des compétences en lecture après des interventions ciblant des déficits de traitement auditif, phonologique, visuel, visuo-attentionnel ou audio-visuel. Notre recherche s'est orientée vers une compréhension des processus cognitifs sur lesquels il est possible d'intervenir et sur les modalités de ces interventions. Après avoir précisé le contexte théorique en lien avec chaque type de déficit cognitif, nous décrivons des interventions ciblant uniquement les déficits cognitifs sous-jacents, sans intervention sur les procédures de lecture ou d'orthographe (pour une synthèse des études décrites, se reporter au Tableau 2.2, pages 209 à 216).

2.1. Intervention sur le traitement phonologique

Les compétences de traitement phonologique, reflet de la connaissance de la structure phonologique du langage oral, sont nécessaires à l'apprentissage de la lecture, de l'orthographe et au développement de la compréhension écrite (Share & Stanovich, 1995). Dans le contexte d'une étiologie encore débattue (Elliott & Grigorenko, 2014; Peterson & Pennington, 2015; Ramus & Ahissar, 2012), un consensus sur la relation importante entre la DD et un déficit du traitement phonologique a été admis par une grande partie de la communauté scientifique

(Lyon, 1995; Ramus, 2003; Vellutino et al., 2004). De surcroît, il a été clairement démontré qu'une altération spécifique de l'accès aux représentations phonologiques⁴ (Boets et al., 2013; Ramus, 2014; Ramus & Szenkovits, 2008) explique le déficit d'automatisation des associations graphème-phonème. Ces déficits de traitement phonologique peuvent altérer la capacité à identifier, stocker, récupérer ou manipuler les phonèmes, qui sont nécessaires à un décodage efficace.

Les déficits de traitement phonologique sont plus fréquents et plus sévères que les déficits d'autres composantes cognitives chez le LD (Melby-Lervåg et al., 2012; Ramus, 2003; White et al., 2006). Les LD présentent des déficits de la conscience phonologique et plus particulièrement de la conscience phonémique (Bradley & Bryant, 1978, 1983; Catts et al., 2005; Joanisse et al., 2000), de la mémoire verbale à court terme (Snowling, 2000; Szenkovits & Ramus, 2005) et de la vitesse d'accès aux représentations lexicales et phonologiques d'items familiers (Denckla & Rudel, 1976; Wolf & Bowers, 1999). Sur le plan cérébral, les déficits de traitement phonologique sont associés à un dysfonctionnement des aires périsylviennes de l'hémisphère gauche, essentiellement le lobule frontal inférieur, le gyrus temporal supérieur et le lobule pariétal inférieur (gyrus angulaire et supramarginal), et à un défaut de connectivité entre ces aires. (Démonet et al., 2004; Shaywitz et al., 2002; Vandermosten et al., 2012). Les moyens d'évaluer le traitement phonologique sont complexes, variés et objets de débats. Ces moyens se distinguent globalement par des tâches d'analyse segmentale de la parole, de rétention de l'information verbale et phonologique à court terme et d'accès rapide à l'information lexicale et phonologique stockée en mémoire à long terme. Ainsi, l'accès aux représentations phonologiques est classiquement mesuré par des tâches de conscience phonologique (e.g., segmentation ou suppression phonémique), de mémoire à court terme phonologique (e.g., répétition de pseudomots), de dénomination sérielle rapide (e.g.,

⁴ Les représentations phonologiques sont les représentations impliquées dans la perception et la production des sons du langage.

dénomination rapide automatisée de couleurs) et des stratégies de remédiations ciblant chacun de ces déficits ont été expérimentées par de nombreuses études.

La conscience phonologique

La conscience phonologique est la capacité métacognitive à manipuler de façon intentionnelle les unités phonologiques que sont les syllabes, les attaques, les rimes, les noyaux vocaliques, les codas et les phonèmes (Blachman, 1997). La conscience phonologique se construit au cours du développement du langage oral de façon implicite (conscience des syllabes) ou du développement du langage écrit de façon explicite (conscience des phonèmes). La conscience des phonèmes ou conscience phonémique entretient des rapports bidirectionnels avec la lecture et se développe lors de l'apprentissage du principe alphabétique de la lecture, c'est-à-dire de la mise en correspondance entre les phonèmes et les graphèmes (Lieberman, 1973). De nombreuses études longitudinales ont confirmé le pouvoir prédictif de la conscience phonémique sur le développement ultérieur de la lecture (e.g., Georgiou et al., 2008; Pennington et al., 2001; Torgesen et al., 1994; Ziegler et al., 2010), résultats confirmés en langue française (e.g., Casalis & Louis-Alexandre, 2000; Piquard-Kipffer & Sprenger-Charolles, 2013). La conscience phonémique est un puissant prédicteur de différences individuelles dans les compétences d'apprentissage de la lecture, effet universel et plausiblement causal (Melby-Lervåg et al., 2012; Share et al., 1984). La conscience de la rime ou de la mémoire verbale à court terme seraient des prédicteurs de compétences en lecture moins puissants que la conscience phonémique (Melby-Lervåg et al., 2012).

La conscience phonémique est évaluée par des tâches très différentes telles que l'identification, la suppression, l'inversion, la segmentation ou la fusion phonémiques, incluant des mesures de vitesse et de précision. Le degré de complexité des tâches varie de simples mesures comme la tâche de suppression du phonème initial dans un pseudomot (e.g., *pla*

devient *la*) à des tâches plus complexes comme les acronymes auditifs (e.g., « cousin infernal » pour la réponse correcte [kɛ̃]) et les contrepèteries (e.g., « canard-taupe » pour la réponse correcte [tanar-cop]). Ces dernières tâches plus complexes n'évaluent pas seulement la conscience phonémique car elles nécessitent également une mise en mémoire des mots avant leur manipulation phonémique et l'activation de représentations orthographiques. Par conséquent, les performances à ces épreuves doivent être pondérées selon les compétences de mémoire à court terme verbale.

De nombreux programmes d'intervention ont confirmé les effets positifs de la remédiation de la conscience phonémique sur les compétences en lecture et en orthographe et ce, d'autant qu'ils sont systématiquement associés à un entraînement du décodage phonologique et de la fluence en lecture (Voir les méta-analyses : Bus & van IJzendoorn, 1999; Ehri et al., 2001; Galuschka et al., 2014). Ces programmes d'interventions seront décrits dans la section 2.4. *Remédiation combinée des déficits cognitifs sous-jacents et des procédures de lecture* (e.g., Scanlon & Vellutino, 1996; Torgesen et al., 2001; Vellutino et al., 2004; Wise et al., 1999, 2000). Ici, nous abordons seulement les programmes d'intervention axés sur l'entraînement de la conscience phonémique sans support écrit.

La première étude à citer est la méta-analyse, menée par le National Reading Panel (Ehri et al., 2001), qui a évalué les effets d'un entraînement de la conscience phonémique sur l'apprentissage de la lecture et de la production écrite, à travers la sélection de 52 études. Parmi ces études, 10 études sont des interventions visant à entraîner la conscience phonémique chez des LD âgés de 7 à 12 ans. Ces tâches de conscience phonémique ciblent principalement l'identification d'un phonème dans un ou plusieurs mots, l'identification d'un mot parmi d'autres ne contenant pas le phonème cible, la fusion de phonèmes en mot, la segmentation d'un mot en phonèmes et la suppression de phonèmes. Il faut cependant souligner que ces interventions ciblant la conscience phonémique à l'oral, utilisent aussi les lettres pour entraîner

le décodage phonologique. Les tâches de décodage phonologique visent à automatiser la correspondance graphème-phonème pour lire des mots et la correspondance phonème-graphème pour les orthographier. Toutefois, ce type d'intervention n'inclut pas d'activité de lecture ou d'écriture de textes.

Soulignons que les tailles d'effets rapportées sont plus grandes quand l'entraînement de la conscience phonémique à l'oral est associé à un entraînement de la connaissance des lettres. Fait intéressant, les tailles d'effets des entraînements de la conscience phonémique sur les compétences en lecture sont plus grandes pour les NL ($d = 1,33$) et les enfants à risque de développer un trouble de la lecture ($d = 0,30$) que pour les LD ($d = 0,28$). De plus, l'impact de l'entraînement de la conscience phonémique sur les compétences en compréhension écrite est faible à modéré ($d = 0,34$), et aucun effet significatif n'est relevé sur les compétences en production écrite chez les LD.

Autre fait intéressant, cette méta-analyse précise que les effets sur la lecture sont plus grands si seulement deux tâches, plutôt que trois ou plus, sont entraînées simultanément et plus particulièrement la fusion et la segmentation phonémiques. Ainsi, les auteurs conseillent d'enseigner aux élèves une seule compétence à la fois jusqu'à ce qu'elle soit maîtrisée avant de passer à la suivante. Par ailleurs, ces auteurs recommandent d'associer rapidement la compétence enseignée et son application sur des tâches de lecture et d'écriture de mots. Notamment, il est recommandé d'associer des tâches de segmentation à l'écriture des mots et des tâches de fusion à la lecture des mots. Cette méta-analyse a eu une forte répercussion, particulièrement dans les pays anglo-saxons, sur le développement de protocoles expérimentaux associant des entraînements de la conscience phonémique à des entraînements de la lecture et de la production écrite de mots et de textes.

Une autre méta-analyse, celle de Suggate (2010) a aussi analysé les effets de 85 programmes d'intervention d'une durée moyenne de 86 heures, dont l'objectif était de remédier

ou de prévenir les difficultés de lecture d'enfants scolarisés de la grande section de maternelle à la septième année de primaire. Parmi ces interventions, 11 % des programmes sont des entraînements de conscience phonémique à l'oral sans activités de lecture et écriture et présentent une taille d'effet⁵ de 0.4, inférieure aux autres programmes évalués. À savoir, les programmes ciblant la conscience phonémique et le décodage phonologique, *phonics instruction*, ont une taille d'effet de 0.47 ; les programmes ciblant la compréhension ont une taille d'effet de 0.58. De plus, il est intéressant de noter dans cette méta-analyse que les tailles d'effet d'une amplitude modérée, augmentent avec l'âge mais diminuent avec le temps pour les suivis à long terme. Cette diminution des effets à long terme sera ensuite confirmée pour un suivi moyen de 11,17 mois (Suggate, 2016).

Parmi les programmes d'intervention phonologique évalués, le programme *The ABDs of Reading*, est une parfaite illustration de l'entraînement à la fusion et à la segmentation phonémique à l'oral puis à l'aide de lettres. Williams (1980) a testé ce programme auprès d'enfants LD américains âgés de 7 à 12 ans présentant des troubles sévères d'apprentissage. Les LD doivent effectuer des tâches de segmentation et de fusion syllabiques et phonémiques à l'oral, soutenues d'abord par des supports visuels sous forme de carrés en bois, ensuite par des lettres inscrites sur les carrés en bois. Pendant 26 semaines, des sessions de 29 minutes en moyenne, tous les jours de classe ont été effectuées par des enseignants préalablement formés. Axé principalement sur l'analyse phonémique, ce programme propose toutefois une mise en contexte sémantique des mots décodés et des activités de compréhension. Après réplique de l'étude, des enfants LD entraînés (n = 96) sont comparés à deux groupes contrôles d'enfants LD (n = 93) et d'enfants NL (n = 51) n'ayant pas reçu l'entraînement. Ce programme de remédiation a permis d'augmenter les capacités de décodage de mots et de pseudomots

⁵ La taille de l'effet est la différence entre la performance moyenne du groupe ayant bénéficié d'une intervention spécifique sur la conscience phonémique et la performance moyenne du groupe contrôle, en unité d'écart-type, calculée et estimée en taille moyenne pondérée notée *d* (Cohen, 1988).

monosyllabiques, et les gains obtenus sur la lecture se sont maintenus au moins 6 mois après la fin de l'intervention.

Plus récemment, une étude longitudinale menée de la maternelle à la neuvième année de primaire auprès de 209 élèves finlandais typiques et à risque, a comparé les compétences en lecture des élèves ayant bénéficié d'un entraînement intensif et ciblé sur la conscience phonémique en maternelle à celles des élèves n'ayant pas eu l'entraînement (Kjeldsen et al., 2019). L'entraînement a induit une amélioration du décodage et de l'orthographe des mots en première année de primaire et une amélioration de la compréhension de la lecture les années suivantes et jusqu'en sixième année de primaire. De plus, ce gain était plus important pour les enfants à risque et s'est maintenu au moins jusqu'en neuvième année de primaire.

En conclusion, l'entraînement de la conscience phonémique améliore les compétences en lecture, particulièrement s'ils sont appliqués précocement chez les enfants à risque. Cependant, chez les LD, les effets sur la lecture restent modérés, les effets sur la production écrite faibles et les effets à long terme sont réduits. Les effets sont d'autant plus grands et se maintiennent dans le temps à condition qu'ils soient associés à un entraînement du décodage phonologique en lecture et en écriture et à une mise en contexte sémantique, ce qui a été confirmé par la méta-analyse de Galuschka (2014). À cet effet, nous décrivons des exemples de programmes d'intervention associant la conscience phonémique et les procédures de lecture lexicale et sous-lexicale à la fin de ce chapitre.

La mémoire verbale à court terme

Le décodage phonologique implique plusieurs processus sous-jacents : l'analyse phonémique, la fusion des phonèmes pour accéder au mot (assemblage des unités) et la mémoire verbale à court terme (MVCT). La MVCT permet le maintien temporaire et limité d'informations verbales, stockées sous forme phonologique, et sous la dépendance d'une boucle

phonologique et d'un mécanisme de répétition subvocale pour stocker et récupérer les informations phonologiques. Le déficit de MVCT est associé à la dyslexie développementale et persiste jusqu'à l'âge adulte (Majerus & Cowan, 2016). Les capacités de la MVCT prédisent les capacités d'apprentissage de la lecture et de l'orthographe (Martinez Perez et al., 2012) mais sont des prédicteurs moins puissants que la suppression de phonème et la DRA chez des LD âgés entre 8 à 12 ans (Landerl et al., 2013).

Toutefois, la nature du déficit de la MVCT chez les LD est sujette de controverse. Pour certains auteurs, ce déficit est la conséquence d'un déficit plus global du traitement phonologique (Szenkovits & Ramus, 2005), pour d'autres, il serait un déficit des capacités de stockage, indépendamment du déficit phonologique (Majerus & Cowan, 2016). Nous pensons que ces deux interprétations ne s'excluent pas mutuellement mais pourraient définir des profils cognitifs différents chez le LD, en accord avec l'hypothèse causale multifactorielle de la dyslexie. Ainsi, si le déficit de la MVCT concerne le maintien de l'information « item », c'est-à-dire de l'information phonologique, il s'agit en effet d'une conséquence du déficit de traitement phonologique (Majerus & Cowan, 2016). Si le déficit de la MVCT concerne plutôt le maintien de l'information « ordre sériel », indépendamment de l'information phonologique, il s'agirait d'un déficit de la MVCT qui pourrait augmenter les difficultés d'apprentissage des LD (Majerus & Cowan, 2016). De fait, un déficit de l'aspect « ordre sériel » de la MVCT et non verbale (Hachmann et al., 2014) et un déficit de l'ordre sériel temporel (Romani et al., 2015) sont décrits chez certains LD. De plus, le déficit de traitement de l'ordre sériel en MVCT et en MCT visuo-spatiale chez de jeunes adultes LD a été associé à une moindre activation du sillon intrapariétal droit (Martinez Perez et al., 2015), impliqué dans le traitement de l'ordre sériel en mémoire à court terme (Majerus et al., 2006). Ainsi, il serait pertinent de mesurer la MVCT des LD par des tâches spécifiques « ordre sériel » et des tâches spécifiques « items ». Malgré leur intérêt, nous ne décrivons pas ces tâches car actuellement, la majorité des études et

des praticiens évaluent la MVCT par des tâches impliquant la rétention simultanée de « l'item et de « l'ordre », comme les tâches de répétition de chiffres ou de pseudomots (Martinez Perez et al., 2012).

Une tâche classique de rappel sériel immédiat consiste à répéter des séquences de chiffres présentées auditivement et progressivement plus longues qui évaluent la MVCT lorsque le rappel est dans l'ordre direct, et la mémoire de travail lorsque le rappel est effectué dans l'ordre inverse. Les enfants LD présenteraient un déficit de la MVCT à la tâche d'empan de chiffres endroit, comparés à des NL (e.g., Gallagher et al., 2000), déficit relaté aussi chez l'adulte lecteur dyslexique (e.g., Sela et al., 2012).

Une autre tâche classique de rappel sériel à court terme consiste en la répétition à l'oral de pseudo-mots. Ainsi, cette tâche permet d'évaluer la MVCT sans engagement des connaissances lexicales stockées dans la mémoire à long terme alors qu'elles sont engagées lors de la répétition de mots. La tâche d'empan de pseudo-mots est altérée chez l'enfant LD par comparaison avec des groupes contrôles appariés en âge chronologique et en âge lexique (Melby-Lervåg & Lervåg, 2012), alors que la répétition de mots est préservée. Ce déficit de répétition de pseudo-mots se retrouve également chez l'adulte LD (Ramus, 2003).

L'efficacité de l'entraînement de la mémoire de travail n'a pas été démontrée dans la méta-analyse de 23 études de Melby-Lervåg et Hulme (2013), menée auprès d'enfants et d'adultes tout-venant ou présentant des troubles neuro-développementaux ou acquis. Cependant, il convient de souligner que parmi ces 23 études, seulement 2 études ont évalué les transferts d'un entraînement de la mémoire de travail sur le décodage en lecture auprès d'adultes LD (Kraus & Breznitz, 2009; Shiran & Breznitz, 2011), et que ces 2 études ont relevé des effets positifs de transfert sur la lecture. Dans l'étude de Shiran et Breznitz (2011), les différences de gain en lecture n'étaient pas significatives entre les groupes expérimentaux et les groupes contrôles car les groupes contrôles étaient entraînés à un programme de lecture. Cependant, un

effet principal significatif de l'entraînement de la mémoire de travail sur les compétences en lecture a été relevé dans les groupes expérimentaux.

Plus récemment, deux études ont montré des effets de l'entraînement de la mémoire de travail verbale et visuo-spatiale sur les compétences en lecture d'enfants LD dans une langue non alphabétique, le chinois (Luo et al., 2013; Yang et al., 2017). Dans l'étude de Yang et al. (2017), un entraînement de 15 minutes par jour, 5 jours par semaine pendant 2 semaines de la mémoire de travail phonologique est effectué par 12 enfants chinois LD, âgés en moyenne de 9 ans 7 mois, comparés à un groupe contrôle de 11 enfants LD de même âge entraînés à un jeu vidéo placebo sur tablette. Les enfants sont attribués aléatoirement aux deux groupes. La tâche est construite selon une tâche classique *n-back*⁶ de mise à jour en mémoire de travail. L'enfant entend des voyelles et doit décider en 2500 ms si la voyelle présentée à la suite est identique ou différente. Les résultats révèlent une amélioration significative de la conscience phonologique et de la fluidité en lecture, comparée à celle d'un groupe contrôle. Dans cette même étude, un autre entraînement, de durée identique au précédent, ciblant cette fois la mémoire de travail visuo-spatiale est effectué par 11 enfants LD âgés en moyenne de 9 ans 9 mois, comparés à un groupe contrôle de 11 enfants LD de même âge entraînés à un jeu vidéo sur tablette. Les enfants sont attribués aléatoirement aux deux groupes. Comme dans la précédente étude, une tâche *n-back* était utilisée, consistant en la présentation de six positions spatiales d'un arrangement circulaire. Les participants disposaient de 2500 ms pour indiquer si la cible présentée était dans la même position que la cible précédente. Les résultats révèlent une amélioration significative de la conscience orthographique et de la fluidité de lecture, comparée au groupe contrôle.

⁶ La tâche consiste à traiter des stimuli successifs et déterminer si le stimulus présenté est le même que celui présenté (n) fois en arrière dans la séquence. Le niveau de difficulté (n-back) est ajusté de manière interactive en fonction des performances des participants.

La dénomination rapide automatisée

Le troisième déficit de traitement phonologique décrit chez le LD est un déficit de la dénomination rapide automatisée (DRA). La DRA évalue la reconnaissance et la récupération rapides de stimuli linguistiques, chiffres, lettres, couleurs ou objets, présentés visuellement par la capacité de nommer aussi rapidement que possible un ensemble de stimuli très familiers qui se répètent de façon aléatoire sur une matrice de plusieurs lignes horizontales.

De nombreux LD présentent des difficultés dans les tâches de DRA (e.g., Norton & Wolf, 2012; Wolf et al., 2000). Une méta-analyse incluant 137 études, met en évidence une relation modérée à forte entre la DRA et les capacités de lecture (Araújo et al., 2015). Une seconde méta-analyse met en évidence une relation forte entre la DRA et les capacités en décodage (Borokhovski et al., 2018). La DRA est considérée comme un prédicteur précoce et significatif de la lecture dans différentes langues alphabétiques (Di Filippo et al., 2006; Helland & Morken, 2016; Papadopoulos et al., 2016; Torppa et al., 2017; Zoccolotti et al., 2016) ou non alphabétiques comme le chinois (Georgiou et al., 2016; Song et al., 2016), indépendamment du type de stimuli à nommer, alphanumériques (lettres, chiffres) ou non alphanumériques (objets, couleurs) (Landerl et al., 2013; Papadopoulos et al., 2016), et indépendamment de l'opacité de la langue (Landerl et al., 2013). Comme pour la conscience phonémique, la DRA entretient des rapports, bidirectionnels et modérés par le développement, avec la lecture (Peterson et al., 2018). En revanche, certaines méta-analyses suggèrent que la DRA de stimuli alphanumériques est plus fortement liée à la lecture que les stimuli non alphanumériques (Araújo et al., 2015; Song et al., 2016).

Le lien entre lecture et DRA a été confirmé par une intervention qui a montré qu'un entraînement de la fluidité de la lecture améliore la DRA (Wolff, 2014). D'après Wolf et Bowers (1999), la conscience phonologique et la dénomination rapide représentent deux capacités distinctes associées aux difficultés de lecture des LD. Ces auteurs ont proposé un

modèle de *double déficit* qui distingue trois sous-types de LD : le sous-groupe « vitesse » avec un déficit de DRA, sans trouble phonologique, le sous-groupe « phonologie » avec un déficit phonologique uniquement et le sous-groupe « double déficit » avec un déficit en DRA et un trouble phonologique. La DRA paraît donc reliée aux difficultés de lecture de façon sensiblement différente de celle de la conscience phonologique car elle implique, non pas l'analyse des phonèmes, mais la récupération rapide de la forme phonologique d'un mot stockée en mémoire à long terme. Cependant, au-delà de sa composante phonologique, d'autres processus neurologiques et cognitifs comme les mouvements oculaires saccadés, la reconnaissance perceptive, les déplacements de l'attention visuelle, la mémoire de travail, l'accès lexical et la planification articulatoire (Norton & Wolf, 2012) en font un "microcosme de la lecture" qui nécessite une intégration multimodale rapide (Georgiou et al., 2016). Fait intéressant, la vitesse de traitement, la mémoire de travail et l'attention jouent un rôle important en tant que processus distaux dans la relation entre la DRA et la lecture (Papadopoulos et al., 2016). Les différents processus linguistiques, visuels et attentionnels impliqués dans la fluidité de la lecture seraient donc stimulés lors d'une tâche de DRA pour agir sur la vitesse de lecture. Toutefois, les premiers résultats concernant l'entraînement de la DRA ont été mitigés (Kirby et al., 2010). Par exemple, de Jong et Vrieling (2004) n'ont pas trouvé d'effets, Marinus et al. (2012) ont trouvé quelques effets mais qui ne se sont pas généralisés à la lecture. Cependant, ces entraînements étaient conçus sur la base d'outils papier-crayon sans contraintes de temps et sans algorithmes d'entraînement auto-adaptatifs et intensifs. De plus, la relation entre la lecture et la DRA n'étant pas constante tout au long du développement (Protopapas et al., 2013), il est probable que les différences d'âges aient masqué les effets de cet entraînement.

Plus récemment, une étude a mis en évidence une amélioration des capacités de lecture après un entraînement à l'aide d'un outil numérique *Run the Ran* (Pecini et al., 2019), conçu pour améliorer la DRA. Ce *serious game* consiste en une présentation en séries d'images sur

des matrices de 20 à 50 images dans lesquelles 5 stimuli sont répétés au hasard, avec une contrainte temporelle progressive. Les images sont présentées au sein de matrices qui favorisent l'automatisation du balayage visuel de gauche à droite et le passage à la ligne inférieure, comme lors de la lecture d'un texte. Plusieurs paramètres permettent de moduler la complexité du traitement visuel (taille du stimulus), la charge de l'attention visuelle (distance inter-stimulus), la difficulté d'accès lexical (fréquence lexicale du nom des images) et la difficulté de planification phonologique (complexité phonologique du nom des images) afin d'adapter les stimuli individuellement. Pendant l'entraînement, l'enfant doit conserver la vitesse de dénomination fournie automatiquement par l'ordinateur. Lorsque les performances de dénomination atteignent une précision d'au moins 97 %, la vitesse de dénomination est augmentée en réduisant le temps de présentation des stimuli d'environ 50 ms. Le temps de présentation des stimuli est géré selon deux modalités : soit une image apparaît seule à l'écran puis disparaît, soit toutes les images sont présentes sur l'écran et un curseur rouge passe automatiquement d'un stimulus au suivant. Quarante-cinq enfants LD italiens, âgés de 7 à 10 ans sont répartis dans 2 groupes : 24 enfants LD dont les scores au test de DRA étaient inférieurs ou égaux à 1.5 écarts-types en dessous de la moyenne ont suivi un entraînement avec ce programme *Run the Ran* et 23 enfants LD dont les scores en DRA n'étaient pas altérés ont suivi un entraînement numérique en lecture répétée *Reading Trainer* dont l'efficacité a été validée (Tucci et al., 2015). L'entraînement *Reading Trainer* propose de lire différents textes narratifs sur l'écran à une vitesse prédéfinie qui augmente progressivement en fonction des compétences de lecture de chaque enfant. La difficulté des textes narratifs augmente en fonction de la longueur du texte ou de la complexité et de la fréquence des mots. La taille et l'espacement des lettres sont définis individuellement afin de rendre la tâche de lecture facile et agréable. La durée totale des interventions est d'environ 8 heures pour *Run the Ran* et de 12 heures pour *Reading Trainer*. La durée des sessions était adaptée aux capacités de DRA et aux capacités

attentionnelles de chaque enfant (3 à 5 fois par semaine, 5 à 15 minutes par sessions pendant 3 mois). Les deux interventions sont menées à domicile. La vitesse et la précision de la lecture se sont améliorées pour les deux interventions, allant dans le sens qu'une intervention intensive ciblant un processus cognitif sous-jacent comme la DRA peut être aussi efficace qu'une intervention intensive ciblant la lecture.

Dans le même ordre d'idées, Vander Stappen & Reybroeck (2018) ont évalué les effets d'un entraînement de la DRA en les comparant aux effets de l'entraînement de la conscience phonémique chez 36 LD francophones belges âgés de 7 ans. Les sessions d'entraînement de 25 minutes ont lieu à l'école deux fois par semaine, pendant 2 mois. Les participants répartis aléatoirement dans deux groupes ($n = 18$) d'entraînement, soit de la DRA soit de la conscience phonémique, sont comparés sur plusieurs mesures : la conscience phonémique, la DRA, la lecture de mots et l'orthographe de mots, avant et immédiatement après l'intervention, et 6 mois plus tard. Deux types de matrices sur un support « papier » sont utilisés pour l'entraînement de la DRA : les matrices *DRA-R* (DRA répétée) sont composées de quelques éléments apparaissant plusieurs fois (trois éléments répétés huit fois ou six éléments répétés quatre fois) et les matrices *DRA-NR* (DRA non répété) comprennent 24 items différents. Les huit premiers entraînements utilisent des matrices *DRA-R*. Les huit derniers utilisent des *DRA-NR*. Le niveau de difficulté varie progressivement en fonction de la longueur et de la complexité de la structure syllabique des mots. Les enfants sont motivés par différents jeux : petite coccinelle mécanique, jeu de course relais, énigme à résoudre. L'entraînement de la conscience phonémique est précédé par un entraînement de la segmentation, du comptage et de l'identification syllabique, puis par un entraînement de la correspondance graphème-phonème en associant des personnages les « Alphas », correspondant aux graphèmes et aux phonèmes (Huguenin, 1999). Puis, des tâches de discrimination, d'identification, de position, de segmentation, de suppression, d'inversion, d'addition et de permutation phonémiques sont entraînées uniquement à l'oral, selon une

progression bien définie (mots simples/pseudomots, syllabes simples/syllabes complexes). L'efficacité des deux interventions est spécifique au processus entraîné. L'intervention sur la conscience phonémique montre des effets de transfert sur les processus sublexicaux de l'orthographe (i.e., l'orthographe phonologique), tandis que l'intervention sur la DRA améliore la vitesse de lecture des mots.

Résumé 2.2

Remédiation des déficits du traitement phonologique

L'hypothèse causale selon laquelle un déficit spécifique de traitement des représentations phonologiques altère l'association graphème-phonème est considérée, à ce jour, comme la plus robuste par l'ensemble de la communauté scientifique (Melby-Lervåg et al., 2012; Ramus, 2003; Snowling et al., 2020; Sprenger-Charolles et al., 2013). Les lecteurs dyslexiques présentent des déficits de la conscience phonologique et plus particulièrement de la conscience phonémique, mais aussi de la mémoire verbale à court terme et de la vitesse d'accès aux représentations lexicales et phonologiques d'items familiers. Des remédiations ciblant ces déficits phonologiques améliorent les compétences en lecture. Les activités de conscience phonémique, décrites comme les plus efficaces, sont la fusion et la segmentation de phonèmes, à condition que le phonème soit associé à la présentation visuelle du graphème (Torgesen et al., 2001).

Un entraînement intensif, systématique et explicite de la conscience phonémique et des correspondances lettres-sons est recommandé (Ehri et al., 2001; Galuschka et al., 2014; Torgesen et al., 2001). Cependant, pour les LD les bénéfices sont moindres et les effets restent modérés à court terme et faibles à long terme (Suggate, 2016). De plus, environ 50 % des LD ne conservent pas les progrès acquis et ceux qui les conservent, ne parviennent pas à obtenir des compétences en lecture équivalentes à leur niveau scolaire (Gabrieli, 2009). Pour les LD résistants à l'intervention phonologique, il semble alors nécessaire de s'interroger et de vérifier leurs capacités de traitement auditif, visuel et audio-visuel.

2.2. Intervention sur le traitement auditif

L'hypothèse que le déficit de traitement phonologique décrit chez les LD pourrait être la conséquence d'un déficit de traitement perceptif des paramètres acoustiques de base du signal de parole a également été débattue (Ahissar et al., 2000; Lachmann et al., 2005; Richardson et al., 2004; Ziegler et al., 2009). En effet, Ramus et Szenkovits (2008) constate au début de leur démonstration que le déficit phonologique en réception (discrimination auditive de pseudomots) est légèrement plus important que le déficit phonologique en production (répétition de pseudomots), ce qui plaiderait en faveur d'un déficit de traitement perceptif à l'origine du déficit phonologique, autrement dit d'une altération des représentations phonologiques. Néanmoins, Ramus et Szenkovits poursuivent leur démonstration en soulignant que le déficit phonologique en production et en réception n'apparaît que si la charge en mémoire de travail augmente (i.e la longueur des items), ce qui plaiderait plutôt en faveur d'un déficit d'accès aux représentations phonologiques, responsable du handicap en lecture. Par conséquent, les représentations phonologiques ne seraient pas altérées (Suggate, 2016). Ainsi, les difficultés de traitement perceptif auditif n'auraient pas d'impact sur le traitement phonologique et ne joueraient pas un rôle causal dans les troubles d'apprentissage de lecture (Hämäläinen et al., 2012).

Toutefois, de nombreux travaux mettent en évidence chez les LD, un déficit de traitement temporel auditif associé au déficit de la conscience phonologique (Goswami, 2011; Serniclaes et al., 2004; Tallal, 1980) ou un déficit de traitement temporel visuel et auditif, associé au déficit de la DRA (Zettler, 2007). Pour apprendre à lire dans un système d'écriture alphabétique, le signal de parole quasi-continu doit d'abord être segmenté en unités de phonèmes, distinctes et spécifiées, afin de les associer à leurs graphèmes correspondants. Or, certains LD présentent des déficits de perception de la parole (pour une revue, voir McBride-Chang, 1995) et des difficultés à extraire des représentations phonologiques à partir de caractéristiques phonétiques

intégrées dans le signal de parole (Manis et al., 1997). Ainsi de nombreux déficits du traitement auditif sont décrits chez les LD et chez les enfants à risque de développer une DD : des déficits de la perception catégorielle des consonnes occlusives, des déficits de perception des signaux acoustiques de la prosodie de la parole et des déficits de perception de la parole dans le bruit (Boets et al., 2007). Pour certains auteurs, ces troubles de perception des stimuli linguistiques semblent sous-tendus par des déficits de mécanismes perceptifs auditifs de bas niveau de stimuli non linguistiques qui englobent un large éventail de capacités spectro-temporelles complexes (e.g., Amitay et al., 2002; Ramus, 2003; Rosen & Manganari, 2001). Ainsi, certains LD ont des difficultés à traiter temporellement les stimuli brefs et rapides, linguistiques et non linguistiques (pour une revue, voir, McArthur & Bishop, 2001). D'autres LD ont une perception altérée des aspects dynamiques du signal auditif comme les modulations d'amplitude et de fréquence (Menell et al., 1999; Talcott et al., 2000, 2002; Van Ingelghem et al., 2005; Witton et al., 1998). Enfin, un ralentissement du déplacement de l'attention auditive ou *Sluggish Attentional Shifting* (Hari & Renvall, 2001; Lallier et al., 2010) a également été relevé dans le traitement temporel et rapide des informations auditives.

Le traitement auditif perceptif de la parole

Les potentiels évoqués sont les réponses électriques à un traitement auditif, enregistrées par l'électroencéphalogramme (EEG), avec une forte amplitude observée au niveau des lobes temporaux et frontaux. La négativité de discordance, *MisMatch Negativity*, composante du potentiel évoqué, est un indice de discrimination de *bas niveau* des sons. Lorsqu'un changement soudain de fréquence, d'intensité ou de hauteur se produit dans une séquence de stimuli auditifs répétitifs, une onde négative renforcée apparaît sur l'EEG. La *MisMatch Negativity* est un indicateur efficace et précis de la capacité de perception des informations auditives par le cerveau. D'après une récente méta-analyse (Gu & Bi, 2020), les enfants et adultes LD

présentent une amplitude *MisMatch Negativity* significativement réduite dans le traitement auditif de la parole. Il en est de même des nourrissons et enfants d'âge préscolaire à risque de développer une dyslexie (pour une revue, voir Volkmer & Schulte-Körne, 2018).

Déficit de traitement de la perception catégorielle

La perception catégorielle des sons de parole est la capacité à percevoir les différences entre les phonèmes tout en ignorant les différences acoustiques entre les variantes d'un même phonème, nommées unités subphonémiques ou allophones (Liberman et al., 1957). Les auditeurs normaux présentent une perception catégorielle de la parole selon certains contrastes phonétiques tels que les différents points d'articulation (par exemple /ba/ versus /da/) ou les différences de voisement et de non-voisement (par exemple /ba/ versus /pa/). Or, plusieurs études suggèrent que ces contrastes phonétiques sont moins bien perçus par certains LD (voir la méta-analyse de Noordenbos & Serniclaes, 2015, et la revue de Serniclaes, 2018) et que ces derniers auraient par conséquent une perception catégorielle plus faible que les NL. Plus précisément, leur discrimination des différences acoustiques à travers les frontières phonémiques est plus faible alors que leur discrimination des différences acoustiques au sein d'une même catégorie de phonèmes est meilleure. Par conséquent, certains LD ont des capacités de discrimination supérieures à celles des NL pour les stimuli intra-catégoriels et analysent les variantes allophoniques d'un même phonème comme des phonèmes distincts (Bogliotti et al., 2008; Serniclaes et al., 2015).

Entre 1981 et 2010, 64 % des expériences rapportées dans la littérature scientifique confirment un déficit de perception catégorielle des LD comparés aux NL pour les tâches d'identification et de discrimination des consonnes occlusives (Vandermosten et al., 2011). Des études ont également montré une perception catégorielle plus faible chez les enfants de trois ans (Gerrits, 2003) et les nourrissons de six mois (Richardson et al., 2003) à risque de dyslexie.

Toutefois, d'autres études n'ont pas mis en évidence un déficit de la PC chez les LD (e.g., Blomert & Mitterer, 2004; Brandt & Rosen, 1980) ou n'ont observé un déficit de la PC que chez les LD présentant de sévères déficits phonologiques ou linguistiques (Joanisse et al., 2000; Manis et al., 1997).

Cette variabilité de la mise en évidence d'un déficit de la perception catégorielle chez les LD peut avoir deux explications. La première est que des enregistrements de la *mismatch negativity* confirment la présence d'une perception allophonique, même lorsqu'elle n'apparaît pas dans les données comportementales chez les enfants à risque de présenter une dyslexie (Noordenbos et al., 2012) et chez les adultes LD (Noordenbos et al., 2013). La deuxième explication est que la perception catégorielle est évaluée par des tâches d'identification et de discrimination de stimuli sonores variant le long d'un continuum acoustique. La tâche d'identification mesure la capacité à identifier un phonème à partir d'un stimulus acoustique. La tâche de discrimination mesure la capacité à juger deux segments acoustiques du continuum comme similaires ou différents. Bien que le déficit de perception catégorielle soit plus facilement mis en évidence avec une tâche de discrimination, il n'apparaît pas toujours avec une tâche d'identification. Le type de tâche utilisée dans les différentes études peut donc en partie expliquer la variabilité des résultats mettant en évidence un déficit de perception catégorielle (Noordenbos & Serniclaes, 2015). Ainsi, le déficit du traitement phonologique des sons pourrait donc être, au moins pour certains LD, la conséquence d'un déficit de la perception catégorielle dû à une perception allophonique des sons de la parole en unités subphonémiques.

De récents travaux (Zoubrinetzky et al., 2019) proposent une intervention pour améliorer la capacité de perception catégorielle des phonèmes, à l'aide du logiciel *RapDys* (Collet, Colin, & Serniclaes, 2017) avec des effets positifs sur les compétences en lecture et en conscience phonémique. Ce logiciel est conçu pour entraîner à discriminer et/ou à identifier des différences acoustiques de plus en plus fines entre deux phonèmes différents. Le

délai d'établissement du voisement (*Voice Onset Time* ou *VOT* ou temps d'attaque vocal) évolue des pics allophoniques à +/- 75 ms *VOT* aux pics phonémiques à +/- 5 ms *VOT*. En fonction des performances initiales du LD et de sa réponse aux entraînements, le logiciel permet de réduire progressivement la distance acoustique entre deux phonèmes /d/ et /t/ autour de la frontière phonémique de voisement (voir chapitre 5, section 1.4 pour une description détaillée de ce logiciel). L'étude de Zoubrinetzky et al. (2019) est menée auprès de 45 enfants LD français âgés en moyenne de 10 ans 7 mois, répartis aléatoirement en deux groupes. Le premier groupe de 23 LD effectue un entraînement ciblant la perception catégorielle avec le logiciel *RapDys*, suivi d'un entraînement ciblant l'empan visuo-attentionnel avec le logiciel *Maeva* (M. Lobier, 2008). Le deuxième groupe de 22 LD effectue les mêmes entraînements dans l'ordre inverse, selon un design expérimental en cross over. La durée de l'intervention est de 6 semaines, 5 jours par semaine et 15 minutes par jour. L'entraînement de la perception catégorielle met en évidence des effets sur la conscience phonémique (d de Cohen = 1,20), sur l'empan visuo-attentionnel ($d = 0,63$), sur les compétences en lecture de texte ($d = 0,45$), sur les compétences en lecture de mots réguliers ($d = 0,46$), de mots irréguliers ($d = 0,43$) et de pseudo-mots ($d = 0,55$) sont relevés. Ces résultats soutiennent un lien causal entre la perception catégorielle et la conscience phonémique, déjà établi pour les NL (Moore et al., 2005) et les enfants présentant un trouble développemental du langage oral (Collet et al., 2012).

Selon Serniclaes et al. (2021), le déficit de perception catégorielle des phonèmes pourrait s'expliquer par la théorie du *Temporal Sampling Framework* (Goswami, 2011) selon laquelle les LD perçoivent le signal acoustique avec une acuité temporelle plus élevée. En effet, les réponses neuronales atypiques du LD aux modulations de fréquences relativement élevées (*beta* - *gamma*) auraient pour conséquence directe la perception allophonique d'unités subphonémiques (Giraud & Ramus, 2013). Les générateurs cérébraux oscillant à des taux plus élevés entraîneraient la désynchronisation entre les rythmes électriques neuronaux et les

rythmes de la parole, désynchronisation à l'origine du déficit de la perception catégorielle, mais aussi à l'origine d'un grand nombre de déficits mis en évidence dans la dyslexie (Goswami, 2011, 2015).

Déficit de perception de la parole dans le bruit

Le déficit de perception de la parole dans le bruit interne ou externe est également un déficit fondamental des mécanismes perceptifs de bas niveaux décrits chez les LD (Calcutt et al., 2018). Ce déficit peut se traduire par des difficultés de perception de la parole et en particulier de la parole dégradée ou de la parole dans le bruit et a été décrit chez des LD adultes, chez les enfants LD d'âge scolaire et chez les enfants d'âge préscolaire à risque de difficulté d'apprentissage du langage écrit (voir Boets et al., 2007; Bradlow et al., 2003; Brady et al., 1983; Do Carmo Blanco et al., 2018; Ziegler et al., 2009). La perte d'information peut atteindre 10 % des mots entendus par rapport à leurs pairs, pour les enfants d'âge préscolaire à risque (Boets et al., 2007). Le bruit de fond présent dans une classe pourrait donc entraver le traitement des informations données oralement et altérer le développement du langage oral et écrit, les compétences phonologiques et la réussite scolaire en général pourront être altérés.

Une stratégie d'amélioration de la perception de la parole dans le bruit a récemment été expérimentée auprès de 30 enfants LD de langue néerlandaise de 9 à 12 ans et 29 enfants normolecteurs en modifiant l'enveloppe de la parole par la technologie vocale utilisée dans les implants cochléaires (Van Hirtum et al., 2021). Déjà validée auprès d'adultes LD (Van Hirtum et al., 2019), cette stratégie d'intervention amplifie automatiquement les temps de montée ou *rise time* de l'amplitude et les modulations du signal de parole pour renforcer la structure temporelle de l'enveloppe de la parole. L'exagération de ces repères temporels de la parole (après écoute de 200 phrases) améliore en temps réel la perception de la parole dans le bruit chez les enfants LD et la normalise, en rétablissant la synchronisation entre les rythmes électriques neuronaux et les rythmes de la parole. Ces résultats soutiennent l'idée d'une

contribution importante de la structure temporelle de l'enveloppe prosodique dans le déficit de la perception de la parole dans le bruit chez les enfants LD (Goswami, 2011). Van Hirtum et al. (2019) concluent que des interventions basées sur l'entraînement auditif du rythme de la parole pourraient être une perspective intéressante de remédiation des déficits du traitement temporel auditif dans la DD.

Le traitement auditif temporel

L'hypothèse que le déficit de perception spécifique de la parole serait en fait la conséquence d'un déficit plus global de traitement des signaux auditifs temporels rapides non linguistiques, est aussi évoquée pour expliquer le déficit de lecture de certains enfants et adultes LD (Vandermosten et al., 2010, 2011). D'après la revue systématique de Hämäläinen et al. (2012), les enfants et adultes LD présentent en effet des déficits auditifs de traitement non linguistique détectés en utilisant le paradigme actif, *Late Discriminative Negativity*. Toutefois, une récente méta-analyse (Gu & Bi, 2020) n'a pas mis en évidence ces déficits chez l'enfant LD en utilisant le paradigme passif *MisMatch Negativity*. Soulignons que le paradigme passif *MisMatch Negativity* permet de détecter uniquement des traitements auditifs sensoriels et reflète donc plus spécifiquement le traitement auditif de bas niveau à une étape « pré-attentionnelle », en évitant les confusions avec d'autres facteurs comme le traitement attentionnel (Schulte-Körne & Bruder, 2010). En revanche, le paradigme actif de détection du déficit *Late Discriminative Negativity*, permet de détecter également des traitements auditifs attentionnels. En utilisant d'autres indicateurs comme les ondes P300 ou N1, il serait alors possible de distinguer un déficit de traitement auditif versus un déficit de traitement attentionnel ou pré-attentionnel (Schulte-Körne & Bruder, 2010). Les déficits de traitement temporel auditif pour expliquer les troubles de la lecture pourraient donc être interprétés soit comme un déficit perceptif de bas niveau (Casini et al., 2018), soit comme un déficit attentionnel (Hari & Renvall,

2001), soit comme un déficit à plusieurs échelles temporelles interconnectées allant de 4 Hz à 500 Hz (Amitay et al., 2002). Nous décrivons ici des remédiations visant à réduire deux types de déficit de traitement auditif temporel : le déficit de perception du rythme de la parole et le déficit du traitement auditif temporel rapide.

Déficit de perception du rythme

En lien avec la théorie du *Temporal Sampling Framework* (cf. section 2.1.2 *Les modèles en cascades*), un déficit de perception des signaux acoustiques qui sous-tendent le rythme de la parole, le tempo et l'accentuation chez les LD est décrit comme un déficit de traitement auditif temporel. L'altération de la perception des modulations d'amplitude et plus particulièrement du *rise time* entraînerait des difficultés à s'appuyer sur les indices prosodiques de la parole. Cette altération perturberait alors l'extraction des syllabes, entraverait le développement de la conscience phonologique et secondairement l'apprentissage des règles de conversion graphème-phonème (Goswami, 2015). Les *rise time*, composants acoustiques temporels, permettent le traitement de la structure rythmique des sons vocaux et non vocaux, tels que musicaux. Or, le traitement rythmique de sons non vocaux (e.g., métronome à 2hz) et du rythme musical serait également affecté chez les LD (Goswami et al., 2013; Huss et al., 2011). Puisque la capacité à percevoir le rythme serait un bon prédicteur des capacités de lecture (Huss et al., 2011; Thomson & Goswami, 2008), des stimulations rythmiques auditives pourraient améliorer le traitement de l'information visuelle alphabétique présentée simultanément (Bolger et al., 2014).

Considérons, par exemple, l'intervention musicale pour réduire les difficultés de perception rythmique et de *rise time*, proposée par Thomson et al. (2013). Comparée à un groupe contrôle de 12 LD sans entraînement, cette intervention basée sur un entraînement rythmique (durée de 6 semaines, 30 minutes, une fois par semaine) auprès de 9 LD anglophones

d'âge moyen de 9,4 ans a eu un effet positif significatif et spécifique sur les capacités de conscience phonologique, de la même ampleur que l'effet mesuré auprès de 12 LD entraînés à la discrimination de phonèmes ($n = 12$). Cet entraînement rythmique comprenait des activités musicales (e.g., copie de rythme et synchronisation de rythme sur des tambours et des jeux sur ordinateur, à savoir une tâche adaptative de discrimination du temps de montée en amplitude, le jeu prosodique *Dee-Dee task* ainsi qu'un jeu de synchronisation de temps de montée d'amplitude. La *Dee-Dee task* (Goswami et al., 2010) est un jeu d'association de noms dans lequel le nom cible est remplacé par la syllabe réitérative /dee/, afin d'éliminer les informations phonétiques distinctives tout en conservant l'accent, le rythme et l'intonation du nom d'origine. Néanmoins, selon les auteurs, les effets rapportés en lecture et en orthographe n'étaient pas statistiquement significatifs, certainement en lien avec la courte durée de l'intervention.

D'une durée supérieure (8 semaines, 25 minutes, 2 fois par semaine), une autre intervention musicale ciblant la perception du rythme, l'accentuation des syllabes et la discrimination du *rise time* par un entraînement musical auprès de 10 LD anglais âgés de 6 à 7 ans, rapporte, contrairement à l'étude précédente, un effet positif significatif sur l'orthographe, le traitement auditif et la mémoire de travail verbale, en comparaison à un groupe contrôle de 9 enfants LD entraînés avec GraphoGame (Bhide et al., 2013). Cette intervention musicale comprend des activités consistant à taper sur une barre d'espace en même temps qu'un métronome, discriminer différents tempos du métronome, discriminer et reproduire des rythmes courts, discriminer les temps de montée, applaudir et marcher au rythme d'une chanson, chanter, applaudir, écouter un poème, répondre à des questions sur son rythme, et la « *Dee-Dee task* ». Toutefois, le faible nombre de participants relativise les résultats obtenus.

En France, des améliorations significatives de la lecture, de la conscience phonologique et de l'attention auditive sont relevées chez 12 LD français âgés de 7 à 12 ans après une intervention musicale plus intensive d'une durée totale de 18 heures (6 semaines, 3 heures par

semaine) et persistent au moins 6 semaines après l'entraînement (Habib et al., 2016). Cette intervention musicale comprend des tâches de perception et de reproduction de rythmes, de hauteur, de durée, de tempo et de pulsation selon des modalités auditives, visuelles et motrices. Fait intéressant, une autre intervention intensive de même durée (18 heures) mais effectuée en trois jours, avec le même entraînement auprès de 12 enfants LD âgés entre 8,2 ans et 11,7 ans, relève une amélioration significative de la perception catégorielle, en comparaison à un groupe contrôle de 22 NL (Habib et al., 2016). Ainsi, l'amélioration de la lecture, de la conscience phonologique et de l'attention auditive relevée à la première intervention pourrait être en lien avec l'amélioration de la perception catégorielle. Ce constat va dans le sens de l'hypothèse qu'un déficit de la perception catégorielle des phonèmes pourrait s'expliquer par la théorie du *Temporal Sampling Framework*, évoquée par Willy Serniclaes (2021) et déjà énoncée précédemment.

Plus solide sur le plan méthodologique, un essai contrôlé randomisé (Cogo-Moreira et al., 2013) a été mené auprès de 235 LD Brésiliens âgés de 8 à 10 ans (durée de 5 mois, 3 sessions de 50 minutes par semaine). Cette intervention proposée en groupe est en fait une éducation musicale composée d'activités d'improvisation musicale, de composition et d'interprétation, en encourageant les enfants à créer leur propre musique en manipulant des paramètres musicaux comme le rythme, la mélodie et l'harmonie. La lecture de mots et de textes, la conscience phonologique, les résultats scolaires en portugais et en mathématiques se sont améliorés de manière significative dans le groupe d'éducation musicale (n = 114), comparés à ceux du groupe contrôle sans intervention musicale (n = 121).

Pour conclure et élargir le débat, un autre fait intéressant est que les oscillations de la bande delta du cortex auditif régissent l'amplitude de la bande bêta du cortex moteur (Arnal et al., 2015) lors de la danse ou du tapotement d'un rythme, chez l'adulte normolecteur. Ainsi, un lien pourrait être établi entre l'aspect auditif et l'aspect moteur du rythme. De plus, autre fait

intéressant, chez l'humain et le singe, les informations rythmiques visuelles modulent automatiquement les oscillations auditives à la phase optimale pour le traitement de la parole, fournissant un indice supplémentaire et intermodal pour la réinitialisation de la phase (Schroeder et al., 2008). Ces constats confirment l'aspect multisensoriel du traitement auditif de la parole et par conséquent, plus tard, de la lecture.

Déficit du traitement auditif temporel rapide

Une autre hypothèse, celle de la théorie du traitement auditif rapide (TAR) a été proposée pour expliquer les déficits de traitement phonologique chez le LD (Tallal, 1980). Un déficit du TAR est un déficit du traitement temporel de signaux auditifs non vocaux rapides (intervalles inter-stimuli inférieurs à 200 ms) et brefs (inférieurs à 75 ms) (Tallal, 1980). Or, le TAR est particulièrement impliqué dans le traitement de la parole, composée de stimuli rapides et brefs. En altérant la perception des sons rapides et brefs de la parole, le déficit de TAR réduirait la capacité à percevoir avec précision les éléments critiques du flux de parole et perturberait l'encodage des sons de la parole nécessaire au développement de représentations phonologiques non altérées et à l'acquisition de la lecture (Goswami, 2011; Heim et al., 2001; Meyler & Breznitz, 2005; Tallal, 1980). En faisant varier l'intervalle de temps entre deux sons entendus qui doivent être discriminés par le participant, le test de jugement d'ordre temporel mesure le TAR (Tallal, 1980). Un déficit apparaît pour les intervalles de sons inférieurs à 150 ms, uniquement chez les enfants LD de l'échantillon, alors que les enfants NL discriminent correctement les deux sons. Ces résultats suggèrent un déficit à percevoir les transitions rapides et brèves dans le signal de la parole (e.g., les transitions de formants et le voisement des consonnes occlusives de l'ordre de 40 ms). Toutefois, d'autres études concluent à une faible prévalence de ce déficit chez les LD (voir Ramus, 2003; White et al., 2006). Les remédiations ciblant le TAR, comme le programme *Fast ForWord*, sont associées à des entraînements des

procédures de lecture et donc seront abordées dans la section 2.4. *Remédiation combinée des déficits cognitifs sous-jacents et des procédures de lecture.*

Ici encore, l'interprétation d'un déficit du TAR chez les LD, peut être élargie. Pour expliquer les déficits du traitement temporel auditif de stimuli brefs et rapides présentés en série, Tallal (1980) postule l'hypothèse d'un déficit perceptif qui impliquerait des processus de bas niveau à une échelle temporelle de 3 Hz (Ramus, 2003; White et al., 2006). Or, cette interprétation initiale pourrait être réinterprétée par l'hypothèse d'un déficit attentionnel qui impliquerait des processus de haut niveau à une échelle temporelle de 30 Hz (Ramus & Ahissar, 2012). L'échelle de 3 Hz est pertinente pour l'identification de stimuli brefs et sériels, par exemple pour identifier /ba-/da/ par opposition à /da-/ba/ ; alors que l'échelle de 30 Hz est pertinente pour identifier la transition entre /ba/ et /da/. Cette interprétation d'un déficit attentionnel rejoint celle d'un déficit d'identification sérielle rapide décrit au niveau auditif et visuel et plus globalement rejoint celles d'un déficit du déplacement temporel et spatial de l'attention perceptive (Hari & Renvall, 2001). Majoritairement décrit en modalité visuelle, ce déficit a néanmoins aussi été évoqué en modalité auditive.

Le traitement auditif attentionnel

Le rôle hypothétique des oscillateurs cérébraux dans l'attention auditive (e.g., Jones et al., 2002; Schwartz et al., 2011), et le rôle de l'attention auditive dans la perception du temps (e.g., Taatgen et al., 2007) ont été très longtemps discutés. Selon Goswami (2011), le cadre théorique de l'échantillonnage temporel ou *Temporal Sampling Framework* permettrait de prédire qu'un traitement auditif temporel inefficace affecterait nécessairement l'attention auditive et le déplacement de l'attention. Ainsi, les difficultés à former une représentation interne de la synchronisation rythmique affecteraient le développement de l'attention auditive (Goswami et al., 2013). Par conséquent, le cadre conceptuel du *Temporal Sampling Framework*

pour expliquer la DD peut intégrer les déficits attentionnels et phonologiques dans un seul système explicatif « en cascade ».

Le rôle primaire du déficit de traitement perceptif temporel auditif (mais aussi visuel) sans implication de processus attentionnels ou de processus d'ancrage perceptif a, en effet, été mis en évidence chez des LD français (Casini et al., 2018). Ces auteurs ont émis l'hypothèse que les LD présentaient un déficit spécifique amodal auditif et visuel de l'*horloge interne* (Gibbon et al., 1984), en accord avec la théorie du *Temporal Sampling Framework*.

Pourtant, d'autres études ont évoqué le rôle primaire d'un ralentissement du déplacement de l'attention auditive⁷ (Facoetti et al., 2010; Hari & Renvall, 2001; Lallier et al., 2010). Au niveau temporel, il s'agit d'un ralentissement du déplacement de l'attention auditive dans des tâches de détection d'alternance des sons lors de l'écoute de séquences de stimuli sonores binauraux se succédant à un rythme de plus en plus rapide. L'alternance des sons n'est plus perçue à un intervalle de 100 ms chez le NL alors que cet intervalle est de 200 ms chez le LD (Hari & Renvall, 2001). Au niveau spatial, il s'agit d'un ralentissement du déplacement de l'attention auditive (Facoetti et al., 2010) dans des tâches de détection d'une cible auditive dans l'oreille droite ou gauche en condition d'indication spatiale auditive valide ou non valide (voir Posner, 1980). L'hypothèse serait alors que le ralentissement du déplacement temporel et/ou spatial en modalité auditive perturbe l'analyse auditive de la séquence phonémique des mots perçus et par conséquent, altérerait les représentations phonologiques, la conscience phonologique et la lecture.

Par conséquent, toutes les interventions basées sur le rythme et la musique citées dans la section précédente pourraient également améliorer le déplacement de l'attention auditive. D'ailleurs, Flaunacco et al. (2015), en montrant qu'un entraînement musical basé sur le rythme a de forts effets bénéfiques sur la conscience phonologique et la lecture chez les LD, ont évoqué

⁷ Nous décrivons également dans la section suivante le rôle du ralentissement du déplacement de l'attention visuelle.

la possibilité qu'une amélioration des compétences rythmiques pourrait se traduire par une amélioration du traitement auditif, de la sensibilité prosodique et phonémique, des capacités de séquençage, de l'orientation temporelle de l'attention auditive, et certainement plus. Dans le même ordre d'idée, d'autres auteurs ont mis en évidence qu'une écoute d'une amorce musicale avec une pulsation saillante à 2 Hz peut moduler la distribution de l'attention temporelle et stimuler les oscillations cérébrales (e.g., Schön & Tillmann, 2015).

Résumé 2.3

Déficit du traitement auditif

Plusieurs raisons interdépendantes peuvent expliquer les nombreuses divergences sur l'implication et la nature du déficit de traitement auditif dans les DD. La première raison est sans doute l'absence de consensus sur la définition et le diagnostic du trouble du traitement auditif, en lien avec l'extrême complexité de la structure, de l'organisation et de la spécificité du système auditif central (Dawes & Bishop, 2009). La deuxième raison serait la différence des niveaux de traitement perceptif ou attentionnel décrits pour expliquer les déficits de traitement de l'information auditive. La troisième raison serait la différence d'interprétation de ces déficits. Les méta-analyses sont contradictoires et interprètent différemment les résultats soit en termes de déficits perceptifs soit en termes de déficits attentionnels en fonction du paradigme utilisé pour détecter le déficit (Gu & Bi, 2020 ; Hämäläinen et al., 2012). Toutefois, des réponses interventionnelles ont été validées à chacun de ces niveaux de déficit du traitement auditif.

Dawes et Bishop (2009) concluent dans leur revue critique que, même si les déficits auditifs ne constituent pas une cause suffisante et nécessaire des troubles de la lecture, ils pourraient constituer un facteur de risque de la DD. De fait, seulement certains LD présentent un déficit du traitement auditif et la nature du déficit varie individuellement. Certaines formes de déficits du traitement auditif sont plus importantes que d'autres, en fonction de l'aspect du traitement altéré. Par conséquent, les déficits de traitement auditif peuvent majorer le trouble de la lecture mais ne suffisent pas à l'expliquer. Ils s'inscrivent dans une approche multimodale de la DD où d'autres déficits cognitifs interviennent pour altérer la lecture, comme les déficits de traitement phonologiques, visuels ou audio-visuels (Boets et al., 2007).

2.3. Intervention sur le traitement visuel

Comme pour les déficits de traitement de l'information auditive, de nombreux travaux ont également étudié l'implication des déficits du traitement de l'information visuelle au niveau perceptif et/ou attentionnel dans l'étiologie de la dyslexie développementale. Ces déficits visuels peuvent altérer le traitement séquentiel des lettres et la capacité à identifier, stocker et récupérer les lettres, générant un mauvais codage dans l'identification et la position des lettres. Trois principaux types de déficits visuels sont décrits dans le cadre des DD : les déficits visuels de bas niveau en lien avec le dysfonctionnement du système magnocellulaire visuel, les déficits du déplacement temporel et spatial de l'attention visuelle, les déficits visuo-attentionnels.

Ici encore, les interprétations des déficits de traitements visuels pour expliquer les troubles de la lecture diffèrent, comme nous l'avons déjà énoncé dans le chapitre 1, p.46, dans la description des modèles en *cascades*. La première interprétation postule qu'un déficit du système visuel magnocellulaire en lien avec un déficit de synchronisation neuronale des oscillations thêta serait un déficit de type *bottom up* : l'instabilité du contrôle oculomoteur perturberait le rythme du déplacement oculaire et des fixations pendant la lecture. La deuxième interprétation postule qu'un déficit de l'attention, lors du traitement visuel du texte, en lien avec un déficit de synchronisation des oscillations gamma faible, serait un déficit de type *top down* : l'altération de l'attention lors du traitement visuel du texte pourrait entraîner un déficit de synchronisation des oscillations gamma faible qui à leur tour entraîneraient un déficit de synchronisation sur une fréquence thêta des cellules de la voie magnocellulaire.

Les traitements visuels perceptifs de bas niveau

L'implication de déficits des traitements visuels de bas niveau a d'abord été mise en évidence par une atteinte structurale du système visuel magnocellulaire qui apparaît corrélée

aux troubles de la lecture (Livingstone, 1991). Des études histologiques confirment des anomalies structurelles des cellules du système magnocellulaire visuel du noyau géniculé latéral du thalamus alors que les cellules parvocellulaires ne présentent aucune anomalie chez les LD (Giraldo-Chica et al., 2015; Livingstone, 1991).

Cette atteinte peut entraîner différents symptômes comportementaux chez le LD comme une sensibilité réduite aux faibles contrastes à haute fréquence temporelle et faible fréquence spatiale, une sensibilité réduite aux mouvements, un trouble de la stabilité oculaire ou du contrôle oculomoteur et des troubles attentionnels (Boden & Giaschi, 2007). En explorant l'impact des déficits magnocellulaires sur la lecture, Laycock et Crewther (2008) décrivent comment la voie magnocellulaire contribue à l'intégration rapide de l'information visuelle lors de la lecture, via des processus spatiaux, temporels et attentionnels, y compris le contrôle, la direction et l'organisation des mouvements oculaires saccadés.

Le traitement des stimuli de faible contraste spatial et haute fréquence temporelle

Une voie magnocellulaire fonctionnant normalement est sensible aux motifs achromatiques à faible contraste (Kaplan & Shapley, 1986; Sclar et al., 1990). Certains LD présentent des seuils de contraste élevés pour discriminer la direction des motifs en mouvement par rapport aux motifs de fond stationnaires (pour une revue voir Lawton, 2019). Selon des études menées par Lawton (2000), le traitement des stimuli de faibles contrastes présentés en alternance rapide sur un damier composé de cases est altéré chez des LD. Ce traitement n'entraîne pas de réponse en phase des potentiels évoqués avec l'alternance de cases gris clair et gris foncé alors que le traitement des stimuli de forts contrastes permet une réponse en phase avec l'alternance de cases noires et blanches. Cette différence n'apparaît pas chez le NL et a inspiré des programmes de remédiation.

Dans le but d'améliorer la discrimination visuelle de mouvement de barres verticales sombres se déplaçant par rapport à un fond texturé stationnaire, Lawton (2016) a mené une intervention avec le programme *PATH to Reading* (durée 20 à 30 heures pendant 20 semaines), auprès de 26 LD anglophones, âgés en moyenne de 7 ans 4 mois. Cet entraînement de synchronisation visuelle a été comparé à un entraînement de synchronisation auditive, *Fast ForWord*, auprès de 6 LD et à un autre entraînement de lecture, *Learning Upgrade*, auprès de 26 LD. Le programme *PATH to Reading* consiste à faire varier progressivement les fréquences spatiales et temporelles des contrastes figure/fond. Le programme *Fast ForWord*, issu de la théorie d'un déficit du traitement auditif rapide (Tallal, 1980), consiste à allonger la durée des phonèmes grâce à de la parole générée numériquement et acoustiquement modifiée. Le programme *Learning Upgrade* consiste à développer les compétences en lecture par un programme vidéo animé. Les résultats mettent en évidence des améliorations significatives de la sensibilité aux contrastes à faible fréquence spatiale et haute fréquence temporelle, de l'attention, de la fluidité de la lecture et de la mémoire de travail après l'entraînement avec le programme *PATH to Reading*. De plus, l'entraînement visuel se montre plus efficace que l'entraînement auditif ou celui de la lecture pour améliorer l'attention.

Une sensibilité réduite au mouvement

Certains LD présentent une sensibilité réduite aux mouvements de points qui se déplacent dans le même sens sur un écran parmi des points se déplaçant aléatoirement sur le même écran. La détection de ces mouvements cohérents de points est alors plus tardive chez les LD comparée à la détection enregistrée chez les NL (voir la méta-analyse de Benassi et al., 2010). Des résultats comportementaux indiquent que les performances en détection de mouvement cohérent de points sont corrélées à la lecture de mots (Cornelissen et al., 1998) et de pseudomots (Gori et al., 2014), ainsi qu'à l'encodage de la position des lettres (Cornelissen et al., 1998). Ce

déficit de traitement du mouvement de points en modalité visuelle est également corrélé au déficit de traitement temporel de stimuli auditifs dynamiques de basses fréquences. De plus, les performances en modalité visuelle et auditive sont corrélées aux performances en lecture de pseudomots (Witton et al., 1998).

Ces résultats comportementaux sont associés sur le plan cérébral à un dysfonctionnement du gyrus temporal moyen (aire MT/V5) au niveau du cortex extrastrié (Demb et al., 1998; Eden et al., 1996) qui reçoit 90 % de projections magnocellulaires. De plus, des études relèvent que l'activité de l'aire MT/V5 des LD serait corrélée à leur vitesse de lecture et à leur compréhension de texte (Demb et al., 1998) alors que chez le NL cette activité de l'aire MT/V5 serait corrélée aux performances en lecture et aux compétences phonologiques (Ben-Shachar et al., 2007).

Afin de souligner l'importance des systèmes visuels de base et leur implication potentielle dans la remédiation de la lecture, Chouake et al. (2012) ont mené une intervention randomisée auprès de 35 adultes LD d'un âge moyen de 24 ans, de langue hébraïque. Après une intervention de 5 jours d'entraînement utilisant une tâche de détection de mouvement et une tâche de détection de formes, les compétences en lecture s'améliorent significativement chez 22 LD de cette cohorte par rapport à un groupe contrôle de 10 LD sans entraînement visuel. Il faut souligner que l'entraînement magnocellulaire de détection de mouvement présente un avantage par rapport à l'entraînement parvocellulaire de détection de formes car il est sélectivement lié aux mesures de précision de la tâche de décision lexicale.

Avec le même objectif, une autre intervention randomisée est menée auprès de 24 enfants LD âgés de 8 à 11 ans et de langue persane (Ebrahimi et al., 2019). Le groupe expérimental (n = 13) effectue un entraînement de la détection de mouvements, mais aussi un entraînement des saccades oculaires et de l'accommodation visuelle deux fois par semaine pendant 6 semaines à raison de 12 sessions de 30 à 40 minutes. Le groupe contrôle (n = 11) joue à un jeu vidéo pour

cuisiner des gâteaux. Les résultats du groupe expérimental mettent en évidence une amélioration de la détection du mouvement cohérent de points, du contrôle des saccades oculaires ainsi qu'une réduction des erreurs visuelles pendant la lecture et ces améliorations sont maintenues au moins un mois après l'arrêt de l'intervention. Aucun changement n'est relevé dans le groupe contrôle non entraîné.

La stabilité oculaire et le contrôle oculomoteur

Une instabilité de la fixation oculaire, un déficit du contrôle oculomoteur et du contrôle binoculaire ont été décrits chez certains LD et pourraient entraîner une perception instable des lettres qui va altérer le traitement de leur position dans le mot et donc la lecture (Stein, 2001, 2014). En l'absence de déficit, la stabilité oculaire et le contrôle oculomoteur permettent une perception stable des lettres et des mots pendant l'activité de lecture grâce au système visuel magnocellulaire qui contrôle les microsaccades (i.e. mouvements incessants de l'œil) et programme les mouvements oculaires. Une saccade oculaire correspond à un bref et rapide mouvement des yeux entre deux positions stables (i.e., les fixations). Le but d'une saccade oculaire est d'amener très rapidement l'image d'un objet sur la fovéa. La saccade peut être suivie d'une saccade de correction en cas d'imprécision vers le but visuel (i.e., une régression).

Ainsi, un déplacement du regard et de l'attention serait nécessaire pour focaliser les informations pertinentes sur la zone fovéale, seule zone rétinienne en capacité d'analyser finement les signes linguistiques (e.g., la différence entre les lettres [O] et [Q]) (Muneaux & Ducrot, 2014). L'identification des lettres est alors traitée par des cellules de très haute résolution, les cônes, au centre de la rétine. Cette zone fovéale est trop étroite pour percevoir un mot entier. L'œil doit donc effectuer des sauts incessants - les saccades - pour percevoir un mot entier. Cependant, même si la détection des lettres d'un mot est fondée sur d'incessantes

saccades, c'est principalement pendant les fixations que l'information visuelle, perçue par la rétine, peut être analysée finement.

En revanche, chez certains LD, ces troubles du contrôle oculomoteur et du contrôle binoculaire entraînent des distorsions, des déplacements et des superpositions de lettres et de mots (Chase, 2003; Stein, 2001), ainsi que des troubles de la poursuite oculaire, essentiellement dans le sens de la lecture (Eden et al., 1994). Cliniquement ces LD décrivent une impression de lettres qui bougent, se chevauchent ou se déforment. Le défaut de coordination des saccades oculaires des deux yeux entraîne par conséquent des anomalies de convergence et de divergence en vision de près et de loin (Bucci et al., 2008; Stein et al., 1988). Ce défaut de coordination a été décrit en situation d'exploration de tableaux du peintre Fernand Léger (Kapoula et al., 2006, 2009) et en situation de lecture (Jainta & Kapoula, 2011).

En situation de lecture, les mouvements oculaires de certains LD sont différents de ceux des NL de même âge avec des fixations plus longues et plus nombreuses, des saccades plus courtes, des régressions plus nombreuses, des mouvements de retour à la ligne souvent erratiques (Biscaldi et al., 1998; Hutzler & Wimmer, 2004). Une absence de l'asymétrie typique gauche - droite du point de fixation a été constatée chez des LD français avec une sensibilité accrue à droite du point de fixation (Ducrot et al., 2003). Ainsi, les LD qui ne présentent pas de position optimale du regard pour identifier un mot, augmentent leurs saccades et leurs refixations (Hawelka et al., 2010). Une distribution anormale de l'attention de part et d'autre du point de fixation est décrite chez certains LD et peut expliquer cette sensibilité accrue à droite du point de fixation. La réduction de l'attention à gauche du point de fixation évoque alors un phénomène de mini-héminégligence gauche (Facoetti et al., 2003; Facoetti & Molteni, 2001). La distribution anormale de l'attention peut elle-même s'expliquer par une incapacité à restreindre le faisceau attentionnel en vision fovéale. Par conséquent, les informations visuelles en vision périphérique ne seront pas inhibées (Ducrot et al., 2003; Geiger & Lettvin, 2000). De

fait, certains LD ont des performances supérieures à leurs pairs dans une tâche d'identification de lettres en périphérie (Geiger & Lettvin, 2000).

Cette absence de filtrage attentionnel peut alors conduire à une interférence des informations parafovéales, trop saillantes, sur le traitement du mot en fovéa. Ce phénomène de supériorité du traitement parafovéal chez les LD est une hypothèse qui pourrait expliquer leur grande sensibilité au phénomène d'*encombrement perceptif*, c'est-à-dire au masquage visuel de chaque lettre par celles qui l'entourent (Martelli et al., 2009; Zorzi et al., 2012).

Avec l'objectif de compenser le contrôle binoculaire, l'utilisation de filtres de couleur jaune et bleue aurait des effets positifs sur les performances en lecture (Hall et al., 2013; Stein et al., 2000), sur la perception visuelle de mouvements et sur les capacités de convergence et d'accommodation (Ray et al., 2005). Cependant des maux de tête ont été signalés avec les filtres de couleurs bleue. Au niveau neurophysiologique, l'effet de ces filtres de couleur entraînerait une sur stimulation des cellules magnocellulaires en inhibant d'autres types de réponses cellulaires au niveau de la rétine mais ces résultats restent très fortement discutés. De fait, s'il a été démontré que les filtres colorés prescrits individuellement peuvent améliorer les performances de lecture chez les personnes souffrant de stress visuel, ces filtres ne constituent pas un traitement de la dyslexie (Evans & Allen, 2016).

Afin de comparer les effets d'un entraînement des mouvements oculaires aux effets d'un entraînement de la compréhension de lecture, Solan et al. (2001) ont mené une intervention auprès de 31 enfants LD de langue américaine, d'âge moyen 11 ans 4 mois, pendant 12 sessions d'une heure. L'entraînement des mouvements oculaires effectué par 15 enfants LD a réduit le nombre de fixations et de saccades régressives et a amélioré la compréhension de la lecture. L'entraînement de la compréhension de lecture effectué par 16 enfants LD a aussi amélioré l'efficacité des mouvements oculaires et de la compréhension de la lecture. Selon Solan et al.,

ces résultats soutiendraient la notion d'un lien cognitif entre l'attention visuelle, les compétences oculomotrices et la lecture.

De même, ces liens entre l'amélioration des mouvements oculaires et la lecture ont été mis en évidence par l'étude pilote de Bucci et al. (2018). Un entraînement oculomoteur (durée : 8 semaines, 15 minutes, 5 à 7 jours par semaine), assisté par ordinateur à l'aide d'un « *eye tracker* » capable d'identifier et d'enregistrer les changements des schémas oculomoteurs pendant la lecture a été proposé à 16 LD italiens, d'âge moyen de 10 ans 3 mois. Outre une amélioration des temps de lecture et des temps de fixation oculaire, les auteurs soulignent aussi une amélioration des capacités de saccades oculaires, des capacités visuo-attentionnelles ainsi que des capacités liées au traitement magnocellulaire.

À la suite de cette étude pilote, la même équipe de chercheurs (Caldani et al., 2020) a mis en œuvre un essai clinique randomisé, mené auprès de 50 LD français âgés de 8 à 12 ans : 25 LD entraînés et 25 LD non entraînés. Après un court entraînement oculomoteur (saccades et poursuite) et visuo-attentionnel (tâche de recherche visuelle) de 10 minutes, les résultats montrent une amélioration de la vitesse de lecture et de la durée des fixations oculaires, mesurées à l'aide d'un « *eye tracker* ».

En somme, ces expériences semblent souligner un lien entre les saccades oculaires, les processus visuo-attentionnels et la vitesse de lecture, ainsi qu'entre les tâches oculomotrices et la voie visuelle magnocellulaire (Leigh & Zee, 2015). D'une part, un filtre attentionnel est en effet nécessaire pour atténuer l'information visuelle parafovéale et optimiser le traitement de l'information visuelle fovéale pendant la lecture (Muneaux & Ducrot, 2014) et d'autre part, le déplacement séquentiel et rapide du faisceau attentionnel sur l'image du mot est nécessaire pour encoder l'identité des lettres et leur position sérielle (Vidyasagar & Pammer, 2010). Un ralentissement dans le déplacement de ce faisceau attentionnel pourrait donc altérer la vitesse de lecture.

Le déplacement spatial et temporel de l'attention visuelle

Après les déficits visuels perceptifs de bas niveau, le deuxième type de déficit visuel décrit est un déficit du déplacement temporel et spatial de l'attention visuelle dont les nombreuses manifestations sont mises en lien avec l'hypothèse du *Sluggish Attention Shifting* (Hari & Renvall, 2001) et le déficit de la voie visuelle dorsale magnocellulaire. Rappelons que le ralentissement du déplacement spatial et temporel de l'attention perceptive est décrit de façon amodale chez le LD dans les deux modalités visuelle et auditive (Lallier et al., 2013). De même, l'hypothèse du *Sluggish Attention Shifting* prédit que les déficits de traitement des séquences de stimuli rapides devraient être observés dans toutes les modalités sensorielles. L'implication du système magnocellulaire dans les troubles du déplacement attentionnel est encore débattue mais, comme énoncé précédemment, nous savons que l'aire MT/V5 reçoit 90 % de projections magnocellulaires (Gori et al., 2014) et que l'attention visuelle est modulée par l'activité de plusieurs régions du système magnocellulaire (Boden & Giaschi, 2007; Schneider, 2011).

Un ralentissement du déplacement spatial de l'attention visuelle chez les LD a été mis en évidence lors du traitement rapide des informations visuelles par le biais de tâches de détection d'une cible (Hari & Renvall, 2001). La cible apparaît à droite ou à gauche d'un point central après un indice ayant orienté l'attention de façon pertinente (condition valide), non pertinente (condition non valide) ou neutre (indication à droite et à gauche). Le pattern normal attendu est un traitement plus rapide de la cible en condition valide et un traitement ralenti en condition invalide (Posner, 1980). Or, dans le champ visuel droit, les LD détectent la cible aussi rapidement en condition non valide qu'en condition valide alors que les NL détectent la cible en condition non valide plus lentement qu'en condition valide. Dans le champ visuel gauche et en condition invalide, les LD détectent la cible plus lentement que les NL (Facoetti & Molteni, 2001). Autrement dit, le ralentissement de l'orientation spatiale se traduit par un déficit spécifique de l'inhibition attentionnelle droite caractérisée par une focalisation trop importante

dans le champ visuel droit et/ou une " mini-négligence gauche " caractérisée par une focalisation limitée dans le champ visuel gauche (Facoetti & Molteni, 2001; Hari & Renvall, 2001). Certains enfants LD lisent alors avec une facilité atypique les lettres présentées à droite en champ périphérique (Facoetti et al., 2003), particularité également retrouvée chez certains adultes LD (Judge et al., 2013). Ce déficit d'inhibition à droite concerne surtout la partie périphérique du champ visuel. Lors du traitement visuel séquentiel de gauche à droite pendant la lecture, la difficulté de déplacement de l'attention pourrait donc altérer la segmentation visuelle des graphèmes et la correspondance graphème-phonème (Vidyasagar & Pammer, 2010). De fait, le ralentissement du déplacement spatial de l'attention visuelle affecte la lecture de pseudomots (Facoetti et al., 2006). De plus, Franceschini et al. (2012) rapportent, à travers le suivi longitudinal de 96 enfants italiens de la maternelle à la deuxième année de primaire, que les aptitudes précoces en orientation de l'attention visuo-spatiale prédisent les capacités à lire. Une étude longitudinale de la première à la cinquième année de primaire, menée par cette même équipe, auprès de 398 élèves italiens met en évidence une attention visuo-spatiale dysfonctionnelle chez des LD (Franceschini et al., 2022), en accord avec une récente méta-analyse (Gavril et al., 2021).

Ce déficit de traitement rapide des informations visuelles, largement décrit au niveau spatial, est aussi évoqué au niveau temporel. En effet, un ralentissement du déplacement temporel de l'attention visuelle chez les LD a été mis en évidence par Hari et Renvall en 2001 lors d'une épreuve de clignement où une cible apparaît aléatoirement parmi une présentation successive de lettres toutes les 100 ms. Les LD parviennent à un désengagement de l'attention 150 ms plus tard que les NL (Hari et Renvall, 2001).

Pour améliorer ces capacités visuo-attentionnelles, l'utilisation de jeux vidéo d'action a été expérimentée auprès de LD. Structurés avec des niveaux de complexité croissante, les scores des jeux vidéo permettraient de mesurer le niveau de capacité développé par le joueur (voir la

méta-analyse de Bediou et al., 2018). Plus précisément, ces jeux vidéo d'action pourraient améliorer les capacités visuo-spatiales attentionnelles et, par conséquent améliorer la lecture.

Trois interventions ont ainsi été menées auprès d'enfants LD en Italie par Franceschini et ses collaborateurs. La première intervention (Franceschini et al., 2013) a évalué l'usage intensif d'un jeu vidéo d'action, *Rayman contre les Lapins Crétins*, auprès de 10 LD italiens d'âge moyen de 10 ans (durée : 12 heures, 9 séances de 80 minutes). Les résultats ont montré une amélioration significative du déplacement temporel et spatial de l'attention visuelle et auditive, du déplacement intermodal audio-visuel, de la vitesse de lecture de pseudomots et de textes comparés aux résultats de 10 LD d'âge moyen de 9 ans 7 mois, utilisant un jeu vidéo sans action.

La deuxième intervention (Franceschini et al., 2017) a évalué l'usage intensif du même jeu vidéo d'action, selon la même procédure, auprès de 16 LD anglais âgés en moyenne de 9 ans 8 mois. Les résultats ont montré une amélioration significative de l'attention focalisée, du déplacement attentionnel intermodal audio-visuel, de la vitesse de lecture des mots, du décodage phonologique, de la mémoire phonologique à court terme et de la fusion phonémique comparés aux résultats de 12 LD de même âge entraînés avec un jeu vidéo sans action. Les auteurs n'ont pas relevé d'amélioration significative de l'attention visuo-spatiale distribuée.

La troisième intervention (Franceschini & Bertoni, 2019) a comparé l'usage intensif de deux jeux vidéo d'action différents, *Plant versus zombies garden warfare* et *Nanostray 2*, auprès de 18 enfants d'âge moyen 9 ans 8 mois (durée : 12 heures, 12 séances de 60 minutes). Seuls les enfants ayant amélioré leurs scores de jeu vidéo ont amélioré leur vitesse de décodage phonologique et leur capacité en mémoire phonologique à court terme. Les auteurs en concluent que l'attention spatio-temporelle multisensorielle serait causalement liée aux compétences en lecture. Par conséquent, la plasticité du réseau attentionnel multisensoriel (Facoetti et al., 2010; Hari & Renvall, 2001; Vidyasagar & Pammer, 2010) pourrait expliquer les améliorations des

compétences en lecture et des capacités liées à la lecture, induites par l'utilisation intensive des jeux vidéo d'action.

Afin de confirmer ces résultats, une autre équipe (Łuniewska, 2018) a répliqué les deux premières études de Franceschini et al. (2013, 2017) auprès de 54 LD polonais d'âge moyen 11 ans 5 mois. Répartis aléatoirement dans deux groupes, 27 LD ont joué au jeu vidéo d'action et 27 LD ont joué à un jeu vidéo sans action d'entraînement des processus phonologiques (durée : 13 heures 30, 16 séances de 50 min). Un groupe témoin de 16 LD n'a reçu aucune intervention. Une amélioration de la vitesse de lecture, de l'attention sélective, de la conscience phonologique, de la dénomination rapide, de la mémoire phonologique est constatée pour les deux groupes entraînés mais aussi pour le groupe contrôle non entraîné, composé de 16 LD de même âge moyen. Cependant, il faut signaler que les enfants du groupe contrôle ont été évalués sur le web, à la suite du confinement dû à la pandémie du COVID-19. Cette évaluation était supervisée par le parent de chaque enfant, et non par un examinateur, ce qui a pu induire un biais d'évaluation dans l'étude et expliquerait que les résultats issus du groupe contrôle, ne soient pas différents des résultats issus des groupes expérimentaux. Nonobstant cette limite, il est intéressant de souligner qu'un jeu vidéo d'action a été aussi efficace qu'un jeu vidéo entraînant les processus phonologiques et cette possibilité pourrait être une alternative intéressante pour motiver et encourager les LD pendant la remédiation.

En somme, il semble que la pratique de jeux vidéo d'action améliore la vitesse de lecture et les capacités attentionnelles (Green et al, 2015). Ces entraînements permettraient une amélioration du déplacement spatial de l'attention visuelle et auditive et seraient en lien avec l'amélioration de l'efficacité du traitement magnocellulaire, lui-même lié à l'amélioration de la synchronisation des oscillations cérébrales (Gori et al., 2014, 2015).

Les traitements visuo-attentionnels

Nous avons vu que les déficits visuels de bas niveau et les déficits du déplacement temporel et spatial de l'attention visuelle peuvent affecter l'apprentissage de la lecture. Nous allons maintenant décrire trois types de déficits visuo-attentionnels, pouvant également altérer cet apprentissage : un déficit de la focalisation de l'attention visuelle sur les modes d'analyse globale (le mot) ou locale (la lettre), un déficit de l'empan visuo-attentionnel et un encombrement visuel excessif.

Analyse des traitements global et local

Au cours du traitement perceptif de l'information visuelle, l'attention peut être sélectivement dirigée vers la forme globale ou vers les différents détails des stimuli pour appréhender l'environnement. Les premières expériences de Navon (1977) ont évoqué l'idée que la perception globale d'une scène visuelle précède l'analyse de ses caractéristiques locales. Dis plus simplement, nous percevons *la forêt avant les arbres* (Navon, 1977). Ces traitements attentionnels global/local peuvent être altérés chez certains LD selon le mode de focalisation de l'attention sur le global c'est-à-dire le mot ou sur le local c'est-à-dire les lettres. Les lecteurs experts utilisent ces traitements attentionnels global/local lors de la lecture d'un mot ou d'un texte (Viterbo et al., 2020). Le traitement local des hautes fréquences spatiales active le gyrus temporal supérieur gauche, également impliqué dans le traitement phonologique de la lecture (Démonet et al., 1992), alors que le traitement global des basses fréquences spatiales active le gyrus temporal supérieur droit (Weissman & Woldorff, 2005). Cependant cette spécialisation hémisphérique peut être modulée en fonction de l'utilisation de stimuli linguistiques ou non linguistiques (Kéïta & Bedoin, 2011).

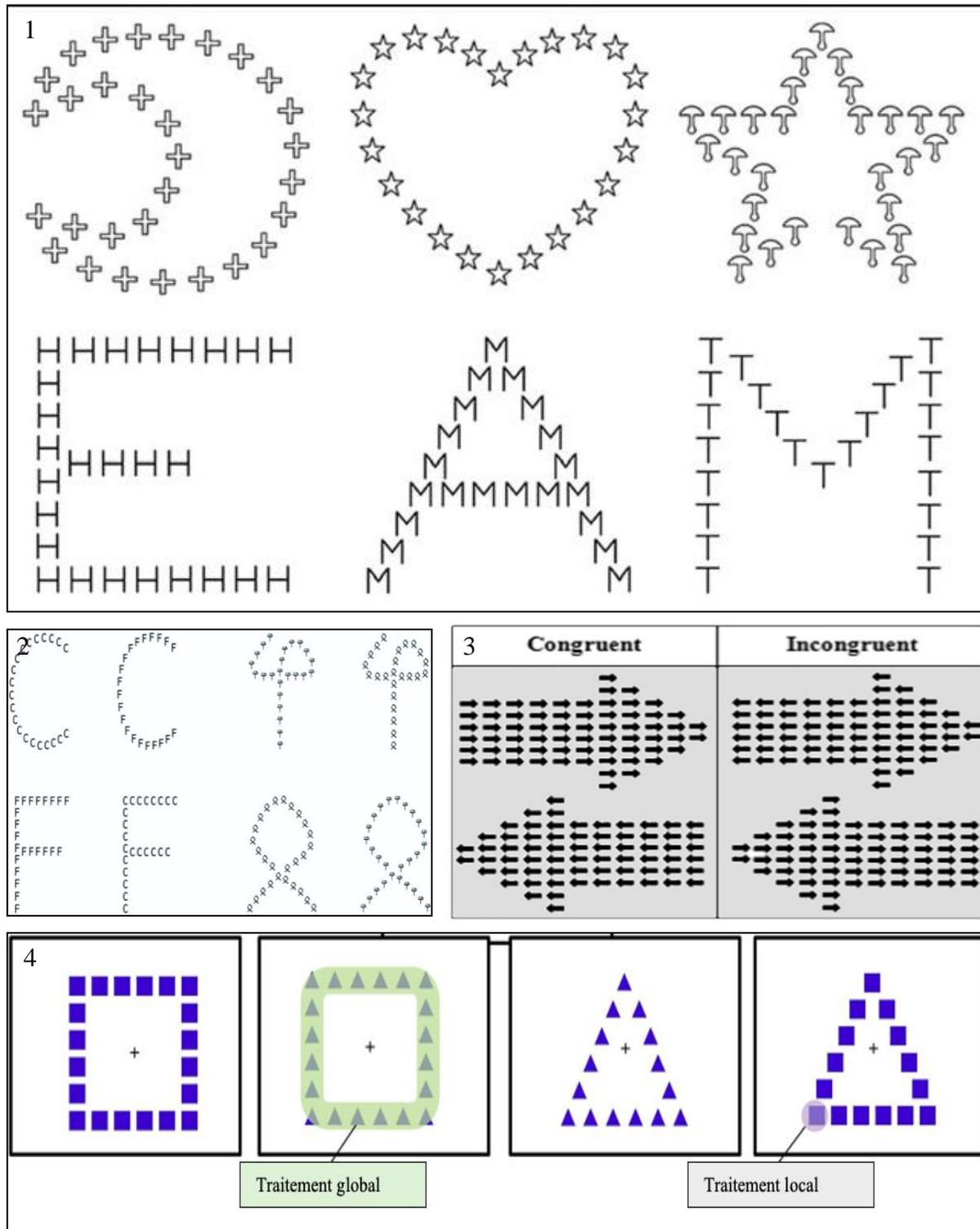
Dès lors, les déficits en lecture des LD pourraient être liés aux déficits de traitement global/local. Certains travaux mettent en évidence un traitement visuo-spatial local et global

plus lent chez les LD (Matthews & Martin, 2009), d'autres au contraire ne relèvent aucun déficit spécifique du traitement visuo-spatial ni au niveau local ni au niveau global mais une lenteur à traiter toute information visuelle (Keen & Lovegrove, 2000), d'autres une capacité de traitement visuo-spatial global supérieure (von Károlyi et al., 2003), alors que d'autres relèvent un traitement local précédant le traitement global chez les LD (Schmitt et al., 2019). Ces conclusions très différentes, sont certainement en lien avec la variabilité des paramètres choisis pour évaluer le traitement local/global : type de stimuli linguistiques ou non linguistiques, taille des stimuli, nombre de composants, caractéristiques des fréquences spatiales, angle visuel, hémichamp visuel, excentricité et incertitude positionnelle.

L'évaluation des traitements local et global au cours du traitement perceptif de l'information visuelle se fait classiquement par la tâche de Navon avec des stimuli visuels hiérarchisés non linguistiques ou linguistiques (Navon, 1977, 1981). Par exemple, une grande lettre composée de petites lettres congruentes (un grand G composé de petits G) ou non congruentes (un grand G composé de petits B). Dans la tâche globale, les participants doivent porter leur attention sur la grande lettre en ignorant les petites lettres. Le traitement de la dimension globale en inhibant l'interférence issue de la dimension locale est mesuré par l'effet de congruence qui est la différence de temps de réponses entre les conditions congruentes et incongruentes lors de la tâche globale. Dans la tâche locale, les participants doivent porter leur attention sur les petites lettres en ignorant les grandes lettres. Le traitement de la dimension locale en inhibant l'interférence issue de la dimension globale est mesuré par l'effet de congruence qui est la différence de temps de réponses entre les conditions congruentes et incongruentes lors de la tâche locale. Différentes variantes de la tâche de Navon sont utilisées dans la littérature, comme des formes linguistiques ou non linguistiques congruentes ou non congruentes ou une grande flèche composée de petites flèches ou encore des formes géométriques ou des dessins (cf Figure 2.1).

Figure 2.1

(1) Dessins et lettres hiérarchisés (Keïta et al, 2014) ; (2) Stimulus linguistiques et non linguistiques hiérarchisés congruents et non congruents (Lachman et al, 2014) ; (3) Stimuli flèches hiérarchisés congruents et non congruents (Viterbo et al, 2020) ; (4) Formes géométriques hiérarchisées congruentes ou non congruentes (Franceschini et al, 2017)



Certains travaux ont utilisé la tâche de Navon avec une présentation centrale de stimuli linguistiques et non linguistiques (Figure 1, image 2) paramétrés selon les conditions de lecture optimum en vision fovéale avec un angle visuel de 5 à 6 ° (Lachmann et al., 2014). Dans ces conditions expérimentales, des lecteurs experts allemands activent le traitement local avant le traitement global uniquement pour les stimuli lettres et inversement le traitement global avant le traitement local pour les stimuli non linguistiques (Lachmann et al., 2014). Ces résultats sont en accord avec les hypothèses du modèle *GLOMO^{sys}*, *Global versus Local Processing Model, a systems account* (Förster & Dannenberg, 2010), qui postule un traitement local précédant un traitement global pour les stimuli familiers et un traitement global précédant un traitement local pour les stimuli nouveaux. D'après une récente étude menée auprès de 19 NL de langue hébraïque, âgés de 24 à 35 ans, l'amorçage local avec des stimuli non linguistiques (Figure 1, image 3) et non l'amorçage global, conduit à une amélioration de l'efficacité de la lecture de mots et de textes, sans nuire à la précision ou à la compréhension (Viterbo et al, 2020). Ainsi, ces travaux ont inspiré des stratégies de remédiation pour améliorer les compétences en lecture des LD.

Dans cette perspective, l'équipe de Franceschini et al. (2017) a mené une série d'expérimentations auprès de LD italiens. La première, menée auprès de 179 participants, 162 NL et 17 LD, âgés entre 7 ans 2 mois et 12 ans, relève un effet de précedence du traitement local sur le traitement global chez les LD, ce qui génère une altération de la perception visuelle globale, alors que les NL présentent le pattern inverse (Franceschini et al., 2017).

Afin de mettre en évidence le rôle du traitement typique global qui précède le local sur l'efficacité en lecture, la même équipe (Franceschini et al., 2017) met en œuvre une deuxième expérimentation et propose un entraînement d'accélération de la lecture (voir Breznitz et al., 2013) à 13 LD d'âge moyen 10 ans. Ce programme informatisé d'accélération de la lecture favorise un traitement global rapide des phrases sans aucune intervention explicite sur le

traitement phonologique. À l'issue de l'entraînement, ces LD présentent une réduction des interférences locales dans la tâche globale de Navon, de meilleures performances de lecture des mots et pseudomots et une amélioration de la répétition des pseudomots. Fait intéressant, ce programme d'accélération de la lecture a pu améliorer également l'intégration lettre-son et les processus audio-phonologiques, montrant qu'une intervention ciblant la procédure de lecture lexicale peut aussi améliorer la procédure de lecture sublexicale.

Dans une troisième expérimentation, les mêmes auteurs (Franceschini et al., 2017) ont ensuite évalué les capacités visuo-spatiales de 47 participants, 32 LD et 15 NL, âgés en moyenne de 10 ans, avec une application informatisée de la tâche de Navon (Figure 1, image 4). Comme pour les données précédentes, les NL présentent un effet de précedence du traitement global alors que les LD ont présenté un effet de précedence du traitement local. Parmi les 32 LD, 7 sont entraînés à des jeux vidéo d'action et 7 à des jeux vidéo sans action, issus du logiciel *Rayman contre les Lapins Crétins* pendant 12 heures. La vitesse de lecture et l'activation de la perception globale avant la perception locale augmentent uniquement chez les enfants entraînés avec les jeux vidéo d'action. Franceschini et al. (2017) évoquent un lien de causalité entre l'effet de précedence locale et les troubles de la lecture.

Enfin, cette même équipe a suivi longitudinalement, pendant un an, 96 élèves de dernière année de maternelle, tous prélecteurs et d'âge moyen 5 ans (Franceschini et al., 2017). D'après cette quatrième expérimentation, les enfants à risque de développer un trouble de la lecture présenteraient un effet de précedence du traitement local et l'effet de précedence du traitement global prédit les futures compétences efficaces en lecture en contrôlant l'âge chronologique, le QI, les compétences de décodage grapho-phonémique et les compétences phonologiques. La perception de détails incongrus entraînerait donc une perception globale insuffisante et des erreurs caractérisées par la perception du « quoi » (voie ventrale ou parvocellulaire) au lieu de la perception du « où » (voie dorsale ou magnocellulaire). *This peculiar perception leads to a*

« *where is the perceived what* » *mistake* (Franceschini et al., 2017, p.7). Ainsi, la voie magnocellulaire dorsale impliquée dans le traitement des basses fréquences spatiales serait également impliquée dans le traitement attentionnel global des informations visuelles pendant la lecture (Gori et al., 2015). De façon cohérente, une stimulation magnétique transcrânienne de la voie magnocellulaire dorsale qui contient le principal réseau attentionnel fronto-pariétal, améliorerait les capacités de lecture des LD (Gori et al., 2016; Heth & Lavidor, 2015).

En France, le test *FocalDivi* (Bedoin et al., 2010), renommé *Sigl* (Bedoin & Medina, 2014), présente des stimuli visuels linguistiques et non linguistiques hiérarchisés (Figure 1, image 1) construits à partir de l'étude princeps de Navon (1977). Tandis que l'attention et le regard du participant sont fixés sur un point central, la présentation rapide en champ visuel divisé du stimulus, sans que le côté d'apparition puisse être prédit, permet d'apprécier les capacités de chaque hémisphère cérébral à traiter l'information de manière globale ou locale. Le stimulus hiérarchisé est présenté pendant 175 ms, de manière à induire le traitement du stimulus en vision fovéale et éviter qu'une saccade oculaire place le stimulus en vision parafovéale. La quantité de lettres et de dessins d'objets hiérarchisés est équilibrée dans l'épreuve, afin de ne pas introduire de biais dû à la catégorie du matériel et d'équilibrer l'implication respective des hémisphères gauche et droit (Kéïta & Bedoin, 2011). Deux blocs présentent des lettres hiérarchisées et deux autres, des dessins hiérarchisés. Pour chacun, une focalisation, soit au niveau global, soit au niveau local est requise : pour les lettres hiérarchisées, le participant décide si le niveau pertinent, soit local soit global, contient la lettre E ou M ; pour les dessins d'objets, les cibles sont une étoile et un croissant de lune (voir chapitre 5, section 1.4 pour une description détaillée de ce logiciel).

Bedoin et al. (2009) ont mis en évidence une asymétrie de l'interférence plus marquée quand celle-ci est issue du niveau global, que lorsque l'attention est portée sur le niveau local que l'inverse chez 32 jeunes adultes NL français. Ce phénomène d'*asymétrie de l'interférence*

confirmerait la spontanéité à traiter d'abord l'information au niveau global, puis de s'affranchir progressivement de l'interférence issue du niveau local quand l'attention est focalisée sur le niveau global. En revanche, les LD adultes présenteraient une asymétrie atypique entre les modes d'analyse global et local (Bedoin, 2017). Plus précisément, une lecture altérée en précision serait liée à un déficit dans la tâche globale, alors qu'une lecture altérée en vitesse serait liée à un déficit dans la tâche locale (Goldstein-Marcusohn et al., 2020).

Ces mécanismes d'inhibition se développeraient à des rythmes différents chez l'enfant NL entre 6 et 11 ans (Bedoin et al., 2010). À 6 ans, les enfants sont perturbés par l'interférence issue du niveau global ainsi que par l'interférence issue du niveau local. À 10 ans, ils ne sont plus perturbés par l'interférence issue du local mais restent sensibles à l'interférence issue du niveau global quand l'attention est focalisée au niveau local. Les LD dyslexiques d'âge moyen 11 ans, présentant des difficultés plus prononcées à lire des mots irréguliers que des pseudomots, présentent une difficulté à inhiber le niveau local et une faible sensibilité à l'interférence issue du niveau global à la fois avec les stimuli hiérarchisés lettres et dessins (Bedoin et al., 2010). Ainsi, les auteurs concluent qu'un déficit de mobilisation du mode d'analyse global en présence de nombreux détails, ainsi qu'un déficit d'inhibition des détails non pertinents caractérisent les enfants présentant une « dyslexie de surface », comparés à des enfants normolecteurs de même âge chronologique et de même âge lexique. L'interprétation La relation entre ce trouble de l'attention visuo-spatiale et le codage positionnel des lettres lors de la lecture, peut être interprétée par une attraction irrésistible des lettres qui gênerait la procédure d'adressage au lexique orthographique, la stabilisation des représentations orthographiques et plus particulièrement la lecture et l'écriture de mots irréguliers.

Pour réduire ce déficit de traitement visuo-spatial de focalisation attentionnelle, les mêmes auteurs (Bedoin, 2017) ont proposé un entraînement pour équilibrer les traitements global/local à 10 enfants LD, âgés en moyenne de 10 ans 8 mois, comparés à 10 enfants LD

sans entraînements, de même âge et de même niveau de lecture et présentant un profil de dyslexie de surface. Ce programme de remédiation informatisé *Switchipido* (Bedoin & Medina, 2013) (durée : 25 minutes par jour, 5 jours par semaine pendant 4 semaines), consiste en la présentation d'entraînements d'alternance entre les traitements global et local, des entraînements de focalisation de l'attention au niveau global dont les stimuli sont des flèches ou des dessins hiérarchisés différents de ceux de la tâche d'évaluation *FocalDivi* (ou *Sigl*). Une augmentation de la capacité d'inhibition locale, l'amélioration de l'attention visuo-spatiale et de la lecture par adressage est rapportée chez les LD entraînés.

L'empan visuo-attentionnel

Le deuxième type de déficit visuo-attentionnel décrit chez le LD, est une réduction de l'empan visuo-attentionnel. La perception globale d'une chaîne de lettres dans une fenêtre attentionnelle est mesurée par le nombre d'éléments perçus simultanément lors d'une fixation oculaire ou empan visuo-attentionnel. La notion d'empan visuo-attentionnel (VA), élaborée et étudiée depuis 20 ans dans le Laboratoire de Psychologie et de Neurocognition à Grenoble, s'inscrit dans le modèle MTM, *Modèle Multi-Traces de Lecture* (Ans & Carbonnel, 1998) et plus récemment dans le modèle BRAID, *Bayesian word Recognition with Attention, Interference and Dynamics* et ses extensions (Ginestet et al., 2019, 2022; Saghiran et al., 2020), déjà évoqués dans le chapitre 1. La visibilité des lettres contenues dans la fenêtre attentionnelle est maximale alors que les lettres situées en dehors de cette fenêtre ont une visibilité réduite. La taille de la fenêtre permet de lire un mot soit de façon globale en s'adaptant à sa longueur, soit de façon analytique en cadrant sur des unités plus petites telles que les graphèmes ou les syllabes.

Le traitement des chaînes de lettres pendant la lecture est influencé par deux phénomènes visuels simultanés : le gradient d'acuité et l'encombrement perceptif visuel

(Bernard & Castet, 2019; Grainger et al., 2016). Le gradient d'acuité désigne la baisse d'acuité proportionnelle à la distance entre le point de fixation et les lettres excentrées. L'encombrement perceptif visuel désigne la difficulté d'identifier un objet entouré d'autres objets (Whitney & Levi, 2011). Le déplacement de l'attention visuelle entraîne des saccades puis des fixations oculaires afin de correctement identifier les lettres, en compensant les effets néfastes du gradient d'acuité et de l'encombrement perceptif visuel (pour une revue, voir Carrasco, 2011). Ainsi, la quantité et la répartition de l'attention visuelle pour le traitement parallèle de chaînes de lettres module la vitesse de lecture.

La quantité et la répartition de l'attention visuelle sont estimées par la mesure de l'empan VA à l'aide du logiciel *Evadys* développé et validé par l'équipe de Valdois et al. (2014) par le biais de trois tâches : *Report global*, *Report Partiel* et *Seuil de lettres* (voir chapitre 5, section 1.4 pour une description détaillée de ce logiciel). Les deux tâches de *Report* sont composées de séquences de lettres, présentées brièvement pendant 200 ms, et construites de façon à ne pas activer de connaissances lexicales mémorisées. Les lettres sont suffisamment espacées pour éliminer tout effet d'encombrement perceptif. En effet, les enfants LD sont plus sensibles à l'encombrement perceptif qui interfère sur leurs performances en lecture (Martelli et al., 2009; Spinelli et al., 2002) et l'accroissement de l'espacement entre les lettres diminue cet effet d'encombrement perceptif visuel et améliore les performances en lecture (Martelli et al., 2009; Zorzi et al., 2012). Au préalable, une tâche de contrôle, *Seuil de lettres*, consiste à identifier isolement 10 lettres présentées à des temps d'exposition variant de 33 à 101 ms. D'après Valdois et al. (2014), le diagnostic d'un trouble de l'empan VA ne peut être posé que lorsque les performances sont anormalement faibles dans les épreuves de report et que le traitement des lettres isolées est préservé. Lorsque l'identification des lettres isolées est altérée, il est vraisemblable que cette performance déficitaire puisse interférer avec l'apprentissage de la lecture, mais le diagnostic d'un trouble de l'empan VA ne peut être validé.

Des données en neuro-imagerie révèlent que l'empan VA est spécifiquement lié au réseau attentionnel dorsal et plus particulièrement aux lobules pariétaux supérieurs, ce qui éliminerait toute implication des compétences phonologiques (Lobier et al., 2012; Peyrin et al., 2011, 2012; Reilhac et al., 2013; Valdois et al., 2019). En, effet, trois études ont permis de souligner que les performances à la tâche de report global au test *Evadys* ne reflètent pas des capacités phonologiques (Lobier et al., 2011), ni des capacités de mémoire verbale à court terme (Lassus-Sangosse et al., 2008), ni des capacités de transcodage visuo-verbal (Valdois et al., 2012), bien qu'une production orale des lettres identifiées soit demandée dans la tâche. De plus, l'utilisation de matériel alphanumérique dans ce test est justifiée par le fait que l'identification d'un caractère visuel inconnu nécessite des milliers d'expositions. Même si l'identification d'un seul caractère visuel inconnu devient finalement efficace, le traitement de plusieurs éléments visuels inconnus à la fois reste irréalisable (Pelli et al., 2006; Shovman & Ahissar, 2006).

Une forme de dyslexie par déficit de l'empan visuo-attentionnel distincte de la forme par déficit phonologique plus classiquement reconnue, est alors différenciée cognitivement et sur le plan neurobiologique ("Neural dissociation of phonological and visual attention span disorders in developmental dyslexia," 2012). Comme pour le déficit de traitement phonologique, l'ensemble des données disponibles indique qu'un déficit isolé de l'empan VA peut se traduire par des profils de lecture différents, de type surface ou de type mixte (Valdois et al., 2011; Zoubrinetzky et al., 2014). Récemment, une étude longitudinale menée par la même équipe auprès de 124 enfants français tout-venant relève que l'empan VA mesuré en maternelle prédit la fluidité de la lecture à la fin du CP, avec une implication plus forte pour la lecture de pseudomots (Valdois et al., 2019).

Outre la prédiction des effets d'apprentissage, l'empan VA prédit également les déficits en lecture avec 6 % de la variance expliquée dans la lecture d'un seul mot et d'un texte et 8 % de la variance expliquée dans la lecture d'un pseudo-mot, chez 279 LD français scolarisés en

sixième (Valdois et al., 2021). Dans cette même étude, la prévalence d'un déficit unique d'empan VA est de 18 %, celle d'un déficit unique d'analyse phonémique est de 20 % et celle d'un déficit unique de DRA est de 15,5 % (Valdois et al., 2021). Dans une autre étude auprès de LD néerlandais âgés en moyenne de 16 ans 6 mois, les prévalences respectives sont de 31 %, 63 % et 60 % de déficits dans les tâches d'empan VA, d'analyse phonémique et de DRA (Bazen et al, 2020). Même si d'autres études ne confirment pas les effets prédictifs de l'attention visuelle (Boer et Jong, 2018 ; Saksida, 2016 ; Banfi et al, 2018) sur la lecture, la mesure de l'empan VA reste un prédicteur significatif de la capacité de lecture après contrôle de la covariance des tâches d'analyse phonémique et de DRA (pour une revue, voir Perry & Long, 2022).

À la suite de la création d'un test pour évaluer l'empan VA, Valdois et son équipe ont développé un logiciel d'entraînement informatisé *Maeva* afin d'augmenter la taille de l'empan VA (Voir chapitre 4, section 3.1 pour la description du logiciel). Un entraînement avec le logiciel *Maeva* (durée : 7 heures 50 pendant 6 semaines, 5 jours par semaine, 15 minutes par jour) a été proposé à 45 LD français âgés en moyenne de 10 ans 7 mois, répartis aléatoirement en deux groupes (Zoubrinetzky et al., 2019). Le premier groupe a effectué un entraînement ciblant la perception catégorielle avec le logiciel *RapDys* (cf. section 2.2 *Le déficit de traitement auditif, Déficit de la perception catégorielle*), suivi d'un entraînement avec le logiciel *Maeva*, le deuxième groupe a suivi les mêmes entraînements dans l'ordre inverse, selon une conception croisée. Après l'entraînement *Maeva*, la taille de l'empan visuo-attentionnel ($d = 1,20$), la conscience phonémique ($d = 0,74$), les compétences en lecture de texte ($d = 0,56$) et la lecture de mots irréguliers ($d = 0,76$) se sont améliorées.

Pour conclure, la même équipe de chercheurs (Antzaka et al., 2017) a établi un lien entre l'utilisation des jeux vidéo d'action, l'augmentation de l'empan visuo-attentionnel et l'amélioration de la lecture de pseudomots chez 36 NL adultes, d'âge moyen 20 ans 8 mois.

Les adultes ayant joué en moyenne 70 heures par mois ont un empan visuo-attentionnel supérieur aux adultes n'ayant pas joué et lisent mieux des pseudomots présentés brièvement pendant 60 ms. Les auteurs en concluent que les jeux vidéo d'action, connus pour améliorer les capacités d'attention visuelle (Bavelier et al., 2013), améliorent aussi l'empan visuo-attentionnel. Ainsi, des nouveaux logiciels de remédiation de la lecture pourraient combiner les entraînements de l'empan visuo-attentionnel avec les caractéristiques des jeux vidéo d'action.

L'encombrement visuel

L'encombrement visuel est un phénomène normal décrit comme une difficulté plus importante à identifier visuellement un objet entouré d'autres objets qu'à identifier un objet isolé (Whitney & Levi, 2011). Pendant la lecture, une lettre au milieu d'un triplet de lettres est plus difficile à identifier qu'une lettre isolée et cette identification dépend d'un espacement critique entre les lettres qui est la distance inter-lettres pour laquelle la reconnaissance est efficace (Martelli et al., 2009). L'encombrement visuel serait un défaut de filtrage attentionnel qui exacerbe l'effet négatif du masquage latéral exercé par les lettres à proximité de celles qui sont fixées. Certaines études évoquent un lien entre l'encombrement visuel et le déplacement de l'attention visuo-spatiale à condition de contrôler les interactions entre encombrement et masquage dans les analyses (pour une revue voir Whitney & Levi, 2011). Le terme d'*encombrement spatial* désigne alors l'implication du déplacement spatial de l'attention visuelle dans l'encombrement visuel. De même, il semblerait que les effets de cet encombrement spatial soient corrélés aux effets de *l'encombrement temporel*, soutenant l'implication du déplacement spatial et temporel de l'attention dans l'encombrement (Whitney & Levi, 2011). Principalement décrit en modalité visuelle, l'encombrement perceptif a été également décrit en modalité auditive chez des enfants dyslexiques (Geiger et al., 2008). Les enfants NL sont vulnérables à l'encombrement visuel en vision centrale et en vision

périphérique (Jean et al, 2010) alors que les adultes NL ne sont sensibles à l'encombrement visuel qu'en vision périphérique (Callens et al, 2013). Cet effet de d'encombrement visuel serait accentué chez les enfants LD (Martelli et al., 2009; Pernet et al., 2006). De plus, la présence d'un distracteur visuel suffisamment éloigné pour ne pas gêner les NL perturbe l'identification des lettres chez les enfants LD (Moll & Jones, 2013). L'altération de l'identification des lettres, étape fondamentale du codage orthographique et phonologique de la lecture (Grainger et al., 2016), ralentit alors la vitesse de lecture (Pelli et al., 2007), altère sa précision et par conséquent diminue les temps d'exposition à la lecture. L'augmentation de l'espacement des lettres et des mots peut alors être une stratégie de remédiation adaptative pour diminuer l'encombrement visuel.

D'abord, Martelli et al. (2009), dans une étude menée auprès de 24 enfants italiens dont 13 enfants LD d'âge moyen 11 ans 7 mois, et 16 enfants NL d'âge moyen 11 ans 2 mois, ont constaté que la taille des lettres et l'espacement inter-lettres nécessaires pour obtenir un seuil maximal de vitesse de lecture chez les LD sont supérieurs à ceux nécessaires chez les NL. L'augmentation de la taille des lettres et par conséquent de l'espacement entre les lettres améliorerait la vitesse de lecture des LD (Martelli et al., 2009). Néanmoins la vitesse de lecture de ces LD (40 mots par minute) reste en deçà de celle des NL (110 mots par minute).

Ensuite, après une série d'expérimentations menées auprès de 24 adultes NL d'âge moyen 23 ans, de 44 enfants NL d'âge moyen 9 ans 3 mois, de 24 enfants NL d'âge moyen 9 ans 10 mois, et de 36 enfants LD d'âge moyen 12 ans 1 mois, tous de langue natale espagnole, Perea et al. (2012) constatent que l'augmentation de l'espacement des lettres et des mots dans un texte améliorerait la vitesse de lecture et réduirait les erreurs chez tous les participants. Fait intéressant, l'espacement entre les syllabes n'a aucun effet ou un effet négatif sur les compétences en lecture. Les stimuli ont été présentés en Times New Roman 14 points. La condition avec un espacement inter-lettres plus large consistait en un espacement inter-lettres

supplémentaire de +1,2. L'amélioration des compétences en lecture de mots et de compréhension de textes est plus prononcée chez les enfants LD que chez les NL, et l'effet est plus important pour les mots de 6 lettres que pour ceux de 4 lettres chez les enfants LD et NL, pas chez les adultes LD et NL.

De plus, Zorzi et al. (2012), après une étude menée auprès de 34 enfants LD italiens, 40 enfants LD français et 30 enfants NL italiens, de même âge lexique et d'âge moyen 10 ans 4 mois, concluent également que l'espacement des lettres et des mots dans un texte améliore la vitesse de lecture et réduit les erreurs dans deux langues alphabétiques différentes. Les enfants doivent lire un texte composé de 24 courtes phrases significatives, et sans lien les unes avec les autres afin d'éviter l'utilisation d'indices contextuels. Le texte est en noir sur une feuille de papier A4 blanche, en police Times New Roman de 14 points. L'interligne standard est augmenté de 2,5 pt dans la condition de texte espacé. Par exemple, l'espace entre i et l dans le mot italien « il » (le) était de 2,7 pt en texte normal contre 5,2 pt en texte espacé (cf. Figure 2.2). L'espace entre les mots et l'interligne ont également été augmentés pour maintenir une apparence proportionnée du texte global, mais c'est l'espacement des lettres et non des lignes qui permet d'améliorer la lecture en précision et en vitesse. Cette étude confirmerait que l'espacement des lettres influence l'étape d'identification des lettres, supposée être identique dans toutes les langues alphabétiques (Perry et al., 2007; Ziegler & Goswami, 2005).

Figure 2.2

(A) Texte normal ; (B) Texte espacé (Zorzi et al., 2012)

A	B
ando la pera. La bambina asc llo è magro. La quercia si tro fiore è rosso. La bambina ave ola. Il ragazzo non ha né capp stanno saltando sopra il murc no seduti e guardano verso la terrazza potrebbero vedere tu tetto della casa si vede anche to, ma non il bicchiere. L'elef o sul ramo dell'albero. La bar i è verde. I ragazzi raccolgono	. Il ragazzo che lo è magro. La qu ella città. Non so è rosso. La bamb stella, dentro cu l ragazzo non ha

Enfin, plus récemment, une intervention auprès de 39 adultes LD d'âge moyen 30 ans et 38 enfants LD d'âge moyen 9 ans 6 mois (tous de langue natale américaine) met aussi en évidence un effet positif de l'espacement inter-lettres, inter-mots et inter-lignes sur les compétences en lecture (Joo et al., 2018). L'espace inter-lettres est augmenté de +1,375 point (Fluent Calibri), par rapport à la police Calibri, l'espace inter-mots est multiplié par 3 et l'espace interligne est augmenté de 11 points. Fait intéressant, l'encombrement perceptif est également mesuré avec des stimuli visuels non linguistiques et les adultes LD bénéficiant le plus de l'espacement entre les lettres sont ceux qui ont un encombrement perceptif le plus élevé. Ces résultats vont dans le sens d'une corrélation entre l'encombrement perceptif et les compétences en lecture et les auteurs suggèrent la présence d'un sous-type de dyslexie caractérisé par un encombrement élevé et la nécessité d'une intervention personnalisée en fonction d'un déficit spécifique.

L'espacement entre les lettres peut donc constituer une stratégie de remédiation adaptative afin de permettre aux LD de faciliter leurs procédures de décodage et ainsi d'augmenter leurs expositions à l'écrit. Une question reste en suspens : une lecture plus rapide en condition d'espacement optimal peut-elle avoir un impact sur la mémorisation des

informations orthographiques et par conséquent réduire à long terme le trouble de la lecture ? Même si nous ne pouvons pas y répondre, il est fortement probable que cette stratégie de remédiation adaptative doit être combinée à d'autres stratégies visuo-spatiales, visuo-attentionnelles, audio-visuelles et audio-phonologiques curatives. Dans cet ordre d'idée, Bertoni et al. (2019) mettent en évidence un lien de causalité entre l'encombrement visuel et l'apprentissage de la lecture à travers cinq expérimentations. Parmi ces résultats, le fait qu'un entraînement avec un jeu vidéo d'action puisse réduire l'encombrement et accélérer la vitesse de décodage phonologique uniquement chez les enfants LD qui améliorent leur attention visuo-spatiale, a particulièrement attiré notre attention. Ces résultats vont, de nouveau, dans le sens d'une nature probabiliste et multifactorielle des déficits neurocognitifs à l'origine de la dyslexie développementale et d'un intérêt à combiner les stratégies de remédiation afin d'obtenir un maximum d'efficacité des interventions.

Résumé 2.4

Déficit du traitement visuel

Comme pour le déficit de traitement auditif, les niveaux de traitement perceptif ou attentionnel de l'information visuelle peuvent être altérés chez les LD et les divergences sur l'interprétation et la nature du déficit de traitement visuel dans les DD sont nombreuses. Les aspects perceptifs du déficit de traitement visuel de bas niveau en lien avec une atteinte du système visuel magnocellulaire, les aspects de ralentissement du déplacement spatial et temporel de l'attention visuelle, les aspects visuo-attentionnels impliquant la taille de la fenêtre visuo-attentionnelle, la focalisation de l'attention sur la forme globale ou locale ou enfin l'encombrement perceptif pourraient, en effet, altérer l'analyse visuelle de la chaîne de lettres à des niveaux différents de traitement.

À chacun de ces niveaux de traitement visuel altérés, des réponses interventionnelles ont été validées. Les interventions ciblant les stimuli à faible fréquence spatiale et haute fréquence temporelle, la sensibilité aux mouvements, la stabilité oculaire, les jeux vidéo d'action, la focalisation attentionnelle sur les modes d'analyse global ou local, l'augmentation de l'empan visuo-attentionnel ou l'augmentation de l'espace inter-lettres auraient des effets positifs sur les capacités de lecture.

Ici encore, les déficits visuo-attentionnels ne constituent pas une cause suffisante et nécessaire des troubles de la lecture mais pourraient constituer un facteur de risque de la DD. De plus, seulement certains LD présentent un déficit du traitement visuel dont la nature et la sévérité varient individuellement. Par conséquent, les déficits de traitement visuel peuvent majorer le trouble de la lecture mais ne suffisent pas à l'expliquer. Ils s'inscrivent dans une approche multimodale de la DD où d'autres déficits cognitifs interviennent pour altérer la lecture, comme les déficits de traitement phonologiques, auditifs ou audio-visuels.

2.4. Intervention sur le traitement audio-visuel

Un déficit de traitement intermodalitaire de l'intégration audio-visuelle ou déficit de l'intégration multisensorielle audio-visuelle (Hahn et al., 2014) est également décrit parmi les nombreux déficits de traitement en lien avec les troubles de la lecture et les nombreux « sous-types cognitifs » de la dyslexie (Serniclaes et al., 2015). Selon l'hypothèse d'un déficit d'intégration intermodalitaire, un déficit de l'intégration simultanée des lettres et des sons serait la cause du déficit d'automatisation du décodage des mots et, par conséquent, de la fluidité de lecture. Selon ce cadre théorique, dans la dyslexie développementale, l'association lettre-son est possible mais l'intégration simultanée lettre-son en tant qu'objet audio-visuel unique automatisé est ralentie (Blomert, 2011; Blomert & Froyen, 2010). Ce déficit spécifique de liaison entre le traitement des représentations orthographiques et le traitement des représentations phonologiques est présent chez les LD enfants et adultes (Blau et al., 2009) mais également chez l'enfant prélecteur à risque de développer une dyslexie (Blomert & Willems, 2010). L'intégration multisensorielle automatique d'un objet audio-visuel unitaire « le graphonème » (Kayser & Logothetis, 2007), active précocement le réseau cortical temporel postérieur gauche puis l'ensemble du réseau interactif occipito-temporo-pariétal gauche impliqué dans la lecture (Blomert, 2011; van Atteveldt et al., 2004; van Atteveldt et al., 2006). Kronschnabel et al. (2014) confirment que les gyri et sulci temporaux supérieurs bilatéraux impliqués dans l'intégration audio-visuelle sont altérés chez les adolescents LD. Cependant, ces déficits sont uniquement présents pour les stimuli linguistiques, sans atteintes multisensorielles de bas niveau, en accord avec une déficience dans l'accès aux représentations phonologiques (Boets et al., 2013; Ramus, 2014). En revanche, Harrar et al. (2014) décrivent une asymétrie du ralentissement du déplacement de l'attention, *Sluggish Attention Shifting*, au sein de l'intégration audio-visuelle uniquement dans le sens de la modalité visuelle vers la modalité auditive et non l'inverse pour des stimuli non linguistiques. Ces résultats sont

compatibles avec l'hypothèse d'un déficit de la voie dorsale magnocellulaire. Fait intéressant, Harrar et al. (2014) proposent pour faciliter les associations phonologiques et audiovisuelles, de présenter d'abord le son puis la lettre ou le mot correspondant puisque l'intégration audiovisuelle n'est pas ralentie dans le sens de la modalité auditive vers la modalité visuelle.

La remédiation intermodalitaire vise spécifiquement l'intégration automatique implicite de l'objet lettre-son pour améliorer la fluidité de lecture. En effet, les méthodes de remédiation traditionnelles « *phonics instruction* », basées sur un apprentissage explicite de la conscience phonémique et du décodage phonémique, ont des effets importants sur la précision de lecture mais peu d'effet sur la vitesse de lecture (Aravena et al., 2013; Elliott & Grigorenko, 2014, p.171; Gabrieli, 2009; Torgesen et al., 2001). Bien que l'apprentissage de la conscience phonémique et du décodage phonémique soit une nécessité absolue, il doit être associé à l'intégration automatique de l'objet lettre-son pour avoir des effets à la fois sur la précision et la vitesse de lecture (Aravena et al., 2013).

Un des premiers programmes de remédiation intermodalitaire est un entraînement numérique composé de tâches abstraites non verbales nécessitant une correspondance audiovisuelle entre une forme rectangulaire et un son modulé en hauteur ou en intensité (Kujala et al., 2001). D'une durée de 2 heures 30 pendant 7 semaines (2 fois par semaine pendant 10 minutes), les résultats de ce programme suivi par 24 enfants LD de 7 ans, de langue natale finlandaise, révèlent des changements neuronaux liés à la discrimination auditive et une amélioration des compétences en lecture, comparés à un groupe contrôle de 24 enfants LD non entraînés. Bien que la présentation des stimuli ne soit pas rapide, cet entraînement améliore la discrimination des inversions d'ordre des sons brefs. Comme déjà souligné précédemment, la mesure de l'activité cérébrale par l'enregistrement de la *mismatch negativity* reflète avec précision la discrimination auditive sans facteur de biais telle que l'attention, la prise de décision ou la réponse motrice.

Par la suite, une intervention audio-visuelle centrée cette fois sur les cartographies graphème-phonème, à l'aide du logiciel « *Play-On* » (Danon-Boileau & Barbier, 2002) a été menée auprès de 14 LD de langue natale française, scolarisés dans une école spécialisée pour enfants souffrant d'un trouble sévère d'apprentissage du langage écrit, d'une durée de 5 heures pendant 5 semaines (séances de 15 minutes par jour, 4 jours par semaine) (Magnan & Ecalle, 2006). Il s'agissait d'entraîner la discrimination acoustique entre des paires de consonnes partageant des caractéristiques spectro-temporelles similaires et s'opposant uniquement sur le délai de voisement (/p/-/b/ ; /t/-/d/ ; /k/-/g/ ; /f/-/v/ ; /s/-/z/ et /ʃ/-/ʒ/), tout en consolidant les correspondances phonème- graphème. Les enfants devaient associer le son syllabique à la forme orthographique correspondante, en choisissant entre deux options imprimées, présentées sous forme d'un jeu de basket. L'intervention n'a pas eu d'effet significatif sur les compétences en conscience phonologique, comparé à l'effet mesuré avec un groupe contrôle de 14 LD bénéficiant d'une prise en charge orthophonique. Entraîner la discrimination acoustique entre des paires de consonnes ayant le même point d'articulation mais s'opposant sur le délai de voisement ne serait donc pas efficace. En revanche, une autre intervention avec le même programme, d'une durée de 10 heures pendant 5 semaines auprès de 9 enfants LD français d'âge moyen 10 ans et 6 mois relève des effets positifs significatifs sur la perception catégorielle, les réponses cochléaires et la lecture en comparaison avec un groupe contrôle de 9 LD non entraînés (Veuillet et al., 2007). Cependant, ces résultats ne sont pas crédibles au regard de la taille de l'échantillon.

Un essai clinique randomisé (González et al., 2015) met également en évidence une amélioration de la vitesse de lecture après un entraînement de l'intégration audio-visuelle automatisée auprès de 23 LD de langue finlandaise, comparés à 23 NL et 23 LD sans entraînement. Le programme effectué sur tablette consiste en un entraînement classique de la conscience phonémique et du décodage phonologique combiné à un entraînement de

l'intégration automatique de l'objet lettre-son d'une durée 25h50 pendant 5 mois (34 séances individuelles de 45 minutes, 2 jours par semaine). Dans un premier temps, le participant entend un son et clique sur une touche de la tablette pour désigner un graphème associé au son entendu. Dans un deuxième temps, le participant doit segmenter, sous contrainte temporelle, des mots en phonèmes au fur et à mesure de l'apparition des graphèmes sur l'écran. La répétition, la vitesse et la modalité audio-visuelle de l'entraînement permettent de favoriser l'intégration automatique de l'objet *lettre-son*.

Enfin, un programme informatisé d'entraînement à la lecture, *GraphoGame* (Richardson & Lyytinen, 2014), a été élaboré dans le but de renforcer la liaison orthographe-phonologique afin d'automatiser l'intégration grapho-phonémique par une présentation audio-visuelle simultanée et répétée de lettres, de syllabes, de mots et de phrases, dans une interface très ludique. Initialement développé en Finlande pour les enfants faibles lecteurs, ce programme aurait des effets positifs sur les compétences en lecture supérieurs aux effets constatés après un entraînement grapho-phonologique classique, excepté pour 11 % des enfants entraînés (Saine et al., 2010, 2011). L'intervention menée auprès de 50 lecteurs débutants finlandais âgés de 7 ans et à risque de développer des difficultés de lecture (Saine et al., 2011) a montré des effets significatifs sur la connaissance des lettres, le décodage, la fluidité et l'orthographe chez les 25 enfants entraînés avec *GraphoGame* pendant 28 semaines, 4 fois par semaine, 45 minutes en comparaison aux 25 enfants entraînés avec un programme classique d'activités de prérequis à la lecture (e.g., association lettre-son), de tâches métaphonologiques (e.g., rimes), de lecture et de production de mots, de vocabulaire. Développé et évalué dans d'autres langues, une méta-analyse indique que le programme *GraphoGame* améliore les compétences en lecture avec une taille d'effet de 0.48 seulement lorsque le niveau d'interaction avec un adulte est élevé (McTigue et al., 2020).

La version française de *GraphoGame* (Lassault & Ziegler, 2018) est plus complexe et plus aboutie que les versions de recherche incluses dans la méta-analyse de Mc Tigue (2020) et comprend 67 séquences. Chaque séquence est composée d'une dizaine de jeux différents où les mêmes correspondances grapho-phonémiques se répètent dans des syllabes, des mots ou des phrases de façon à automatiser l'intégration grapho-phonémique dans des contextes différents selon une progression rigoureuse et cohérente de la langue. Ces séquences sont construites selon une progression théorique optimale d'apprentissage (Dehaene, 2010), un apprentissage sans erreur, un contrôle de la fréquence et de la consistance des correspondances grapho-phonémiques (Lété et al., 2004; Peereman & Sprenger-Charolles, 2018; Sprenger-Charolles, 2017).

Plus récemment, une vaste étude a été menée auprès de 921 lecteurs débutants français (Lassault et al., 2022), d'âge moyen 6 ans 4 mois, issus de quartiers socialement défavorisés, d'une durée de 21h30 pendant 16 semaines (4 fois par semaine, 20 minutes par jour). Cette cohorte est répartie en deux, un groupe entraîné avec le programme *GraphoGame* (n = 451), un groupe entraîné avec un logiciel de mathématique (n = 470). Les résultats révèlent de fortes améliorations significatives sur la conscience phonémique et la mémoire orthographique et des améliorations significatives plus modérées sur la fluidité en lecture de mots pour les enfants entraînés avec *GraphoGame* en comparaison des enfants entraînés avec le logiciel de mathématique. Faits intéressants : plus les difficultés initiales en conscience phonémique sont prononcées, plus l'amélioration de la conscience phonémique augmente ; les effets sont significatifs en fluidité de lecture de pseudomots uniquement pour les enfants ayant développé de bonnes compétences initiales en décodage.

Résumé 2.6

Déficit du traitement audio-visuel ou intermodalitaire

Le déficit d'intégration intermodalitaire ou trouble de traitement de l'intégration audio-visuelle serait un autre type de déficit explicatif d'un trouble de la lecture, différent des déficits de traitement phonologiques, auditifs ou visuels et qui s'ajoute encore aux nombreux profils cognitifs de la dyslexie. Ici encore, les interprétations du déficit de l'intégration audio-visuelle peuvent différer. La première interprétation implique uniquement des stimuli linguistiques, sans atteinte multisensorielle de bas niveau. La seconde interprétation implique un ralentissement asymétrique du déplacement de l'attention sur des stimuli non linguistiques, uniquement dans le sens visuel - auditif.

Les programmes de remédiation audio-visuelle ont des effets positifs sur la lecture avec des stimuli linguistiques et non-linguistiques. Les résultats de nombreux travaux semblent confirmer que l'apprentissage de la conscience phonémique et du décodage phonémique est bien sûr nécessaire mais doit être associé à l'intégration automatique de l'objet *lettre-son* pour avoir des effets à la fois sur la précision et la vitesse de lecture.

3. Remédiation des procédures de lecture

Nous avons vu dans la section précédente que de multiples interventions de remédiation de la dyslexie développementale ciblent chacune un processus cognitif sous-jacent audio-phonologique, visuo-attentionnel ou intermodalitaire. Or, une autre approche de remédiation est de traiter directement les procédures de lecture sublexicale et/ou lexicale, décrites par les modèles de lecture. Selon l'architecture fonctionnelle des modèles à double voie et en triangle, l'identification d'un mot écrit s'effectue par deux procédures de lecture, la procédure sublexicale phonologique et la procédure lexicale sémantique. De fait, des interventions de remédiation de la procédure sublexicale phonologique ciblent plus spécifiquement le décodage phonologique par le biais des règles de conversion grapho-phonologique (e.g., Heikkilä et al., 2013). À l'inverse, des interventions de remédiation de la procédure lexicale sémantique ciblent

la reconnaissance des mots écrits par le biais de processus orthographiques (e.g., Horowitz-Kraus, 2016; Horowitz-Kraus et al., 2015; Kirk & Gillon, 2009; Korinth et al., 2016; Leloup et al., 2021; Snellings et al., 2009). Par ailleurs, certaines interventions proposent des entraînements successifs ciblant à la fois le décodage phonologique et le recodage lexical (McArthur, Castles, et al., 2015; McArthur, Kohnen, et al., 2015; Simos et al., 2007; Tressoldi et al., 2000).

3.1. Intervention sur la procédure de lecture sublexicale

Hatcher et al. (1994) ont comparé les effets d'un entraînement de la procédure sublexicale axé sur les processus de conversion graphophonologique, sans entraînement de la conscience phonémique, à un entraînement de la conscience phonémique, sans entraînement de la procédure sublexicale, et à un entraînement mixte, combinant les deux entraînements précédents. Menées auprès de 128 faibles lecteurs anglais âgés en moyenne de 7 ans 5 mois avec un âge lexique moyen de 5 ans 9 mois, les sessions de chaque entraînement se déroulent en groupe de 2 à 9 enfants d'une durée de 42 heures pendant 20 semaines (30 à 40 minutes, 4 jours par semaine). Les trois types d'entraînements ont des effets positifs et significatifs sur la lecture, comparés au groupe contrôle sans entraînement. Toutefois, et comme souligné précédemment l'entraînement combiné de la conversion graphophonologique (reconnaissance et écriture de lettres, lecture et écriture de mots et de textes) et de la conscience phonologique (rimes, syllabes, discrimination de sons, segmentation, fusion, omissions, substitutions phonémiques) est plus efficace que chaque entraînement isolé, en accord avec les résultats de nombreuses méta-analyses (Bus & van IJzendoorn, 1999; Ehri et al., 2001; Galuschka et al., 2014; Scammacca et al., 2007).

Avec une procédure expérimentale plus épurée, Heikkilä et al. (2013) compare un entraînement de la conversion grapho-phonologique à un entraînement en mathématique.

L'intervention est menée auprès de 150 faibles lecteurs finlandais, d'âge moyen de 9 ans 2 mois, (durée de 50 minutes à 1 heure 40 : pendant 2 à 3 semaines (10 sessions de 5 à 10 minutes chacune, de 3 à 5 fois par semaine). Les participants répartis en 3 groupes effectuent un entraînement informatisé de la correspondance entre des syllabes orales et des syllabes écrites avec des syllabes de 2 lettres ($n = 48$), des syllabes fréquentes de 4 lettres ($n = 30$) et des syllabes peu fréquentes de 4 lettres ($n = 37$). Le groupe contrôle ($n = 35$) effectuent, quant à lui, un entraînement en mathématiques. Les résultats relèvent des effets sur la précision et la vitesse de lecture des syllabes entraînées mais ne se généralisent pas à la lecture de mots non entraînés. Les auteurs soulignent que l'effet est plus marqué pour les syllabes peu fréquentes et longues. Même si la durée très courte de l'entraînement peut expliquer l'absence de généralisation à la lecture de mots, l'entraînement de la correspondance graphophonologique sans entraînement de la conscience phonémique reste ici peu efficace, allant aussi dans le sens des méta-analyses (Bus & van IJzendoorn, 1999; Ehri et al., 2001; Galuschka et al., 2014; Scammacca et al., 2007).

3.2. Intervention sur la procédure de lecture lexicale

La seconde hypothèse est basée sur le fait que les remédiations axées sur la procédure lexicale orthographique devraient améliorer préférentiellement la fluence en lecture et l'orthographe lexicale, alors que les remédiations axées sur la procédure de lecture sublexicale devraient améliorer surtout la précision du décodage phonologique en lecture (conversion graphème-phonème) et en production écrite (conversion phonème-graphème).

La fluence en lecture

En référence à l'hypothèse que le déficit de synchronisation entre les unités phonologiques, orthographiques et sémantiques serait dû à une activation permanente des unités phonologiques qui empêcherait l'activation des unités orthographiques et sémantiques, Breznitz (1997) a développé deux paradigmes ayant pour objectif d'inhiber le décodage phonologique et ainsi favoriser la fluence en lecture.

Le premier paradigme de la *lecture accélérée*, utilise un programme informatisé *RAP* (Breznitz, 2006) qui contrôle la vitesse de défilement d'un texte sur l'écran : le texte s'efface lettre par lettre dès que la lecture débute. Une vitesse individuelle accélérée est calculée pour chaque enfant et correspond à la vitesse la plus élevée obtenue lors de la lecture de 6 textes. De nombreuses études ont montré que le programme *RAP* améliore non seulement la vitesse mais également la précision et la compréhension de lecture chez des adultes et des enfants avec ou sans difficultés de lecture (pour une revue voir Korinth & Nagler, 2021). Outre l'effet positif sur la fluence et la compréhension en lecture, le programme *RAP* améliore également la vitesse de traitement, la mémoire de travail, la mémoire visuelle et la flexibilité cognitive (Breznitz & Share, 1992; Horowitz-Kraus, Cicchino, et al., 2014; Horowitz-Kraus & Breznitz, 2013). Ce programme a été validé dans plusieurs langues : anglais, allemand, néerlandais et hébreu (Korinth & Nagler, 2021). Adaptable à chaque individu et pouvant être utilisée en classe, la « lecture accélérée » présente l'avantage d'être facile à appliquer à grande échelle.

Le deuxième paradigme, le *masquage auditif*, consiste à diffuser un distracteur sonore dans un casque (une chanson par exemple) pendant que l'enfant lit, afin d'inhiber un le codage phonologique altéré et favoriser une lecture par la procédure lexicale et contextuelle (Breznitz, 1997a). Comme attendu et seulement pour les enfants LD, les compétences en lecture augmentent en condition de masquage auditif et un gain supplémentaire est obtenu lorsque les conditions de masquage auditif et de lecture accélérée sont associées.

Selon ces hypothèses, Leloup et al. (2021) ont évalué deux paradigmes de remédiation, la *lecture répétée* et le *masquage auditif* dans le but de favoriser la fluence en lecture de 54 LD français, âgés de 9 ans à 12 ans 11 mois (durée : 7 heures 50 pendant 5 semaines, 6 jours par semaine, 15 minutes par jour). Pendant la période d'entraînement, des textes sont lus en *lecture répétée* avec *masquage auditif* et l'entraînement se fait à domicile. La *lecture répétée* implique de lire un texte plusieurs fois avec contrôle de la compréhension et des erreurs, sans qu'elle soit accélérée. Le *masquage auditif* consiste à écouter une chanson en français pendant que l'enfant lit le texte à voix haute. Ces enfants avaient préalablement bénéficié pendant les 8 mois précédant cette intervention, d'une intervention orthophonique classique de 30 minutes par semaine. De forts effets significatifs ($d= 1.14$) sur l'efficiencia en lecture d'un texte par rapport à la période contrôle intra-sujets correspondant à l'intervention orthophonique classique sont relevés et ces gains d'efficiencia en lecture se maintiennent au moins trois mois après l'arrêt de l'intervention.

Fait intéressant, en comparant les deux conditions d'entraînement, cette étude précise que la combinaison des deux paradigmes, *lecture répétée* et *masquage auditif* est plus efficace que l'utilisation du paradigme *lecture répétée* sans *masquage auditif*. Ainsi, ici encore, l'efficacité de la combinaison de deux types d'entraînement renvoie à l'hétérogénéité des profils cognitifs des LD (Ramus & Ahissar, 2012), d'où l'intérêt de combiner les stratégies de remédiation afin de maximiser l'efficacité des interventions de remédiation, idée que nous défendons dans cette thèse et que nous exposons au chapitre 3.

L'orthographe lexicale

Venons-en maintenant au développement de la mémoire orthographique qui est un autre moyen de renforcer la procédure lexicale orthographique. Le développement de la lecture et de l'orthographe est interdépendant et partage des processus cognitifs sous-jacents communs,

comme les processus cognitifs phonologiques et visuo-attentionnels. L'orthographe est essentielle à la lecture parce qu'elle renforce la conscience des phonèmes et le principe alphabétique, tandis que l'exposition à la lecture stimule l'orthographe en renforçant les représentations orthographiques (Ehri, 2005). Si la lecture est altérée, le trouble d'identification du mot écrit devient un obstacle à la compréhension de texte. De la même manière, le trouble de l'orthographe devient un obstacle à la production écrite de texte (Berninger et al., 2002; Graham & Harris, 2005).

Pour défendre cette idée, une récente méta-analyse confirme que les lecteurs dyslexiques présentent un déficit des *connaissances orthographiques* aussi prononcé que les déficits de la conscience phonologique et de la dénomination rapide automatisée (Georgiou et al., 2021). Selon Appel (2011), les *connaissances orthographiques* ou encore *connaissances des modèles orthographiques* représentent la capacité de développer et d'accéder à des représentations mentales des mots écrits stockées en mémoire à long terme. Les représentations mentales également appelées *Représentations Graphémiques Mentales* (Apel et al., 2012) se construisent par la mise en correspondance de combinaisons de sons et de combinaisons de lettres, en aval du principe alphabétique de mise en correspondance d'un phonème et d'un graphème et permettent d'orthographier des mots phonétiquement irréguliers et fréquents (e.g., *dans, avec, maison*). Ces *Représentations Graphémiques Mentales* ou *connaissances orthographiques* se développeraient par la conscience des combinaisons de lettres autorisées dans la langue ou *conscience graphotactique*, ainsi que par la compréhension et l'utilisation des règles générales d'orthographe pour développer des *modèles orthographiques* ou conscience des *régularités orthotactiques*. Le développement de ces *Représentations Graphémiques Mentales* et de la conscience des *régularités orthotactiques* favoriserait donc le développement des *connaissances orthographiques* et par conséquent, l'acquisition de l'orthographe, au-delà du principe alphabétique (Treiman & Kessler, 2006).

Cependant, force est de constater qu'il est difficile de définir précisément le terme de *connaissances orthographiques* à partir de la littérature scientifique. En effet, certains auteurs emploient les termes de *conscience orthographique* ou de *compétences orthographiques* (Lin et al., 2019; Yeung et al., 2016) pour évoquer *les connaissances orthographiques*. D'autres auteurs définissent les *connaissances orthographiques* comme *la reconnaissance visuelle rapide de mots* (Newby et al., 1993) ou *la capacité d'accéder à des codes visuo-orthographiques pour des mots spécifiques* (Manis et al., 1993), *la capacité à former, stocker et accéder à des représentations orthographiques de mots* (Stanovich & West, 1989) ou encore *la mémoire de modèles visuo-orthographiques spécifiques* (Barker et al., 1992). Ces deux dernières définitions ont le mérite de prendre en compte la mémoire lexicale orthographique des mots écrits qui participe à l'apprentissage de l'orthographe, de la même façon que la mémoire lexicale phonologique des mots parlés participe à l'apprentissage de la lecture.

Or, les enfants LD ont le plus souvent un déficit de la mémoire orthographique, ce qui nécessite davantage d'expositions et de productions écrites pour se souvenir des lettres d'un mot, comparé aux enfants NL (Ehri & Saltmarsh, 1995). Augmenter seulement les expositions à la lecture ne suffit pas, il faut également écrire pour renforcer la mémoire orthographique (Campbell, 1983). Des études ont ainsi établi un lien entre les compétences en mémoire lexicale orthographique, l'apprentissage de la lecture, les compétences en orthographe lexicale (Stanké et al., 2008) et la dyslexie développementale (Stanké, 2016, p 145-174). Le déficit de la mémoire lexicale orthographique se traduirait chez les enfants LD (Stanké et al., 2016) par des difficultés à mémoriser les représentations orthographiques en mémoire à long terme qui seraient à l'origine de l'altération de l'orthographe lexicale (Mehlhase et al., 2019; Stanké et al., 2021). Plus précisément, certains auteurs postulent qu'un déficit spécifique de la mémoire déclarative dans l'encodage, la consolidation et/ou la récupération des informations lexicales

orthographiques altérerait la mémoire lexicale orthographique et entraverait le maintien à long terme des représentations orthographiques chez des enfants dysorthographiques (Stanké et al., 2021).

La mémoire lexicale orthographique est particulièrement sollicitée dans les systèmes orthographiques inconsistants comme l'anglais ou le français. En français, chaque phonème correspond en moyenne à 3,7 graphèmes (Ziegler et al., 1996) et 56 % des mots sont inconsistants et donc ne peuvent pas s'écrire à partir des correspondances phonème-graphème (Lété et al., 2008). L'apprentissage de l'orthographe des mots inconsistants, nécessitant une bonne capacité de mémoire lexicale orthographique, est complexe pour les NL (Daigle et al., 2020; Hazard et al., 2020) et d'autant plus pour les LD (Daigle et al., 2016; Mazur-Palandre, 2018). Des approches de remédiation compensatoires comme l'apprentissage par analogie des régularités morphologiques (Bowers et al., 2010; Carlisle, 2010; Casalis et al., 2018; Casalis & Colé, 2018; Galuschka et al., 2020; Goodwin & Ahn, 2010) ou l'apprentissage par analogie des régularités graphotactiques de la langue (Pacton et al., 2019; Stanké et al., 2021) se sont avérées efficaces pour améliorer l'orthographe lexicale des enfants LD dans différentes langues dont le français.

L'apprentissage par analogie des régularités morphologiques d'une langue joue un rôle dans le développement des représentations orthographiques. Les morphèmes sont des unités fréquentes qui véhiculent du sens et composent de nombreux mots (e.g., la base « *terre* » compose « *terrestre, terrier, terrain* » ; le suffixe « *eur* » compose « *chanteur, danseur* » et le préfixe « *re* » compose « *relire, refaire* »). Les connaissances de ces régularités morphologiques jouent un rôle dans le développement des procédures d'identification des mots écrits et de l'orthographe lexicale (Colé et al., 2012). Chez le lecteur dyslexique, le traitement morphologique est préservé et peut servir de support à une stratégie de remédiation compensatoire basée sur le traitement sémantique pour améliorer le traitement orthographique

(Casalis et al., 2019; Quémart & Casalis, 2015). En effet, des interventions visant un entraînement des régularités morphologiques des préfixes et suffixes améliorent les compétences en lecture et en orthographe des enfants et adultes LD (Arnbak & Elbro, 2000; P. N. Bowers et al., 2010; Goodwin & Ahn, 2010; Gray et al., 2018).

L'apprentissage par analogie des régularités graphotactiques d'une langue joue un rôle dans le développement des représentations orthographiques. Les régularités graphotactiques correspondent à la fréquence de combinaisons des lettres ou groupes de lettres (Chetail, 2017; Mano, 2016; Pacton et al., 2019). En français, par exemple, le doublement plus fréquent de certaines consonnes se produit seulement dans certains contextes orthographiques. Ainsi, les enfants s'appuieraient sur les régularités graphotactiques pour acquérir l'orthographe lexicale, indépendamment des habiletés phonologiques (e.g., Connors et al., 2011; Conrad et al., 2013). Les enfants LD qui ont un lexique orthographique limité sont cependant capable d'extraire des régularités du système orthographique et de s'appuyer sur des indices probabilistes pour épeler des mots et des pseudomots (Marinelli et al., 2021).

Des techniques de remédiation cognitive comme l'apprentissage explicite sans erreur (Meulemans et al., 2003; Stanké et al., 2016) et l'apprentissage par répétition d'une séquence au cours d'une tâche de rappel (Bogaerts et al., 2015; Hebb, 1961) ont également permis d'optimiser les gains sur les compétences en orthographe lexicale des enfants et adultes LD. L'apprentissage par répétition selon la règle de Hebb implique la répétition d'une séquence ordonnée de stimuli au cours d'une tâche de rappel sériel immédiat. Cet apprentissage répétitif et sériel est plus efficace que l'apprentissage répétitif dans un ordre aléatoire et favorise la rétention de la séquence dans la mémoire à long terme (Hebb, 1961).

Plus précisément, nous décrivons ici deux interventions : la première parce qu'elle utilise uniquement l'apprentissage sériel répétitif ; la deuxième parce qu'elle utilise plusieurs techniques de remédiation pour améliorer la mémoire lexicale orthographique auprès de LD de

langue francophone : l'apprentissage sériel répétitif, l'apprentissage explicite sans erreur, l'apprentissage par analogie de régularités morphologique et graphotactiques.

La première intervention, menée auprès de 18 adultes LD âgés en moyenne de 20 ans met en évidence des compétences d'apprentissage sériel par répétition de séquences de syllabes écrites inférieures à celles de 17 adultes NL de même âge (Bogaerts et al., 2015). En effet, les LD auraient besoin de deux fois plus de répétitions d'une séquence de syllabes que les NL pour atteindre le critère d'apprentissage. De plus, la capacité de lexicalisation des séquences de syllabes apprises (e.g., le pseudomot /la-va-by/ est lexicalisé, est lu "lavabo") qui s'effectue implicitement chez le NL, nécessite un apprentissage explicite chez le LD. En revanche, bien que l'apprentissage par ordre sériel soit plus lent et plus faible chez le LD, les séquences apprises se maintiennent au moins un mois après l'arrêt de l'entraînement, évoquant la possibilité d'une remédiation par ce type d'apprentissage (Bogaerts et al., 2015). Par ailleurs, ces résultats suggèrent un déficit d'encodage de l'ordre sériel chez les LD plutôt qu'un déficit de rétention à long terme d'une représentation sérielle acquise, ce qui peut expliquer la difficulté à extraire des régularités phonologiques et orthographiques et apprendre des nouvelles représentations orthographiques des mots (Szmalec et al., 2012). Cette hypothèse, *Serial-Order Learning Impairment in Dyslexia* (Szmalec et al., 2011) est également compatible avec les déficits phonologiques mis en évidence lors de tâches d'analyse phonémique, de répétitions de pseudomots et de dénomination rapide automatisée qui impliquent également un traitement de l'ordre sériel (Bogaerts et al., 2015).

La deuxième intervention menée auprès d'élèves québécois en 3e année de primaire et présentant des troubles de l'orthographe, relève des effets positifs similaires pour les deux types d'entraînements : les régularités morphologiques et les régularités graphotactiques (Stanké et al., 2021). Huit séquences se sont déroulées pendant 6 mois, au cours desquelles trois jours par séquence étaient consacrés aux entraînements morphologiques et graphotactiques pendant

environ 30 minutes, par l'exposition, la pratique et les rappels répétés, la rétroaction immédiate et l'apprentissage sans erreur. Les effets positifs immédiats de ces entraînements graphotactiques et morphologiques sont un plus modérés chez les enfants LD que chez les enfants avec trouble du langage oral ou avec un trouble de l'orthographe isolée. Cependant, malgré le petit effectif de ce sous-échantillon⁸ de 24 enfants présentant des troubles du langage oral et/ou du langage écrit, il est important de souligner que le maintien des apprentissages des enfants LD est plus stable dans le temps que celui des enfants présentant des troubles de l'orthographe sans trouble de la lecture. Les entraînements pour renforcer les régularités morphologiques et graphotactiques amélioreraient donc la mémoire lexicale orthographique des enfants LD. Ces résultats restent à confirmer à l'issue de l'étude en cours mais sont en accord avec les conclusions de l'étude de Bogaerts (2015) évoquée plus haut, où les séquences apprises via l'apprentissage sériel par répétition se maintiennent au moins un mois après l'entraînement.

Pour conclure, d'après la méta-analyse de Squires et Wolter (2016), les interventions visant à développer explicitement *les connaissances orthographiques*, amélioreraient de façon significative les compétences en orthographe des enfants LD âgés de 6 à 14 ans, avec des tailles d'effets modérées à fortes. De plus, cette méta-analyse souligne que les interventions qui sont axées sur de multiples stratégies de remédiation et qui associent le développement explicite des connaissances orthographiques au développement de la conscience phonologique, morphologique ou sémantique ont des tailles d'effets plus importantes en ce qui concerne les gains en orthographe que les interventions axées sur une seule stratégie de remédiation. Ainsi, il semblerait que cet adage, d'associer différentes interventions, devienne un *leitmotiv* dans les interprétations que nous pouvons faire de cette synthèse de la littérature, quels que soient les théories et les travaux évoqués. Toutefois, ces associations doivent être justifiées par les données actuelles de la littérature, et être limitées à deux entraînements simultanés.

⁸ L'étude est en cours et les résultats présentés sont préliminaires.

3.3. Intervention sur les procédures sublexicales et lexicales

Les données de la littérature, précédemment rapportées, semblent valider que les interventions ciblant à la fois les procédures sublexicale et lexicale seraient plus efficaces. Dans cet ordre d'idées, une intervention préliminaire contrôlée quasi randomisée (McArthur, Castles, et al., 2015) menée auprès de 3 groupes de lecteurs dyslexiques anglais âgés de 7 à 12 ans a testé l'efficacité de 3 types d'intervention : le groupe 1 bénéficie d'un entraînement de la procédure sublexicale ou *phonics training* (entraînement aux règles de correspondance graphème-phonème) auprès de 36 LD ; le groupe 2 d'un entraînement de la procédure lexicale ou *sight word training* (entraînement à la reconnaissance de mots irréguliers) auprès de 26 LD ; et le groupe 3 d'une remédiation associant ces deux entraînements alternés un jour sur deux auprès de 32 LD.

Cette étude a été répliquée par un essai contrôlé randomisé (McArthur, Kohnen, et al., 2015) auprès de 41 enfants LD pour le groupe 1 et de 44 enfants LD pour le groupe 2, âgés de 7 à 12 ans. L'entraînement mixte du groupe 3 n'a pas été répliqué car, selon l'équipe de McArthur, Castles, et al. (2015), il ne montrait aucun avantage par rapport aux entraînements uniques. Après une période de 8 semaines sans entraînement pour les deux groupes, le groupe 1 a effectué le *phonics training* pendant 8 semaines, suivi du *sight word training* pendant 8 semaines avec le programme ludique de lecture en ligne *Literacy Planet* (durée 20 heures pour chaque entraînement, 5 fois par semaine, 30 minutes par jour). Le groupe 2 a effectué les mêmes entraînements dans l'ordre inverse.

Ces deux essais contrôlés mettent en évidence les mêmes effets. Le *sight word training* produit de fortes tailles d'effets sur la lecture de mots irréguliers ($d = 0,9$), la fluidité de lecture de mots ($d = 1,4$) mais pas d'effet sur la lecture des pseudomots. Le *phonics training* produit de fortes tailles d'effet sur la lecture de mots irréguliers ($d = 0,8$) et de mots réguliers ($d = 0,9$) ainsi que sur la compréhension de lecture ($d = 0,9$) et une faible taille d'effet sur la précision (d

= 0,3) et la vitesse de lecture des pseudomots ($d = 0,2$). L'ordre des entraînements n'a pas d'effet sur l'évolution des compétences en lecture de mots ou de pseudomots. Il est important de souligner que, dans ces deux essais, les enfants sont d'abord qualifiés de « dyslexiques » (McArthur, Castles, et al., 2015) puis de « mauvais lecteurs » (McArthur, Kohnen, et al., 2015) alors que les critères d'inclusion sont les mêmes et n'excluent pas les enfants porteurs de trouble développemental du langage oral ou de trouble développemental de l'attention avec ou sans hyperactivité.

Le *sight word training* se compose de 56 niveaux progressifs et de 9 entraînements composés de listes de mots irréguliers à entraîner. Le passage d'un exercice à l'autre nécessite un taux de réussite de 80 % de lecture correcte des mots irréguliers de la liste. Les 9 entraînements proposent l'épellation d'un mot vu puis caché (*Flash Card*), le classement des mots irréguliers selon l'ordre alphabétique (*Alphabet Monster*), la désignation d'un mot entendu dans un tableau de mots statiques (*Static Words*) ou de mots se déplaçant sur l'écran à cibler (*Floating Words*), la reconnaissance de deux mots identiques (*Word Snap*), la reconnaissance de la première et dernière lettre d'un mot dans une matrice de lettres (*Word Finder*), l'épellation d'un mot à partir des lettres mélangées (*Word Builder 1 et 2*), l'épellation d'un mot prononcé (*Spell This Word*).

Le *phonics training* se compose de 220 niveaux ciblant le décodage et l'encodage phonologique de consonnes, voyelles, digraphes, diphtongues, et graphies contextuelles et irrégulières dans des mots réguliers. Le passage au niveau suivant nécessite un taux de réussite de 100 %. Les 9 entraînements proposent l'apprentissage des correspondances graphème-phonème (*Movie*), la correspondance entre la lettre/son et l'image d'un mot entendu (*I Spy*), la position d'une lettre/son dans le mot écrit (*Lettre Sound Position*), la production de lettres manquantes dans un mot (*Missing Letters*), la correspondance mot régulier et image (*Click On Words*), la reconnaissance d'un mot entendu dans une matrice de mots écrits (*Bingo*), la

correspondance entre des lettres et l'image d'un mot (*Blending*). Nous constatons que les entraînements *Bingo* et *Click On Words* active aussi la voie lexicale.

Plus récemment, une autre intervention a été menée successivement en deux phases sur les deux procédures sublexicale et lexicale (Tilanus et al., 2019). La première phase propose 12 séances axées sur la procédure sublexicale et la deuxième phase, plus longue, propose 36 séances axées sur la procédure lexicale afin d'automatiser les connaissances acquises en lecture et en orthographe à la première phase. Pendant les deux phases, 122 lecteurs LD néerlandais, âgés de 7 à 8 ans, effectuent, d'une part, ces 48 séances hebdomadaires de 45 minutes avec des cliniciens spécialisés et d'autre part, des entraînements à domicile pendant 20 minutes, 4 fois par semaine pour la lecture et pendant 10 minutes, 2 fois par semaine pour l'orthographe. Les entraînements de la phase 1 ciblent la précision de décodage et de transcription à travers la correspondance graphophonologique de mots monosyllabiques à l'aide de la segmentation auditive en phonèmes, de la segmentation visuelle en graphèmes, de supports symboliques, de carte mnémotechnique et de grille sonore. Les entraînements de la phase 2 ciblent la vitesse de décodage à travers la lecture et l'orthographe de mots polysyllabiques à l'aide de *flashcards* donc l'activation de la procédure lexicale mais aussi à l'aide de la segmentation syllabique, donc l'activation de la procédure sublexicale. Les compétences en lecture et en orthographe de mots et de pseudo-mots se sont améliorées de façon significative au cours des deux phases mais sont restées inférieures à celles du groupe contrôle de 108 NL âgés de 6 à 8 ans car ce groupe a également suivi les entraînements. Faits intéressants dans cette étude, des analyses de médiation indiquent que les performances initiales en conscience phonologique (suppression de phonèmes) prédisent les compétences de précision en lecture de pseudo-mots et en orthographe, après l'intervention. Les performances initiales en dénomination rapide automatisée prédisent les compétences d'efficacité en lecture mais pas les compétences en orthographe, après l'intervention. Ces résultats sont en accord avec les prédictions mises en

évidence dans d'autres études (Otaiba et Fuchs, 2002 ; Frijters et al., 2011 ; Furnes & Samuelsson, 2011 ; Scheltinga et al., 2010 ; Zoccolotti et al., 2014). Ainsi, le degré de réactivité à une intervention ciblant les deux procédures de lecture pourrait être prédit par les capacités de conscience phonologique et de dénomination rapide initiales.

Pour conclure, les deux procédures lexicale et sublexicale peuvent être entraînées simultanément ou l'une après l'autre dans un ordre indifférencié. De plus, il faut souligner que l'analyse des entraînements proposés pour stimuler l'une ou l'autre procédure révèlent des processus cognitifs entraînés communs aux deux procédures qui annulent ainsi leur différenciation. En effet, il semble illusoire de vouloir automatiser le codage phonologique sans un accès orthographique et sémantique. De même, il semble illusoire de vouloir automatiser le codage orthographique sans un accès phonologique et sémantique. Comme nous le décrivons dans la section suivante, les interventions qui ciblent les entraînements de la conscience phonémique et du codage phonologique sublexical, *phonics instructions*, inclus également des entraînements ciblant le codage orthographique lexical et le codage sémantique pour être efficaces (e.g., Torgesen et al., 2001; Vellutino et al., 2004). De même, entraîner un processus visuo-attentionnel et le codage orthographique chez un enfant qui n'a pas acquis suffisamment de correspondances graphophonologiques ne sera pas efficace.

Résumé 2.7

Interventions sur les procédures de lecture

La remédiation de la procédure sublexicale phonologique cible le décodage phonologique par le biais des règles de conversion grapho-phonologiques. La remédiation de la procédure lexicale sémantique cible la reconnaissance des mots écrits par le biais de processus orthographiques. Les données des études soulignent que la remédiation du décodage phonologique impliquant la procédure sublexicale s'avère peu efficace lorsqu'elle n'est pas associée à une intervention sur la conscience phonémique.

La remédiation des processus orthographiques impliquant la procédure lexicale sémantique cible, plus spécifiquement, l'amélioration de la fluence en lecture ou de la mémoire orthographique. La fluence en lecture peut être améliorée en tentant de limiter l'activation du code phonologique par « *la lecture accélérée* » ou « *le masquage auditif* ». La mémoire orthographique lexicale peut être améliorée via l'apprentissage par analogie des régularités morphologiques ou graphotactiques de la langue, ou par l'apprentissage répétitif et sériel de Hebb. Les interventions axées sur de multiples stratégies de remédiation qui associent le développement des « *connaissances orthographiques* » au développement de la conscience phonologique, morphologique ou sémantique ont des tailles d'effets plus importantes en ce qui concerne les gains en orthographe.

La remédiation concomitante des deux procédures de lecture sublexicale et lexicale s'avère efficace chez des LD, quel que soit l'ordre des interventions, mais leurs compétences en lecture restent inférieures à celles des NL.

4. Remédiation des déficits cognitifs sous-jacents et des procédures de lecture

Comme évoqué précédemment, l'entraînement de la conscience phonémique est fondamental mais à condition d'être intensif et systématiquement associé à des entraînements de lecture et d'orthographe (voir les méta-analyses, Bus & van IJzendoorn, 1999; Ehri et al., 2001; Galuschka et al., 2014). Nous développons donc particulièrement dans cette section ces

programmes nommés *phonics instruction* qui associent des entraînements des processus cognitifs phonologiques à la procédure sublexicale mais aussi et très souvent à la procédure lexicale (e.g., Lovett et al., 2000; Ryder et al., 2008; Torgesen et al., 2001; Vellutino et al., 2004). Puis nous évoquons aussi d'autres types d'interventions qui associent l'entraînement des processus auditifs (Bonacina et al., 2015; Cancer et al., 2020) ou des processus visuels (Facoetti et al., 2003, 2010; Lorusso et al., 2004, 2006, 2011) à celui des procédures de lecture.

4.1. Conscience phonémique et procédures de lecture

Une des premières interventions longitudinales à avoir associé l'entraînement des procédures de lecture sublexicale et lexicale à l'entraînement de la conscience phonémique est celle de Scanlon et Vellutino (1996), menée auprès de 118 faibles lecteurs au CP, âgés de 6 à 7 ans, comparés à 65 NL recrutés parmi un échantillon de 1284 enfants américains. Parmi les faibles lecteurs, 76 participants bénéficient d'un programme de tutorat quotidien, dit de *Interactive Strategies*, d'une durée environ de 7 h 50 en séance individuelle avec un enseignant formé (30 minutes par session, pendant environ 15 semaines). Chaque séance, adaptée aux besoins individuels de l'enfant, propose des activités conçues pour entraîner les compétences d'identification de mots, d'analyse de mots, de décodage lettre-son, d'orthographe, de production écrite de mots, ainsi que la lecture de textes inconnus et de relecture de textes familiers afin de favoriser la fluidité et la compréhension écrite. Les 42 faibles lecteurs qui constituent le groupe contrôle effectuent des séances en petits groupes ou individuelles, 2 à 3 fois par semaine. À l'issue de la deuxième année de primaire (7 à 8 ans), 67 % des participants ayant bénéficié de ce programme *Interactive Strategies* ne présentent pas de trouble de la lecture, 32,9 % ont des performances en lecture inférieures à celles des NL mais 15 % présentent encore des performances en lecture très faibles. Selon ces auteurs (Scanlon & Vellutino, 1996; Vellutino et al., 2004), cette résistance à l'intervention traduit un trouble

neurodéveloppemental de type dyslexie et la cause de cette résistance serait due à un déficit du traitement phonologique initialement très prononcé. En analysant en détail les entraînements de ce programme, nous observons que les entraînements ciblent de nombreuses compétences (cf. Encadré 2.1) : la conscience phonémique, le décodage phonologique, la lecture répétée, les régularités orthographiques, la mémoire orthographique et la compréhension, ce qui peut probablement expliquer les réponses aux entraînements des LD.

Encadré 2.1

Interactive Strategies

Relecture des textes familiers et des mots du texte que l'enfant ne parvient pas à lire correctement.

Reconnaissance, identification et écriture des lettres non maîtrisées en minuscule et en majuscule en copie et de mémoire.

Correspondance lettre-son, associée à une sensibilisation aux phonèmes, à une identification des mots et à l'écriture.

Création d'un dictionnaire de lettres et de mots commençant par la même lettre et lecture quotidienne des mots.

Conscience phonémique (suppression, articulation et comptage de phonèmes) associé au décodage et à l'écriture des mots.

Familles de mots avec la même forme orthographique afin d'entraîner au repérage des régularités orthographiques de mots appris, et généraliser les formes orthographiques pour lire des mots nouveaux (identifier, épeler et écrire les mots, produire de nouveaux mots, compléter des phrases avec des mots).

Activités de prélecture de nouveaux textes autour du titre, des dessins, d'un possible scénario, du thème, des personnages, des nouveaux mots ou de la lecture alternée entre l'enseignant et le participant.

Lecture de nouveaux textes pour favoriser le processus d'auto-apprentissage et de stratégies de lecture apprises précédemment. Toutes les erreurs sont notées sur un journal afin de les retravailler.

Évaluation informelle de la compréhension et commentaires écrits de l'enfant sur l'histoire.

Identification de mots décontextualisés à haute fréquence sans décodage pour favoriser la lecture globale, augmenter la fluidité de lecture et la compréhension (mots sans contenu et mots fonctionnels) à l'aide de cartes-mots, d'un chronomètre pour favoriser la vitesse et la motivation. Les mots sont ensuite écrits dans le dictionnaire de l'enfant et lus dans les textes.

Écriture d'une histoire par l'enseignant sous dictée de l'enfant.

Découpage des phrases lues en mots et réassemblage de la phrase initiale ou création d'une autre phrase.

Écriture de mots et de phrases par l'enfant avec étayage de l'enseignant.

Basé sur des données probantes, ce programme très complet a permis de distinguer les enfants dont les difficultés de lecture sont causées principalement par des carences environnementales, sociales, économiques ou pédagogiques et les enfants dont les difficultés de lecture sont causées principalement par des déficits cognitifs sous-jacents. Cette distinction précoce est fondamentale pour apporter des réponses adaptées aux enfants LD le plus tôt possible en tenant compte de leurs profils sémiologiques individuels.

Afin de remédier au trouble de la lecture chez des enfants LD âgés entre 8 et 10 ans, Torgesen et al. (2001) ont comparé deux programmes de remédiation intensive associant l'entraînement de la conscience phonémique aux procédures de lecture soit sublexicale (partir des phonèmes pour lire le mot), soit lexicale (partir du mot pour identifier les phonèmes). Le programme *Auditory Discrimination in Depth Program* (Lindamood, & Lindamood, 1984) cible plus spécifiquement la conscience phonémique avec des étayages auditifs, visuels et kinesthésiques pour décoder et écrire les mots alors que le programme *Embedded Phonics* (Torgesen et al., 2001) cible plus spécifiquement la lecture et la production écrite de mots ainsi que la lecture et la compréhension de textes afin de stimuler indirectement la conscience phonémique. Soixante enfants dyslexiques américains répartis aléatoirement en 2 groupes suivent un de ces programmes, d'une durée de 67 heures 30 d'enseignement individuel (deux séances de 50 minutes par jour, pendant 8 semaines). Ces deux programmes améliorent les compétences de lecture et de conscience phonologique, comparés à une période contrôle intra-sujets sans entraînement et les gains obtenus restent stables pendant une période de suivi de deux ans. Toutefois, même si les scores en précision de lecture se normalisent, les scores en vitesse de lecture ne s'améliorent pas pour 98% des LD et 60% conservent des compétences en lecture déficitaires au terme de ces deux années, soulignant les limites de ces programmes.

Avec une approche plus intégrative de la remédiation de la dyslexie développementale, Wise et al., (1999) évaluent l'impact d'un entraînement à la conscience phonémique effectué dans trois conditions différentes, auprès de 122 faibles lecteurs américains âgés en moyenne de 8 ans 8 mois (Wise et al., 1999). La première condition (n = 42) propose un entraînement de manipulation des phonèmes associée à la lecture et à l'écriture de mots et de pseudomots avec les programmes *PAL*, *Phonological Analysis with Letters*, *Nonword reading* et *Spello*. La deuxième condition (n = 43) propose un entraînement de conscientisation des gestes articulatoires des phonèmes avec le programme *ADD*, *Auditory Discrimination in Depth* (Lindamood & Lindamood, 1975). La troisième condition (n = 37) combine les deux précédentes. De plus, cette intervention propose à tous les participants un entraînement de lecture d'histoires, assisté par ordinateur, *ROSS* (*Reading with Orthographic and Speech Support*) qui fournit une rétroaction verbale pour le décodage des mots lorsque l'enfant n'arrive pas à lire un mot. Dans ce cas, il doit cliquer sur le mot qui apparaît en surbrillance, vocalisé par synthèse vocale, avec une segmentation auditive et visuelle en attaques et en rimes pour les mots monosyllabiques (e.g., pl/ant) et en syllabes pour les mots polysyllabiques (e.g., plant/ing). Après 6 mois d'entraînement avec un total de 50 heures, les trois conditions d'entraînement phonologique, menées par des enseignants préalablement formés, ont des effets positifs significatifs et équivalents sur les compétences en lecture de mots et sur les compétences en précision de lecture de pseudomots qui se maintiennent au moins 10 mois après l'arrêt de l'intervention, par rapport à un groupe contrôle d'enfants faibles lecteurs (n = 31) sans entraînement.

La même équipe de chercheurs (Wise et al., 2000) évalue une intervention semblable d'une durée totale plus courte de 29 heures sur 6 mois, avec, cette fois, deux conditions d'entraînement : *Analyse phonologique* et *Lecture en contexte*, auprès de 200 enfants LD américains de la 2^e à la 5^e année de primaire, âgés entre 7 et 11 ans. Les participants attribués à

la condition *Analyse phonologique* (n = 109) sont entraînés aux concepts articulatoires, à la conscience phonologique et à la phonétique explicite en utilisant des parties du programme *A.D.D* (Lindamood, & Lindamood, 1984) avec des entraînements de lecture et d'écriture de pseudomots et de mots axés sur les correspondances lettres/son. Les participants attribués à la condition de *Lecture en contexte* (n = 91) sont entraînés à des stratégies de compréhension de texte. Tous bénéficient du programme *ROSS* (*Reading with Orthographic and Speech Support*), comme dans l'étude précédente. Néanmoins, quand l'enfant clique sur le mot qui apparaît en surbrillance et qui est vocalisé par synthèse vocale, le programme propose cette fois deux conditions d'entraînement : soit une condition « mots entiers », soit une condition « mots segmentés » en attaques, en rimes ou en syllabes. Aucune différence significative n'est relevée entre ces deux conditions qui améliorent le décodage phonologique et la lecture de mots, comparée au groupe contrôle. Comme attendu, les capacités de segmentation phonémique et de décodage phonologique ($d = 0,7$ à $d = 1$) s'améliorent chez les participants attribués à la condition *Analyse phonologique*, mais pas chez les participants attribués à la condition *Lecture en contexte*, effets qui se maintiennent deux ans après l'arrêt de l'intervention. Cependant, la condition *Analyse phonologique* améliore autant la lecture de mots et la compréhension de lecture que la condition *Lecture en contexte*. Les deux conditions étant associées au programme *ROSS*, ces résultats vont dans le sens de la méta-analyse de Galuschka et al. (2014).

Cette méta-analyse (Galuschka et al., 2014) compare différentes approches thérapeutiques sur la base de 49 essais contrôlés randomisés, menés dans les pays anglophones, en Espagne, en Finlande et en Italie, auprès d'enfants et adolescents LD : 29 *phonics instructions*, 3 interventions ciblant la conscience phonémique, 5 ciblant la fluence de lecture, 3 ciblant la compréhension de lecture, 3 ciblant le traitement auditif de stimuli non linguistiques, ainsi que 2 traitements médicamenteux et 4 interventions utilisant des filtres ou des lentilles de couleurs (cf. section 2.3. Le déficit de traitement visuel ; la stabilité oculaire et

le contrôle oculomoteur). Les conclusions énoncent clairement que les interventions les plus efficaces sont les *phonics instructions* qui associent des interventions ciblant la fluence en lecture et la conscience phonologique. Ces interventions proposent des entraînements de la correspondance *lettre-son*, associés à des entraînements de la fusion et de la segmentation de lettres et de phonèmes ou de la segmentation de mots en syllabes et en rimes à l'écrit et oralement. Entraîner seulement la conscience phonémique n'aurait que peu d'effet sur les compétences en lecture et orthographe d'enfants et d'adolescents LD, contrairement aux enfants d'âge préscolaire à risque de troubles de la lecture pour lesquels l'entraînement de la conscience phonémique a été largement reconnu (voir méta-analyses : Bus & van IJzendoorn, 1999; Ehri et al., 2001). De même, entraîner seulement la fluence en lecture n'aurait que peu d'effet sur les compétences en lecture et en orthographe des enfants et adolescents LD, en accord avec une autre méta-analyse (Scammacca et al., 2007).

4.2. Traitement auditif temporel et procédures de lecture

Des programmes d'intervention informatisés ciblant le traitement temporel auditif comme *Fast ForWord* (pour une revue, voir Strong et al., 2011) ou *Earobics* (Hayes et al., 2003; Russo et al., 2005; Warrier et al., 2004) amélioreraient le traitement phonologique. Cependant, ces programmes n'auraient que peu d'effet sur les compétences en lecture et en orthographe des enfants (pour revues, voir Loo et al., 2010; Strong et al., 2011).

Plus récemment, une intervention originale a comparé une stimulation musicale assistée par ordinateur, *Rhythmic Reading Training* (Cancer et al., 2020) qui combine des entraînements de lecture sublexicale avec des entraînements de traitement du rythme (Goswami, 2011), à une intervention visuelle qui combine la stimulation visuelle *hémisphérique spécifique* selon Bakker et Vinke (1985) (Lorusso et al., 2006, 2011) et des jeux vidéo d'action (Franceschini et al., 2013; Franceschini, Trevisan, et al., 2017; Franceschini & Bertoni, 2019). Les deux

interventions, d'une durée de 13 heures (pendant 3 semaines, 3 fois par semaine, 2 fois par jour), sont proposées à 24 enfants LD italiens, âgés de 8 à 14 ans. Les deux interventions améliorent la précision et la vitesse de lecture. L'intervention *Rhythmic Reading Training* a des effets plus grands sur la vitesse de lecture des pseudomots, corrélée avec la conscience phonologique. L'intervention visuelle a des effets plus grands sur la précision en lecture, corrélée avec la dénomination rapide automatisée.

La même équipe de chercheurs évalue une autre intervention d'une durée de 4 h 50 (9 séances de 30 minutes), auprès de 14 LD italiens âgés de 11 à 14 ans entraînés seulement avec le programme *Rhythmic Reading Training*. Les résultats vont dans le sens d'une amélioration des compétences en lecture de mots, pseudomots et texte par rapport à un groupe contrôle de 14 LD n'ayant pas reçu d'intervention (Bonacina et al., 2015).

4.3. Attention visuo-spatiale et procédures de lecture

Le programme *Visual Hemisphere Specific Stimulation (VHSS)* est basé sur le principe d'une présentation tachistoscopique des mots écrits dans l'hémichamp visuel controlatéral à l'hémisphère sous-exploité afin de rééquilibrer l'implication de chaque hémisphère pendant la lecture (Bakker & Vinke, 1985). Les résultats d'une intervention, d'une durée de 1 heure 50 (pendant 4 mois, 2 sessions par semaine de 45 minutes) menée auprès de 12 LD italiens âgés en moyenne de 9 ans 8 mois, entraînés avec le programme *VHSS*, mettent en évidence une amélioration significative des capacités inhibitrices des processus d'attention visuo-spatiale et des compétences en lecture comparé à un groupe de 12 LD de même âge, entraînés selon les mêmes durées avec un programme basé sur la conscience phonologique, les procédures de lecture et les stratégies compensatoires (Facoetti et al., 2003).

Les mêmes auteurs (Lorusso et al., 2005) ont répliqué cette étude, avec la même durée d'entraînement, auprès de 12 LD italiens âgés de 8 à 14 ans, entraînés soit avec le programme

VHSS standard ($n = 6$), soit avec une présentation aléatoire latéralisée des mots et des phrases ($n = 6$). Pour s'assurer que les 12 LD étaient représentatifs de la population, malgré la petite taille de l'échantillon, autrement dit que leur champ visuel différait de celui des lecteurs normaux, comme habituellement décrit dans la littérature, le champ visuel a été mesuré chez 23 enfants NL. Si les deux types de présentation ont des effets significatifs sur la lecture de mots et de pseudomots, la présentation aléatoire dans l'hémichamp visuel droit ou gauche semble élargir le champ attentionnel (*Form-Resolving Field*) à gauche alors que la présentation standard VHSS semble élargir le champ attentionnel à droite. Les auteurs évoquent la possibilité d'un lien de causalité entre la lecture et les mécanismes d'inhibition de l'attention visuo-spatiale. Cependant, soulignons que le programme VHSS implique plusieurs mécanismes sous-jacents qui méritent une analyse plus poussée. Initialement, le programme VHSS a été conçu pour améliorer la lecture des LD en impliquant préférentiellement un hémisphère cérébral gauche ou droit. Selon la classification de Bakker, les LD sont, soit de type L lorsque la lecture recrute quasi exclusivement les procédures d'analyse linguistique sous tendues par l'hémisphère gauche, soit de type P lorsque la lecture recrute quasi exclusivement les procédures d'analyse visuo-spatiale sous tendues par l'hémisphère droit. Le programme VHSS permet une présentation tachistoscopique des mots écrits dans l'hémichamp visuel controlatéral à l'hémisphère sous-exploité pour rééquilibrer l'implication de chaque hémisphère pendant la lecture. La stimulation sélective de l'hémisphère cérébral gauche (pour les types P) ou droit (pour les types L) se fait donc ici par le biais des canaux sensoriels visuels et par l'induction de stratégies de déchiffrage, impliquant plusieurs mécanismes sous-jacents. Outre l'effet sur l'inhibition des processus d'attention visuo-spatiale (Facoetti et al., 2003), des effets sur la vitesse de traitement, sur la mémoire à court terme (Lorusso et al., 2004, 2006), sur la conscience phonologique et la précision de lecture (Lorusso et al., 2011) sont également relevés. De plus, la présentation tachistoscopique centrale et non plus latéralisée, induit des

effets positifs sur l'orthographe des LD dont le profil est mixte, de type M (Masutto et al., 1994), suggérant un rôle de l'intégration interhémisphérique dans le traitement du mot écrit. Ces résultats laissent supposer que les effets induits par le programme *VHSS* varient en fonction du type de dyslexie et sont dus à la fois à la présentation latéralisée et la présentation tachistoscopique des mots écrits (Lorusso et al., 2011).

Résumé 2.8

Interventions sur les déficits cognitifs sous-jacents et les procédures de lecture

Les programmes d'intervention ciblant à la fois les procédures de lecture et la conscience phonémique ou « *Phonics Instruction* » seraient plus efficaces que les programmes d'intervention ciblant uniquement les procédures de lecture ou uniquement la conscience phonémique. Les programmes d'intervention ciblant à la fois la conscience phonémique et la procédure de lecture sublexicale seraient les mêmes effets que les programmes d'interventions ciblant à la fois la conscience phonémique et la procédure de lecture lexicale. Cependant, 60 % des faibles lecteurs entraînés garderaient des compétences en lecture inférieures à celles des normolecteurs (Torgesen et al., 2001).

Les programmes d'intervention ciblant à la fois des entraînements de lecture sublexicale et de traitement du rythme ou « *Rhythmic Reading Training* » ou ciblant à la fois la stimulation visuelle spécifique de l'hémisphère par présentation latéralisée tachistoscopique des mots et les jeux vidéo d'action amélioreraient les compétences en lecture.

Les programmes d'intervention ciblant la lecture de mots en présentation tachistoscopique latéralisée *VHSS* ou centrale amélioreraient la lecture et l'orthographe selon le type de dyslexie.

De plus en plus de travaux de recherche, ou du moins leurs perspectives de recherche, tendent à combiner les entraînements de plusieurs DCSJ et des procédures de lecture afin d'en augmenter l'efficacité en accord avec une hypothèse causale multifactorielle de la dyslexie.

Tableau 2.2*Interventions ciblant les déficits cognitifs sous-jacents et/ou les procédures de lecture*

Déficits ciblés Langue	Auteurs Nom du programme	Groupe expérimental Âge	Groupe contrôle	Durée Fréquence	Amélioration significative Maintien
Remédiation des déficits cognitifs sous-jacents phonologiques					
Conscience phonologique (syllabes et phonèmes) et décodage phonologique (syllabes et mots) Américain	<i>The ABDs of Reading</i> Étude 1 Williams et al., 1980	7 à 12 ans n = 36	Sans entraînement n = 51 (LD) n = 35 (NL)	29 min 5x/sem 26 semaines	Conscience phonémique Décodage de mots et pseudomots Maintien à 6 mois
	<i>The ABDs of Reading</i> Étude 2 (replication) Williams et al., 1980	7 à 12 ans n = 60	n = 42 (LD)		
Mémoire à court terme Chinois	<i>Étude 1 : Mémoire verbale</i> Yang et al., 2017	9,7 ans N = 12 (LD)	N = 11 (LD)	15 j 15 min/j 5j/sem À l'école	Conscience phonologique Fluidité de lecture de mots
	<i>Étude 2 : Mémoire visuo-spatiale</i> Yang et al., 2017	9,9 ans N = 11 (LD)	N = 11 (LD)		
Dénomination rapide automatisée Italien	<i>Run the Ran</i> Pecini et al., 2019	7 à 10 ans N = 24 (LD)	N = 21 (LD) avec entraînement de lecture	5 à 15 min 3 à 5 j/sem 3 mois À domicile	Vitesse et précision de lecture
Dénomination rapide automatisée Français	<i>DRA-R</i> Items répétés <i>DRA-NR</i> Items non répétés Van der Stappen et al., 2018	7 ans N = 18 LD	n = 18 LD	25 min 2j/sem 2 mois	Vitesse de lecture de mots
Déficits ciblés Langue	Auteurs Nom du programme	Groupe expérimental Âge	Groupe contrôle	Durée Fréquence	Amélioration significative Maintien
Remédiation des déficits cognitifs sous-jacents auditifs					
Perception catégorielle Français	<i>RapDys</i> Zoubrinetzky et al., 2019	10,7 ans N = 22 LD RapDys et Maeva	N = 23 LD Maeva et RapDys	15 min 5j/sem 6 semaines	Conscience phonémique EVA Lecture texte et mots
Perception de la parole dans le bruit Néerlandais	Amplification du « rise time ». Van Hirtum, 2021	9 à 12 ans N = 30 LD	N = 29 NL	200 phrases	Normalisation de la perception de la parole dans le bruit
Temporal Sampling Framework Traitement auditif temporel Rythme et musique Anglais d'origine caucasienne	Activités musicales + <i>Dee Dee</i> Task+ rythme Thomson, 2013	9,4 ans N = 9 LD Randomisation	9,5 ans N = 12 LD Discrimination de phonèmes 9,4 ans N = 12 LD	30min 1j/semaines	Conscience phonologique Pas d'effet sur la lecture

Temporal Sampling Framework Traitement auditif temporel Rythme et musique Anglais	Activités musicales + <i>Dee Dee</i> + rythme Bhide, 2013	6, 9 ans N = 10 LD	6,7 ans N = 9 GraphoGame	25 min 2j/sem 8 semaines	Orthographe Traitement auditif Mémoire de travail
Temporal Sampling Framework Traitement auditif temporel Rythme et musique Français	<i>Cognitivo-Musical-Training</i> Étude 1 Habib et al., 2016	8,2 à 11,7 ans N = 12 LD	N = 22 NL	3 jours 18 h	Perception catégorielle
Temporal Sampling Framework Traitement auditif temporel Rythme et musique Français	<i>Cognitivo-Musical-Training</i> Étude 2 Habib et al., 2016	7 à 12 ans N = 12	NA	3h/sem 6 semaines	Lecture Conscience phonologique Attention auditive Maintien à 6 semaines
Temporal Sampling Framework Traitement auditif temporel Rythme et musique Brésilien	Activités musicales Cogo-Moreira et al., 2012 ECR	8 à 10 ans N = 114 LD	N = 121 LD Sans entraînement	50 min 3j/sem 5 mois	Lecture mots et textes Conscience phonologique Résultats scolaires
Traitement auditif rapide Discrimination de fréquence Anglais	Discrimination consonnes - voyelles Discrimination voyelles Attention auditive soutenue Mc Arthur et al., 2008	6 à 15 ans N = 20 LD N = 8 TDL	N = 27 NL	30 min/j 4j/sem 6 semaines	Tâches psychoacoustiques Maintien 6 semaines Pas d'effet spécifique sur l'orthographe et la répétition de phrases
Déficits ciblés Langue	Auteurs Nom du programme	Groupe expérimental Âge	Groupe contrôle	Durée Fréquence	Amélioration significative Maintien
Remédiation des déficits cognitifs sous-jacents visuels					
Stimuli à faible fréquence spatiale et haute fréquence temporelle Anglais	Programme <i>PATH to Reading</i> Stimulation visuelle Lawton, 2016	7,4 ans N = 26 DL	N = 6 DL <i>Fast ForWord</i> (Allongement de la durée des phonèmes) N = 26 <i>Learning Upgrade</i> (lecture)	20 à 30 h 20 semaines	Sensibilité au contraste à faible fréquence spatiale et haute fréquence temporelle Attention Fluidité de lecture Mémoire de travail
Sensibilité aux mouvements Hébreu	Entraînement magnocellulaire Détection de mouvements et de formes Chouake et al., 2012	24 ans N = 11 LD Entraînement magnocellulaire Randomisation	N = 11 DL Entraînement parvocellulaire Détection de lignes parallèles N = 10 sans entraînement	5 jours 3 heures/jour	Compétences en décision lexicale Effets des deux entraînements MC et PC

Entraînement visuel magnocellulaire Persan	Détection de mouvements Saccades oculaires Accommodation visuelle Ebrahimi et al., 2019	8 à 11 ans N = 13 Randomisation	N = 11 Videogame pour cuisiner	30 à 40 min 12 sessions 2j/sem 6 semaines	Détection de mouvements cohérents Saccades oculaires Précision en lecture
Stabilité oculaire Anglais Italien	Mouvements oculaires Solan et al., 2001 Entraînements oculomoteurs avec <i>eye tracker</i> Bucci et al., 2018	11,4 ans N = 15 LD 10,3 ans N = 16 LD	N = 16 Compréhension de lecture NA Étude pilote	1 h 12 sessions 15 min 5 j/sem 8 semaines	Fixations Saccades Compréhension de lecture Effets pour les deux groupes Saccades Compétences visuo-attentionnelles et magnocellulaires
Français	Entraînement oculomoteur et d'attention visuelle Caldani et al., 2020	8 à 12 ans N = 25 LD Randomisation	N = 25 Sans entraînement	10 min	Fixations oculaires et vitesse de lecture
Déficits ciblés Langue	Auteurs Nom du programme	Groupe expérimental Âge	Groupe contrôle	Durée Fréquence	Amélioration significative Maintien
Remédiation des déficits cognitifs sous-jacents visuo-attentionnels					
Sluggish Attention Shifting Attention visuelle Italien	<i>Rayman Les lapins Crétins</i> Videogame avec action Franceschini et al., 2013	10 ans N = 10 LD	9,7 ans N = 10 LD Videogame sans action	80 min 9 sessions 12 heures	Déplacement temporel et spatial de l'attention visuelle et auditive Déplacement intermodal audio-visuel Vitesse de lecture
Sluggish Attention Shifting Attention visuelle Anglais	<i>Rayman Les lapins Crétins</i> Videogame avec action Franceschini et al., 2017	9,8 ans N = 16 LD	N = 12 LD Videogame sans action	80 min 9 sessions 12 heures	Attention focalisée, Déplacement attentionnel intermodal audio-visuel, Vitesse de lecture Décodage Mémoire et conscience phonologiques
Sluggish Attention Shifting Attention visuelle Polonais	<i>Rayman Les lapins Crétins</i> Videogame avec action Łuniewska et al., 2018	11,5 ans N = 27 LD Randomisation	N = 27 Videogame sans action basé sur entraînement phonologique N = 16 LD Sans entraînement	50 min 16 sessions 13,3 heures 22 à 36 jours	Pas d'effets sur l'attention visuo-spatiale Amélioration dans les 3 groupes Vitesse de lecture, Attention sélective Conscience phonologique, Dénomination rapide, Mémoire phonologique

Traitement visuo-spatial global/local Italien	<i>Rayman Les lapins Crétins</i> Jeux vidéo d'action Franceschini et al., 2017	10,4 ans N = 7 LD Videogame action Randomisation	N = 7 LD Videogame sans action	12 heures	Vitesse de lecture Perception globale avant locale
Traitement visuo-spatial global/local Français	<i>Switchipido</i> Bedoin et al., 2009	9,7 ans à 11,5 ans N = 7 LD	N = 5 LD Sans entraînement	20 min 5j/sem 4 semaines	Effet d'interférence issu du niveau local, Asymétrie de l'interférence et la lecture de mots irréguliers
Empan visuo-attentionnel Français	<i>Maeva</i> Catégorisation visuelle Zoubrinetzky et al., 2019	10,7 ans N = 22	N = 23 Perception catégorielle	15 min/j 5j/sem 6 semaines	Empan visuo-attentionnel Conscience phonémique Compétences en lecture de texte et mots irréguliers
Encombrement visuel Italien	Augmentation de la taille des lettres et de l'espacement (Martelli et al., 2009)	11,7 ans N = 13 LD	N = 16 NL	Police Courier majuscule Taille modifiée de 0,1 à 2 degrés	Vitesse de lecture de mots (40 mots/min) obtenu avec une taille et un espacement plus grand que chez les NL (110 mots/min)
Encombrement visuel Augmentation de l'espace inter-lettres, inter-syllabes Espagnol	Étude 1 Mots courts et longs Étude 2 Mots courts et longs Étude 3 Mots courts et longs Étude 4 Textes Perea et al., 2012	23 ans N = 24 NL 7,8 ans N = 24 NL 9,7 ans N = 24 NL 12,1 ans N = 18 DL 12,1 ans N = 18 DL 9,3 ans N = 20 NL	Mots espacés/non espacés Mots espacés/non espacés Mots espacés/non espacés Texte espacé/non espacé	Times Roman 14 points Espacement inter-lettres +1,2 Espacement inter-syllabes	Vitesse Compréhension en lecture Pour enfants et adultes NL et enfants LD Aucun effet
Italien Français	Augmentation homogène de l'espace inter-lettres, inter-mots et interligne Zorzi et al., 2012	10,4 ans N = 34 LD N = 40 LD	Texte espacé/non espacé	Times Roman 14 points Espace inter-lettres 5,2 points Interligne 2,5 points	Vitesse et précision de lecture en Italien et en Français
Encombrement visuel Américain	Stimuli visuels non linguistiques Joo et al., 2018	30 ans N = 39 LD 9,6 ans N = 38 LD	Texte espacé/non espacé	Calibri 11 points Fluent Calibri 11 points (+1,375 points inter-lettres)	Vitesse de lecture Effet proportionnel à un encombrement élevé

Déficits ciblés Langue	Auteurs Nom du programme	Groupe expérimental Âge	Groupe contrôle	Durée Fréquence	Amélioration significative Maintien
Remédiation des déficits cognitifs sous-jacents intermodalitaires					
Intégration audio-visuelle Finlandais	Correspondance forme/son Kujala et al., 2001	7 ans 24 LD	N = 24 DL N = 6 NL	10 min 2j/sem 7 semaines	Discrimination auditive mesurée avec mismatch negativity Compétences en lecture
Discrimination audio- visuelle Français	<i>Play On</i> Magnan & Ecalles, 2006	9,10 ans N = 7 LD	10,4 ans N = 7 LD Rééducation orthophonique	15 min 4j/sem 5 semaines	Amélioration de la conscience phonologique sans effet significatif
	<i>Play On</i> VeUILLET et al., 2007	10,6 ans N = 9 LD	10,4 N = 9 DL Non entraînés	10 h 5 semaines	Perception catégorielle Réponses cochléaires Lecture
Intégration grapho- phonémique Finlandais	<i>GraphoGame</i> Saine et al., 2011	7 ans N = 25 FL Intervention <i>GraphoGame</i> Randomisation	N = 25 FL Intervention classique N = 160 NL Programme classique	45 min 4j/sem 28 semaines	Connaissance des lettres Décodage, fluidité et orthographe
Français	<i>GraphoGame</i> Lassault et al., 2022	6,4 ans N = 451	N = 470 Entraînement mathématique	20 min 4j/sem 16 semaines	Conscience phonémique Choix orthographique Fluidité de lecture de mots
Essai clinique randomisé Finlandais	Intégration sonore lettre-son Gonzáles et al., 2015	N = 23 LD Randomisation	N = 23 LD sans entraînement N = 23 NL	8,86 45 min 2j/sem 6 mois 30 h Séance individuelle	Précision et vitesse de lecture de mots
Déficits ciblés Langue	Auteurs Nom du programme	Groupe expérimental Âge	Groupe contrôle	Durée Fréquence	Amélioration significative Maintien
Remédiation de la procédure de lecture sublexicale					
CGP Anglais	CGP/CP/CGP + CP Syllabe Hatcher et al., 1994	7,5 ans (FL) N = 31 (CGP) N = 30 (CP) N = 32 (CGP + CP)	N = 31 Sans Entraînement	30 à 40 min 4j/sem 20 semaines 42 h Petits groupes (2 à 9 enfants)	Lecture dans les trois conditions mais supérieurs dans la condition CGP + CP
CGP Finlandais	GCP Syllabes courtes/longues Fréquentes/peu fréquentes	9,2 ans (FL) N = 48 (2 lettres)	N = 35 Entraînement mathématique	5 à 10 min 3 à 5j/sem 2 à 3 semaines	Effet plus marqué sur les syllabes peu fréquentes et longues

	Heikkilä et al., 2013	N = 30 (4 lettres, fréquentes) N = 37 (4 lettres, peu fréquentes)			Pas d'effet de généralisation sur la lecture de mots
Déficits ciblés Langue	Auteurs Nom du programme	Groupe expérimental Âge	Groupe contrôle	Durée Fréquence	Amélioration significative Maintien
Remédiation de la procédure de lecture lexicale					
Fluence en lecture Anglais	<i>Reading Acceleration Program (RAP)</i> Horowitz-Kraus et al, 2014	9,9 ans N = 18 LD	Contrôles N = 15 NL N = 15 LD	15-20min/j 5 j/sem 4 semaines	Efficiency en lecture Compréhension de lecture
Efficiency en lecture Français	Lecture répétée Masquage auditif Leloup, 2021	9 à 12,11 ans N = 54	Contrôle intra-sujets 30 min/sem Intervention classique	15 min/j 6j/sem 5 semaines	Effets positifs sur l'efficiency en lecture Maintien à 3 mois après
Apprentissage de l'ordre sériel	<i>Hebb learning</i> Bogaerts, 2015	20 ans N = 18 LD	21 ans N = 17 NL	Rappel sériel de 9 syllabes présentées visuellement sur un écran	Apprentissage sériel et effet de lexicalisation plus faibles chez les LD par rapport au NL Maintien des représentations sérielles syllabiques 1 mois après (LD = NL)
Mémoire orthographique Québécois	Régularités morphologiques (RM) Régularités graphotactiques (RG) Stanké, 2021	10,1 ans N = 6 LD 8,7 ans N = 7 DO 9,9 ans N = 6 TDL Entraînement RG	8,7 ans N = 7 DO Entraînement RM	45 min (J1) 20 à 30 min (J2, J3) 8 séances 3 j par séances	Effets positifs sur l'orthographe lexicale quel que soit l'entraînement RG ou RM Maintien pour les LD plus long que pour les dysorthographiques
Déficits ciblés Langue	Auteurs Nom du programme	Groupe expérimental Âge	Groupe contrôle	Durée Fréquence	Amélioration significative Maintien
Remédiation des procédures de lecture sublexicale et lexicale					
<i>Phonics training</i> <i>Sight word training</i>	<i>Literacy Planet</i> Réplication de 2013 Mc Arthur, 2015 ECR	7 à 12 ans N = 41 LD (sublexical/lexical) N = 44 LD (lexical/sublexical)	Contrôle intra-sujets	30 min 5j/sem 8 semaines	Compétences en lecture de mots et de pseudomots pour les deux groupes.
Procédures lexicale et sublexicale Néerlandais	Phase 1 : procédure sublexicale	7 à 8 ans N = 122 LD	6 à 8 ans N = 108 NL	45 min 20 min (lecture) 4j/sem	Compétences en lecture et orthographe de mots et pseudomots

	Phase 2 : procédure lexicale Tilanus, 2019			10 min (orthographe) 2j/sem	Restent inférieures au groupe contrôle
Déficits ciblés Langue	Auteurs Nom du programme	Groupe expérimental Âge	Groupe contrôle	Durée Fréquence	Amélioration significative Maintien
Remédiation des déficits cognitifs sous-jacents et des procédures de lecture					
Procédures sublexicale, lexicale et conscience phonologique Américain	<i>Interactive Strategies</i> Vellutino et al, 1996, 2004	6 ans à 8 ans N = 76 FL	N = 65 NL N = 42 FL Remédiation 2 à 3j/sem	30 min 5j/sem 15 sem Séance individuelle	Compétences en lecture 67 % sans déficit 32,9 % déficit léger 15 % déficit sévère
Procédure sublexicale + CP versus Procédure lexicale + CP Américain	<i>Auditory Discrimination in Depth Program (ADD)</i> <i>Embedded Phonics (EB)</i> Torgesen, 2001	8 à 10 ans N = 30 DL (ADD) N = 30 DL (EP) Randomisation	Contrôle intra-sujets	50 min 2 fois/j 8 sem 67,5 h Séance individuelle	Compétences en conscience phonologique et lecture (normalisées pour 40 % des enfants) Efficacité en lecture encore déficitaire pour 60 % des enfants Maintien 2 ans
Conscience phonémique Décodage phonologique Américain	- <i>Auditory Discrimination in Depth (ADD)</i> - <i>Phonological Analysis with Letters (PAL)</i> - <i>Reading with Orthographic and Speech Support (ROSS)</i> Wise, 1999	8,8 ans n = 122	n = 31 (LD)	6 mois 50 heures	Efficacité en lecture de mots Précision en lecture de pseudomots Maintien à 10 mois
Procédures sublexicale et lexicale + Analyse phonologique Versus Procédures sublexicale et lexicale + compréhension de lecture	<i>Analyse phonologique (ADD + ROSS)</i> <i>Lecture en contexte (LC + ROSS)</i> <i>Reading with Orthographic and Speech Support (ROSS)</i> Wise, 2000	7 à 11 ans N = 109 (ADD + ROSS)	7 à 11 ans N = 91 (LC + ROSS)	29 h 6 mois	Pas de différence entre les deux groupes pour la lecture de mots et la compréhension. Différence significative pour la segmentation phonémique et le décodage phonologique, au profit du groupe « ADD + ROSS »
Traitement auditif du rythme et procédure sublexicale versus Présentation tachistoscopique latéralisée de mots écrits Italien	<i>Rhythmic Reading Training (RRT)</i> <i>Visual Hemisphere Specific Stimulation (VHSS) + Videogame</i> Cancer et al, 2020	8 à 14 ans N = 12 (RRT)	N = 12 (VHSS + videogame)	2 fois/j 3j/sem 3 sem 13 h	Vitesse de lecture des pseudomots (RRT) Précision en lecture (VHSS + videogame)

Traitement auditif du rythme et procédure sublexicale Italien	<i>Rhythmic Reading Training</i> Bonacina et al., 2015	11 à 14 ans N = 14 LD (RRT)	N = 14 LD sans intervention	30 min 2j/sem 9 séances	Vitesse et précision de lecture de mots, pseudomots et texte
Attention visuo-spatiale et procédure lexicale Présentation tachistoscopique latéralisée de mots écrits Italien	<i>Visual Hemisphere Specific Stimulation (VHSS)</i> Facoetti et al, 2003 Lorusso et al, 2005	9,8 ans N = 12 LD	N = 12 LD Conscience phonologique et procédures de lecture	45 min 2j/sem 4 mois	Attention visuo-spatiale Compétences en lecture
		8 à 14 ans N = 6 LD (présentation latérale VHSS standard) N = 6 LD (présentation latérale aléatoire)	N = 23 NL	45 min 2j/sem 4 mois	Champ attentionnel Lecture de mots et pseudomots

Chapitre 3. Problématique

L'objectif de cette thèse est de concevoir puis d'évaluer les bénéfices d'un protocole de remédiation de la dyslexie développementale innovant, multimodal, multi-componentiel et intensif. Ce protocole s'appuie sur la succession de séquences d'entraînement de plusieurs déficits cognitifs sous-jacents et sur un suivi longitudinal de chaque participant. Pour chaque programme d'intervention, des entraînements adaptés aux profils sémiologiques individuels sont proposés à partir des données probantes de la littérature scientifique. Ces entraînements sont conçus pour être applicables dans la pratique clinique des orthophonistes et notre méthodologie de soin s'inscrit dans le respect des principes d'éducation thérapeutique et de partenariat familial.

1. Remédiation de la dyslexie développementale, contexte théorique

Malgré un soutien adapté et efficace à l'apprentissage de la lecture, une forte proportion de lecteurs dyslexiques n'accède pas à un niveau de lecture leur permettant de lire avec plaisir et quitte souvent l'école avec des niveaux de lecture à peine adéquats. L'évaluation de la compréhension en lecture de 6 000 élèves français âgés de 15 ans menée par l'Organisation de Coopération et de Développement Économiques (OCDE, 2019) classe la France 23e sur les 79 pays évalués. En outre, un écart de quatre années scolaires sépare les enfants des milieux socio-éducatifs les plus favorisés de ceux des milieux les plus défavorisés. De plus, une forte prévalence de lecteurs dyslexiques est observée chez les jeunes délinquants et les détenus (pour une revue voir Morken et al., 2021). Ne pas intervenir de manière appropriée et précocement pour remédier aux troubles d'apprentissage de la lecture entraîne une escalade de conséquences sociales et émotionnelles au cours des années suivantes (pour

une revue, voir Livingston et al., 2018). Ainsi, des interventions spécifiquement ciblées et efficaces pourraient conduire à des économies de coûts en santé publique et à des améliorations de la qualité de vie des individus (Regtvoort et al., 2013).

Afin de répondre à ces besoins sociétaux, la recherche de causes sous-jacentes à la dyslexie développementale a généré d'innombrables travaux. La théorie la plus justifiée scientifiquement est l'hypothèse étiologique d'un déficit spécifique de l'accès aux représentations phonologiques c'est-à-dire l'accès aux représentations impliquées dans la perception et la production des sons de la parole (Ramus, 2014; Ramus & Szenkovits, 2008). Ce déficit affecte la capacité à représenter, stocker et récupérer les sons dans les langues alphabétiques (Landerl et al., 2013; Ramus, 2003; Saksida et al., 2016). Selon ce contexte théorique, ce déficit phonologique spécifique entrave l'acquisition du code alphabétique nécessaire pour associer les graphèmes et les phonèmes (Snowling et al., 2020; Ziegler et al., 2014). Les programmes de remédiation dénommés *phonics instruction* qui associent une intervention à la fois sur la conscience phonémique et sur les procédures de lecture seraient plus efficaces que les programmes qui interviennent uniquement sur la conscience phonémique ou uniquement sur les procédures de lecture (voir les méta-analyses de Ehri et al., 2001; Galuschka et al., 2014) et plus efficaces que ceux qui interviennent sur le traitement auditif ou visuel (voir la méta-analyse de Galuschka et al., 2014). Néanmoins, si certains lecteurs dyslexiques bénéficient des *phonics instruction* (voir les méta-analyses de Ehri et al., 2001; Galuschka et al., 2014; Scammacca et al., 2007), d'autres semblent résister à ce type de remédiation (Gabrieli, 2009; S. E. Shaywitz et al., 2008; Torgesen et al., 2001; Vellutino et al., 2004).

Partant de ce constat, de nombreux travaux ont tenté de valider des programmes d'intervention fondés sur des hypothèses causales d'une altération plus ou moins exclusive des traitements auditifs, visuels, visuo-attentionnels ou de l'intégration intermodale audio-visuelle. Un consensus dans la littérature scientifique s'est progressivement construit autour

d'une cause multifactorielle de la dyslexie développementale (McGrath et al., 2020; Pennington, 2006). Autrement dit, la majorité des lecteurs dyslexiques présenterait simultanément plusieurs déficits cognitifs sous-jacents de nature hétérogène et d'intensité variable (Menghini et al., 2010; Pennington et al., 2012; Reid et al., 2007; Zoubrinetzky, Bielle & Valdois, 2014). La dyslexie développementale étant, dans ce contexte, conceptualisée comme *un modèle de déficits multifactoriels* (McGrath et al., 2020; O'Brien & Yeatman, 2021; van Bergen et al., 2014), intervenir sur une seule fonction cognitive sous-jacente à la lecture risquerait de négliger la complexité des composantes cognitives et linguistiques à multiples facettes qui sous-tendent la lecture normale et les troubles de la lecture. Cet aspect étiologique multifactoriel de la dyslexie développementale est mis en évidence par de nombreuses études de cas multiples qui illustrent la variabilité de l'expression des déficits cognitifs sous-jacents chez les lecteurs dyslexiques. Certains présentent le déficit prédit et d'autres pas. De même, les programmes d'intervention ciblant une seule catégorie de déficit semblent améliorer la lecture de certains lecteurs dyslexiques et pas d'autres. Par conséquent, dans une conduite méthodologique de soin, il serait nécessaire, dans un premier temps, d'identifier individuellement ces déficits cognitifs sous-jacents puis dans un deuxième temps, de rétablir un meilleur fonctionnement de ces processus et, dans un troisième temps de les automatiser pour obtenir des associations graphème-phonème optimales (Lachmann et al., 2014). Proposer des interventions adaptées aux déficits cognitifs sous-jacents de chaque enfant serait alors plus efficace que proposer la même intervention sur un seul et même déficit cognitif sous-jacent à tous les enfants.

L'efficacité d'une intervention dépend de quatre facteurs selon la méta-analyse de Galuschka en 2014. Le premier facteur est le degré de sévérité du déficit initial. Plus les déficits en lecture sont modérés, plus l'intervention sera efficace. Les interventions dont le critère d'inclusion est un niveau de compétence en lecture inférieur à seulement 1 écart-type au-

dessous de la moyenne pourraient donc apparaître plus efficaces que celles dont le critère d'inclusion est un déficit en lecture inférieur à 1,65 écarts-types au-dessous de la moyenne.

Le deuxième facteur est la quantité et la durée de l'intervention. L'efficacité d'une intervention augmenterait avec des quantités de traitement en termes de volume horaire plus élevées (au-delà de 35 heures) ou des durées de traitement plus longues (au-delà de 12 semaines). Une fréquence entre 3 à 5 fois par semaine, 10 à 20 minutes par jour, pendant un minimum de trois semaines est recommandée pour augmenter l'efficacité d'un entraînement (Ehri et al., 2001; Melby-Lervåg et al., 2012; Suggate, 2016; Wanzek et al., 2016).

Le troisième facteur est la nature et le nombre d'investigateurs. Les interventions menées par un seul investigateur (l'auteur de l'étude) ont tendance à montrer des tailles d'effets plus élevées que celles menées par plusieurs investigateurs, ce qui suggérerait que des connaissances solides et professionnelles sur les troubles de la lecture pourraient améliorer l'efficacité du traitement. Ainsi, *l'effet thérapeute* peut induire des effets en lien avec les compétences du thérapeute, mais aussi en lien avec sa personnalité et sa conviction théorique.

Le quatrième facteur est le nombre de processus ciblés pour améliorer une fonction cognitive. Une meilleure réponse aux interventions et un meilleur transfert sur la lecture des lecteurs dyslexiques sont constatés lorsque deux tâches d'entraînement au maximum sont entraînées simultanément. Par exemple, un entraînement qui cible un ou deux processus cognitifs est plus efficace qu'un entraînement qui cible trois processus ou plus.

Des programmes de remédiation efficaces fondés sur des données probantes et le profil cognitif et comportemental de chaque patient sont donc indispensables pour augmenter les niveaux de lecture avant l'âge adulte et réduire les conséquences socio-économiques, cognitives et comportementales de la dyslexie développementale. Cependant, la mise en œuvre de ces programmes de remédiation se heurte à de nombreuses limites méthodologiques et cliniques.

2. Limites méthodologiques et cliniques

La validation scientifique d'une intervention auprès de lecteurs dyslexiques est très complexe à mener d'un point de vue écologique. Le recrutement de lecteurs dyslexiques et de normolecteurs, l'acceptabilité d'un entraînement intensif, les déplacements occasionnés, mais aussi le contrôle des biais de sélection, des effets de lieu ou de thérapeute ne facilitent pas l'expérimentation d'un protocole de recherche. Beaucoup d'interventions auprès de lecteurs dyslexiques sont mises en œuvre sur des temps relativement courts, d'une moyenne de 2 mois, avec des petits effectifs, une faible puissance statistique, en un lieu unique et avec un nombre limité d'investigateurs. Les interventions longitudinales qui impliquent des échantillons plus conséquents sont expérimentées uniquement dans un contexte scolaire auprès de faibles lecteurs et de lecteurs dyslexiques (e.g, Lassault et al., 2022; Torgesen et al., 2001; Vellutino et al., 2004). Une intervention multicentrique, c'est-à-dire sur plusieurs sites, améliore la généralisation des résultats et permet d'atteindre la taille de l'échantillon requise plus rapidement.

La méthodologie de l'essai contrôlé randomisé reste le *gold-standard* pour valider un protocole de remédiation. Cependant, les contraintes méthodologiques de l'essai contrôlé randomisé ne sont parfois pas en adéquation avec les exigences éthiques. Le recours au *cross-over* et au contrôle intra-sujets peut être alors une alternative, à condition d'y associer une attribution prospective, une puissance statistique suffisante et une méthodologie d'intervention respectant les principes d'une stratégie de remédiation curative cognitive : spécificité de l'entraînement, pratique intensive et répétée et apprentissage sans erreurs. Enfin, à notre connaissance, aucune étude n'a proposé à ce jour d'intervenir successivement sur plus de deux déficits de nature différente dans le même protocole alors que de plus en plus d'études mettent en évidence de nombreux déficits cognitifs sous-jacents.

Dans la pratique clinique, les longues listes d'attente conduisent à des retards de soins et des outils d'intervention validés dans un cadre méthodologique susceptible d'application clinique font défaut. En effet, les outils validés lors de travaux scientifiques sont peu accessibles aux cliniciens, soit parce que ces outils ne sont pas expérimentés en français, soit parce que les laboratoires de recherche ne les diffusent pas suffisamment, soit parce qu'ils nécessitent au préalable une formation spécifique du clinicien, soit parce qu'ils sont trop onéreux. Ces difficultés d'accès limitent donc l'utilisation d'interventions validées scientifiquement en pratique clinique.

Pour répondre à la nécessité d'interventions intensives autrement qu'en multipliant les séances de remédiation, l'utilisation d'outils d'entraînements adaptés informatisés à domicile et supervisés par des cliniciens experts peut contribuer à réduire les coûts d'intervention et à augmenter l'efficacité de la remédiation en lecture (Tressoldi et al., 2012; Tucci et al., 2015). Cependant, encore peu d'orthophonistes prescrivent des entraînements quotidiens à domicile pour rétablir un processus cognitif défaillant (Helloin, 2019), ce qui limite considérablement le recours à des stratégies de remédiation curative et favorise les prises en charge de remédiation hebdomadaire uniquement orientées vers des modes interventionnels compensatoires et adaptatifs. Ainsi, les interventions s'étalent sur plusieurs années et restent peu efficaces. Découragés, des orthophonistes renoncent même à prendre en charge des troubles du langage écrit, alors même que cette demande d'accès aux soins est majeure.

3. Conception du protocole de remédiation

À partir de notre analyse et de notre interprétation de la littérature scientifique et du contexte clinique, nous avons défini des objectifs pour élaborer un protocole de remédiation

multimodale et multi-componentielle puis pour en évaluer les bénéfices à partir d'un suivi longitudinal des patients.

Pour élaborer ce protocole de remédiation, nos objectifs sont :

- D'intervenir sur trois modalités d'entraînements, auditive, visuelle et audio-visuelle en lien avec les trois théories explicatives de la dyslexie développementale ;
- D'élaborer trois programmes d'interventions successives audio-phonologique, visuo-attentionnelle et intermodalitaire afin d'entraîner les processus cognitifs sous-jacents en accord avec une stratégie de remédiation curative ;
- D'entraîner plusieurs processus cognitifs sous-jacents au sein de chaque programme d'intervention ;
- D'appliquer les trois programmes d'intervention de façon longitudinale, successive, répétée et intensive ;
- De répéter et intensifier les entraînements proposés au sein de chaque programme d'intervention ;
- D'associer toujours l'entraînement d'un processus cognitif sous-jacent unique avec l'entraînement d'une procédure de lecture et de production écrite ;
- D'adapter chaque entraînement au profil cognitif (déficits cognitifs sous-jacents) et au profil comportemental (déficit en lecture) de chaque participant selon la nature et la sévérité de ces déficits définis par l'évaluation initiale ;
- D'effectuer les entraînements à domicile selon les principes d'éducation thérapeutique, de décision partagée et d'un partenariat avec le participant et les parents ;
- De favoriser des supports de remédiation numériques afin d'optimiser, intensifier, standardiser les entraînements et les rendre attrayants.

4. Évaluation du protocole de remédiation, objectifs

En accord avec les recommandations scientifiques détaillées dans le chapitre 2, nous avons évalué ce protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle en respectant les objectifs suivants :

- Mettre en œuvre un essai clinique randomisé, multicentrique et longitudinal ;
- Inclure le nombre de participants nécessaire pour obtenir une forte puissance statistique ;
- Définir des critères d'inclusion basés sur une évaluation du langage écrit, du langage oral, des compétences mnésiques et intellectuelles non verbales ;
- Établir un protocole de soin selon un cadre méthodologique détaillé, complet et opérationnel pouvant être mis en œuvre par des orthophonistes ;
- Évaluer chaque programme d'intervention audio-phonologique, visuo-attentionnelle et audio-visuelle ;
- Évaluer chaque entraînement au sein de chaque programme d'intervention.

L'objectif principal de l'essai clinique est de déterminer si le protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle qui inclut les trois programmes d'intervention audio-phonologique, visuo-attentionnelle et intermodalitaire améliore les compétences en lecture et en orthographe par rapport à une rééducation orthophonique conventionnelle (*Ligne de base Pré-intervention*) et d'évaluer la stabilité des effets de ce protocole de remédiation deux mois après son arrêt.

Les objectifs secondaires sont d'analyser :

- Les gains obtenus en lecture (efficacité et compréhension) après chaque programme d'intervention en les comparant aux gains obtenus après la rééducation orthophonique conventionnelle (*Ligne de base Pré-intervention*) ;

- Les gains obtenus en orthographe phonologique, lexicale et grammaticale, à l'issue du protocole de remédiation en les comparant aux gains obtenus après la rééducation orthophonique conventionnelle (*Ligne de base Pré-intervention*) ;
- L'effet respectif des programmes d'intervention phonologique et visuo-attentionnelle sur les processus cognitifs phonologiques et visuo-attentionnels par rapport à la *Ligne de base Pré-intervention* ;
- Les effets du protocole de remédiation sur l'appétence à la lecture, les résultats scolaires et l'estime de soi par rapport à la *Ligne de base Pré-intervention* ;
- Les facteurs favorisant une très bonne réponse à l'intervention et les facteurs favorisant une réponse plus modérée à l'intervention.

Les objectifs de l'étude de cas multiples sont d'analyser :

- La prévalence des déficits et des compétences préservées ;
- L'évolution des profils cognitifs individuels à l'issue de l'intervention ;
- La recherche de *clusters* afin de déterminer si malgré une grande hétérogénéité de profils cognitifs, il est possible de les regrouper.

5. Hypothèses de recherche

Notre hypothèse principale est qu'un protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle améliorerait significativement les compétences en lecture et en orthographe par rapport à une rééducation orthophonique conventionnelle et que ces effets se maintiendraient deux mois après l'arrêt de l'intervention.

Nos hypothèses secondaires sont ainsi formulées :

- Les gains obtenus en lecture après chaque programme d'intervention respective audio-phonologique, visuo-attentionnelle et intermodalaire seraient plus importants que les gains obtenus à l'issue de la rééducation orthophonique conventionnelle (*Ligne de base Pré-intervention*).
- Les programmes d'intervention audio-phonologique et visuo-attentionnelle amélioreraient respectivement les processus cognitifs audio-phonologiques et visuo-attentionnels.
- L'orthographe phonétique, lexicale et grammaticale s'améliorerait à l'issue du protocole de remédiation.
- L'intérêt pour la lecture, les performances scolaires et l'estime de soi devraient s'améliorer à l'issue du protocole de remédiation.
- L'efficacité du protocole de remédiation sur les compétences en lecture devrait diminuer chez les participants ayant des compétences en lecture et des processus cognitifs sous-jacents phonologiques et visuo-attentionnels plus altérés comparés à la moyenne d'efficacité en lecture de l'échantillon.
- Étant donné que les entraînements sont adaptés au profil sémiologique (cognitif et comportemental) et que les participants sont inclus avec un déficit mixte phonologique et visuo-attentionnel, nous ne nous attendons pas à une différence de gains sur les compétences en lecture et en orthographe, entre le groupe qui commence par le programme d'intervention audio-phonologique et le groupe qui commence par le programme d'intervention visuo-attentionnelle.

Concernant l'étude de cas multiples,

- Les lecteurs dyslexiques présenteraient des profils cognitifs hétérogènes au niveau du nombre, de la nature et de la sévérité des déficits et des compétences préservées.

- Le nombre et la sévérité des déficits cognitifs sous-jacents ciblés diminueraient à l'issue du protocole d'intervention.
- Les lecteurs dyslexiques pourraient être regroupés en *clusters* selon la nature et l'intensité de leurs déficits cognitifs sous-jacents phonologiques et visuo-attentionnels.

6. Opérationnalisation

Après les chapitres 1 et 2 qui nous ont permis de rapporter les données de la littérature sur les processus cognitifs et les modélisations de la lecture, les modèles multifactoriels de la dyslexie développementale et les différentes approches interventionnelles de soin, le chapitre 4 décrit notre protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle. Ce protocole est composé de trois programmes d'intervention : un programme d'intervention audio-phonologique visant à améliorer la perception catégorielle, l'analyse phonémique, la mémoire sérielle phonologique et la dénomination rapide automatisée ; un programme d'intervention visuo-attentionnelle visant à améliorer l'empan visuo-attentionnel, la focalisation attentionnelle globale/locale et la mémoire orthographique ; un programme d'intervention intermodalitaire visant à améliorer l'intégration phono-orthographique et la fluence en lecture. Nous décrivons ensuite les supports que nous avons conçus pour favoriser l'engagement des enfants et des parents tout au long de l'étude et pour garantir une application homogène du protocole par l'ensemble des investigateurs ayant participé à cette étude.

Le chapitre 5 présente la méthodologie d'un essai clinique randomisé multicentrique, choisie pour évaluer l'efficacité de ce protocole de remédiation multimodale, publié dans la revue *BMC Pediatrics* (cf. Annexe 1, Harrar-Eskinazi, De Cara, Leloup, Nothelier, et al., 2022) selon les directives de la déclaration SPIRIT 2013 « *Standard Protocol Items : Recommendations for Interventional Trials* » (Chan et al, 2013) (cf. Annexe 2). Puis, nous

présentons le plan statistique et les résultats de l'étude de groupe pour chaque question de recherche. Des résultats préliminaires ont été publiés dans les actes des XXII^e Rencontres d'Orthophonie 2022 (cf. Annexe 20, Harrar-Eskinazi, De Cara, Leloup, Denis-Noël, et al., 2022).

Le chapitre 6 expose les résultats d'une étude de cas multiples. Une analyse plus détaillée des profils sémiologiques individuels permet de préciser la prévalence des déficits cognitifs sous-jacents et de leurs multiples combinaisons par une approche catégorielle. En effectuant ces analyses de profils de façon longitudinale, nous évaluons les effets du protocole de remédiation au niveau individuel. Enfin, nous explorons la possibilité de regrouper les LD de notre échantillon selon une approche dimensionnelle.

Chapitre 4. Le protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle

D'après le modèle multi-déficits de Ziegler et al. (2019, 2020), trois types de déficits peuvent altérer la lecture des LD. Les déficits visuels (e.g., fixation binoculaire, saccades oculaires) et visuo-attentionnels (encombrement perceptif, empan visuo-attentionnel, attention visuo-spatiale) peuvent altérer le niveau de traitement *des lettres* dans leur identification et le codage de leur position. Les déficits auditifs (e.g., perception allophonique, traitement temporel auditif) et phonologiques (conscience phonémique, mémoire phonologique, dénomination rapide automatisée) peuvent altérer le traitement *des phonèmes* dans leur discrimination, le codage de leur position et l'accès aux représentations phonologiques dans *le lexique phonologique*. Chacun de ces déficits peut donc altérer le réseau de décodage grapho-phonologique, tout comme un déficit spécifique dans l'intégration audio-visuelle. Cependant, en simulant ces différentes altérations à différents niveaux de traitement, le modèle multi-déficits qui affectent les trois composants est plus performant que les modèles alternatifs qui affectent un seul composant (soit de déficit phonologique, soit de déficit visuel) ou qui affectent tous les composants de façon non-spécifique (bruit global).

Notre protocole de remédiation intègre ces trois types de déficits décrits dans la dyslexie développementale, en proposant trois programmes d'intervention ciblant trois modalités, auditive, visuelle et audio-visuelle (multimodale) et trois composants audio-phonologique, visuo-attentionnels et intermodalitaire (multi-componentielle). Le programme d'intervention audio-phonologique cible différents processus cognitifs sous-jacents susceptibles d'être altérés : la perception catégorielle, la conscience phonologique, la mémoire phonologique à court terme et la dénomination rapide automatisée. Le programme d'intervention visuo-attentionnel cible d'autres processus cognitifs sous-jacents susceptibles d'être altérés chez les

LD : l'empan visuo-attentionnel, la focalisation attentionnelle globale/locale et la mémoire orthographique. Une fois les processus audio-phonologiques et visuo-attentionnels améliorés, le programme d'intervention intermodalitaire cible l'intégration phono-orthographique et la fluence en lecture afin d'optimiser les compétences en lecture et en orthographe. Individualisés, systématiques et intensifs, les entraînements sont construits sur les données probantes de la littérature en accord avec la pratique fondée sur les preuves (Evidence-Based Medicine) aussi bien du point de vue de critères externes (références scientifiques), qu'internes (expertise de l'orthophoniste, preuves concernant la préférence du patient, décision partagée de soin) (Sackett et al., 1996).

Après avoir décrit le protocole d'application de ces trois programmes, nous décrirons les modalités de chaque programme d'intervention et les moyens mis en œuvre pour faciliter et optimiser leur application. Nous avons nommé ce protocole de remédiation multimodale et multi-composante : Dyslexie Développementale et Méthode de Remédiation : DDMR (Harrar-Eskinazi, De Cara, Leloup, Nothelier, et al., 2022).

1. Modalités d'application des programmes d'intervention

Le protocole de remédiation multimodal et multi-composantiel DDMR propose trois programmes d'intervention visant chacun un traitement cognitif spécifique : audio-phonologique (PHO), visuo-attentionnel (VA) et intermodalitaire (IM). Au sein de chaque programme d'une durée de 2 mois, deux entraînements différents, d'une durée respective d'un mois, sont effectués pendant 15 minutes par jour et 5 jours par semaine. Chaque programme d'intervention (PHO, VA, IM) inclut l'entraînement informatisé d'un processus cognitif sous-jacent déficitaire pendant 10 minutes et un entraînement de lecture et/ou d'orthographe pendant

5 minutes. La durée d'entraînement quotidien est contrôlée par les parents au moyen d'un chronomètre.

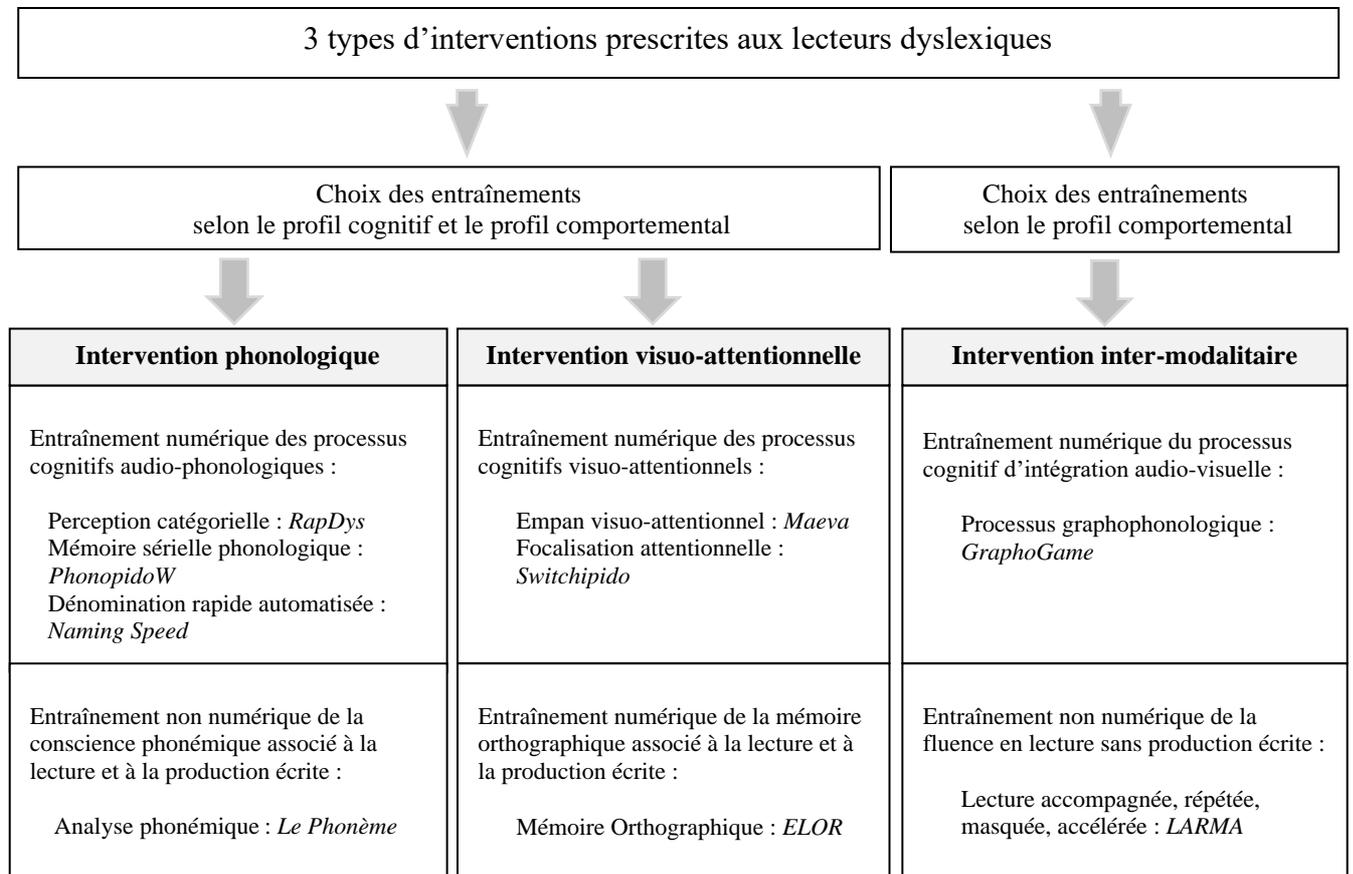
L'entraînement des processus PHO est associé à un entraînement du décodage phonologique en lecture (conversion graphème-phonème) et en écriture (conversion phonème-graphème). L'entraînement des processus VA est associé à un entraînement du recodage lexical en lecture et de la mémoire orthographique. L'entraînement des processus IM est associé à un entraînement de la fluidité en lecture. Le choix des entraînements est déterminé par l'orthophoniste investigatrice pour chaque LD, selon son profil cognitif défini par ses performances initiales mesurant les processus phonologiques et visuo-attentionnels et selon son profil comportemental défini par ses compétences en lecture et en orthographe. Le profil cognitif et le profil comportemental représentent le profil sémiologique d'un participant. Les performances mesurées aux épreuves initiales représentent la *Ligne de base Pré-intervention*. Des logiciels adaptatifs et des *Lignes de bases cliniques* intermédiaires pré et post-entraînements permettent de personnaliser les entraînements selon les compétences et l'évolution de chaque participant.

En ce qui concerne l'intervention phonologique (PHO), un ou deux entraînements numériques au maximum, visant à améliorer la perception catégorielle - *RapDys* (Collet, Colin, & Sernicales, 2017) - et/ou la mémoire phonologique à court terme - *Phonopidow* (Medina, 2010) - et/ou la dénomination rapide automatisée - *Naming Speed* (Harrar-Eskinazi, De Cara, Leloup, Nothelier, et al., 2022) sont prescrits au participant selon son profil cognitif. Son profil cognitif est défini à partir de ses performances déficitaires aux tâches d'analyse phonémique, de mémoire phonologique à court terme et de dénomination rapide automatisée obtenues à la *Ligne de base Pré-intervention*. À ces entraînements, est systématiquement associé un entraînement de la fusion/segmentation phonémique - *Le Phonème* (Lang & Villuendas, 2011) - au cours duquel des mots ou des pseudo-mots sont lus et écrits. Le choix entre les mots et les

pseudomots est défini à partir des scores de fusion/segmentation phonémique obtenus aux *Lignes de bases cliniques* pré-entraînement. Par exemple, si un participant présente un profil cognitif caractérisé par des déficits de la conscience phonémique, de la perception catégorielle et de la mémoire sérielle phonologique, il bénéficiera le premier mois d'un entraînement numérique de la perception catégorielle (*RapDys*) associé à un entraînement oral et écrit de fusion de phonèmes (*Le Phonème*). Le deuxième mois, il bénéficiera d'un entraînement numérique de la mémoire sérielle phonologique (*Phonopidow*) associé à un entraînement oral et écrit de la segmentation phonémique (*Le Phonème*). Autre exemple, si un participant présente un déficit de la dénomination rapide automatisée (DRA) et un déficit de l'analyse phonémique, il effectuera pendant 2 mois l'entraînement de DRA (*Naming Speed*), associé aux entraînements de fusion phonémique le premier mois et aux entraînements de segmentation phonémique le deuxième mois. Autre exemple, si le LD présente plus de trois déficits cognitifs sous-jacents phonologiques, les deux processus cognitifs les plus altérés seront entraînés, mais toujours associés à des entraînements de fusion et segmentation phonémiques de mots ou pseudomots lus et écrits (cf. figure 4.1).

Figure 4.1

Prescription de soin selon le profil cognitif et le profil comportemental de chaque enfant



Note. Profil cognitif : déficits phonologiques et visuo-attentionnels altérés ; profil comportemental : déficits en lecture et en orthographe. Tous les entraînements sont décrits dans ce chapitre.

La démarche méthodologique est la même pour l'intervention visuo-attentionnelle (VA). Selon le profil cognitif individuel défini par les déficits relevés aux épreuves initiales d'empan visuo-attentionnel en report partiel et global et de focalisation attentionnelle sur le local et le global, deux entraînements numériques, visant à augmenter l'empan visuo-attentionnel - *Maeva* (M. Lobier, 2008) - et/ou en analyse visuo-attentionnelle local/global - *Switchipido* (Bedoin & Medina, 2013) - sont prescrits au participant. À ces deux entraînements, est systématiquement associé un entraînement de la mémoire orthographique *ELOR* (Lefèvre et al., 2022) au cours duquel les mots seront lus et écrits. Le choix des régularités

orthographiques qui seront entraînées s'effectue selon les scores aux évaluations initiales de la lecture et de l'orthographe. Par exemple, si un participant présente un profil cognitif caractérisé par un déficit de l'empan visuo-attentionnel et de l'analyse visuo-attentionnelle local/global, il bénéficiera le premier mois de l'entraînement numérique *Maeva*, associé à l'entraînement numérique de la mémoire orthographique *ELOR*. Le deuxième mois, il bénéficiera de l'entraînement numérique *Switchipido*, toujours associé à l'entraînement numérique de la mémoire orthographique *ELOR*. Autre exemple, si un participant présente un déficit unique de l'empan visuo-attentionnel, il effectuera pendant 2 mois l'entraînement *Maeva*, toujours associé à l'entraînement numérique de la mémoire orthographique *ELOR* (cf. figure 4.1).

La troisième intervention intermodalitaire (IM) propose un seul entraînement d'automatisation de l'intégration graphophonologiques en modalité audio-visuelle *GraphoGame* (Richardson & Lyytinen, 2014) dont le niveau de départ est défini par le niveau de lecture du LD. *GraphoGame* est systématiquement associé à un entraînement de la fluence en lecture *LARMA* : Lecture Accompagnée, Répétée, Masquée, Accélérée, conçu par Harrar-Eskinazi (2022).

2. Programme d'intervention audio-phonologique

Les processus PHO sont entraînés selon le relevé des performances initiales au test informatisé *Evalec Primaire-Collège* (Sprenger-Charolles et al., 2018) et celle de la perception catégorielle avec le logiciel *RapDys* (Collet, Colin, & Serniclaes, 2017) lors de la passation des *Lignes de base cliniques* pré-entraînement. Quatre processus PHO peuvent être entraînés : la perception catégorielle avec le logiciel *RapDys*, la mémoire sérielle phonologique avec le logiciel *Phonopidow* (Medina, 2010), la dénomination rapide automatisée (DRA) avec *Naming Speed* (Harrar Eskinazi et al., 2020) et l'analyse phonémique avec *Le Phonème* (Lang &

Villuendas, 2011). Les entraînements numériques *RapDys*, *Phonopidow* et *Naming Speed* s'effectuent 5 jours/semaine, 10 min/jour et sont associés à l'outil non numérique *Le Phonème*, 5 jours/semaine, 5 minutes/jour. L'entraînement des processus phonologiques varie selon la nature et l'intensité du déficit de traitement phonologique de chaque LD. Par exemple, pour un LD ne présentant pas de déficit de la mémoire sérielle phonologique mais un déficit de la perception catégorielle et de la DRA, la perception catégorielle et la fusion de phonèmes sont entraînées le premier mois alors que la DRA et la segmentation de mots en phonèmes sont entraînées le deuxième mois.

2.1. La perception catégorielle

L'entraînement de la perception catégorielle avec *RapDys* est proposé si l'évaluation de l'identification ou de la discrimination des phonèmes /t/ et /d/ effectuée par le logiciel *RapDys*® indique des performances déficitaires (Voir section 1.4 du chapitre 5. *Lignes de base cliniques*). L'objectif est d'améliorer l'identification et la discrimination de deux phonèmes /t/ et /d/ pour les catégoriser selon leur différence de voisement. En réduisant progressivement le *Voice Onset Time* ou VOT (positif pour les phonèmes sourds et négatif pour les phonèmes voisés) dans des tâches d'identification et de discrimination des sons /tə/ et /də/, la distance acoustique est réduite autour de la frontière phonémique de voisement afin d'accéder à une catégorisation des phonèmes. Cinq niveaux de difficultés sont déterminés par l'écart de VOT entre stimuli (Figure 4.2) qui est réduit progressivement de 50 ms (VOT de -25 ou +25 ms) à 10 ms (VOT de -5 ou +5 ms). Lorsque le score de réponses correctes en discrimination ou en identification des syllabes est supérieur à 75 % pour deux passations successives, l'étape suivante est effectuée.

Les sons sont délivrés de façon binaurale par un casque. Un feed-back est donné par deux personnages animés qui sont des *Gloutons* auxquels l'enfant doit donner à manger. La tâche d'identification consiste à déterminer si le stimulus sonore appartient à une catégorie ou

à une autre. Pour répondre /tə/, l'enfant donne à manger à Théo et pour répondre /də/, l'enfant donne à manger à Déa. La tâche de discrimination consiste à déterminer si les paires de stimuli sonores sont identiques ou différentes. Si les stimuli sont différents, l'enfant donne à manger à Nana et si les stimuli sont identiques, l'enfant donne à manger à Némó (Figure 4.3).

Figure 4.2

Méthode RapDys©. Réduction progressive des différences acoustiques (Collet et al., 2017)

Niveau de difficulté	Paires de stimuli (ms VOT)	
1	-25	+25
2	-20	+20
3	-15	+15
4	-10	+10
5	-5	+5

Note. La frontière phonémique de voisement se situe à 0 ms VOT en français

Figure 4.3

Tâche d'identification et de discrimination du logiciel RapDys (Collet, Colin, & Sernicales, 2017)



Notes. (1) Entraînement de l'identification /t/ et /d/, (2) entraînement de la discrimination de paires de sons /t-t/, /t-d/, /d-t/, /d-d/. Le feedback est donné par les gloutons qui s'animent de façon différente selon la réponse juste ou fausse.

2.2. La mémoire sérielle phonologique

L'entraînement de la mémoire sérielle phonologique avec *Phonopidow* est proposé lorsque le score au subtest de répétition de pseudomots de la batterie *Evalec Primaire-Collège* indique des performances déficitaires. L'objectif est d'améliorer la mémoire sérielle phonologique. L'entraînement consiste à discriminer un son parmi une séquence de plusieurs sons, de comparer ou de composer des séquences de sons. Par exemple, lors d'une tâche de comparaison de deux séquences de sons, le participant doit indiquer quel est le son qui diffère entre la séquence cible /*po-pi-tu-ton-fi*/ et la séquence test /*po-pi-ta-ton-fi*/. La réponse est le troisième son de la deuxième séquence /*ta*/. Autre exemple, lors d'une tâche de composition de deux séquences de sons, le participant doit indiquer la position de chaque son énoncé aléatoirement dans la séquence : /*fi-tou-chu-cha-fu*/, il faut cliquer sur le deuxième rond si le son énoncé est /*tou*/, sur le cinquième si le son énoncé est /*fu*/ et ainsi de suite.

La proximité phonologique entre les sons et la charge en mémoire phonologique, le type de tâche, les phonèmes cibles, la structure syllabique et le nombre de stimuli à mémoriser sont paramétrables en présentiel ou à distance par l'orthophoniste investigatrice (Figure 4.4).

Les syllabes proposées obéissent aux règles graphotactiques de la langue. Chaque syllabe entendue peut être associée simultanément à une présentation écrite en minuscule ou en majuscule. Le temps d'apparition de la présentation écrite est aussi paramétrable mais cette option peut aussi être supprimée pour que la syllabe soit produite uniquement en modalité auditive. Un feed-back visuel indique la réussite de l'item par un *smiley* qui s'allume et qui s'éteint en cas d'échec. Trois erreurs consécutives entraînent un arrêt de la tâche et 90 % de réussite permet de passer à un paramétrage plus difficile.

Figure 4.4

Phonidow, un exemple de tâche impliquant la mémoire sérielle phonologique (Medina, 2010)

<p>1 Reconnaissance d'un son</p> <p>2 Recherche d'un intrus dans une séquence</p> <p>3 Localisation d'un son dans une séquence</p> <p>4 Comparaison de deux séquences de sons</p> <p>5 Composition d'une séquence de sons</p> <p>Quitte</p>	<p><input checked="" type="radio"/> a</p> <p><input checked="" type="radio"/> é</p> <p><input checked="" type="radio"/> i</p> <p><input type="radio"/> on</p> <p><input type="radio"/> in</p> <p><input checked="" type="radio"/> o</p> <p><input checked="" type="radio"/> u</p> <p><input type="radio"/> an</p> <p><input type="radio"/> ou</p> <p>Précédent Suivant Annuler</p>
<p>Sélectionnez le phonème cible</p> <p>f <input type="radio"/> v</p> <p>s <input type="radio"/> z</p> <p>ch <input type="radio"/> l</p> <p>p <input type="radio"/> b</p> <p>t <input checked="" type="radio"/> d</p> <p>k <input type="radio"/> g</p> <p>m <input type="radio"/> n</p> <p>r <input type="radio"/> l</p> <p>Précédent Suivant Annuler</p>	
<p><input checked="" type="radio"/> Consonne - Voyelle</p> <p><input type="radio"/> Voyelle - Consonne</p> <p><input type="radio"/> [A] - Consonne - Voyelle</p> <p><input type="radio"/> Consonne - [L] - Voyelle</p> <p><input type="radio"/> Consonne - [R] - Voyelle</p> <p><input type="radio"/> [A] - Consonne - [L] - Voyelle</p> <p><input type="radio"/> [A] - Consonne - [R] - Voyelle</p> <p>Précédent Suivant Annuler</p>	<p>4</p> <p>5</p> <p>Afficher le support écrit</p> <p>Syllabes en majuscules ?</p> <p><input checked="" type="radio"/> 1 sec</p> <p><input type="radio"/> 3/10 sec</p> <p><input type="radio"/> 6/10 sec</p> <p>Précédent Suivant Annuler</p>
<p>6</p> <p>Ecouter la cible</p> <p>Ecouter une proposition</p> <p><input type="radio"/> <input type="radio"/> <input type="radio"/> <input checked="" type="radio"/> di</p> <p>Feedback (smiley): <input type="radio"/> <input checked="" type="radio"/> <input checked="" type="radio"/></p>	

Notes. (1) Sélection de la tâche ; (2) Sélection des voyelles ; (3) Sélection des consonnes ; (4) Sélection de la structure syllabique, (5) Sélection du type d'affichage, de la casse et du temps d'apparition du stimulus ; (6) Localisation d'un son dans une séquence avec apparition des stimuli écrits et apparition du feed-back (smiley).

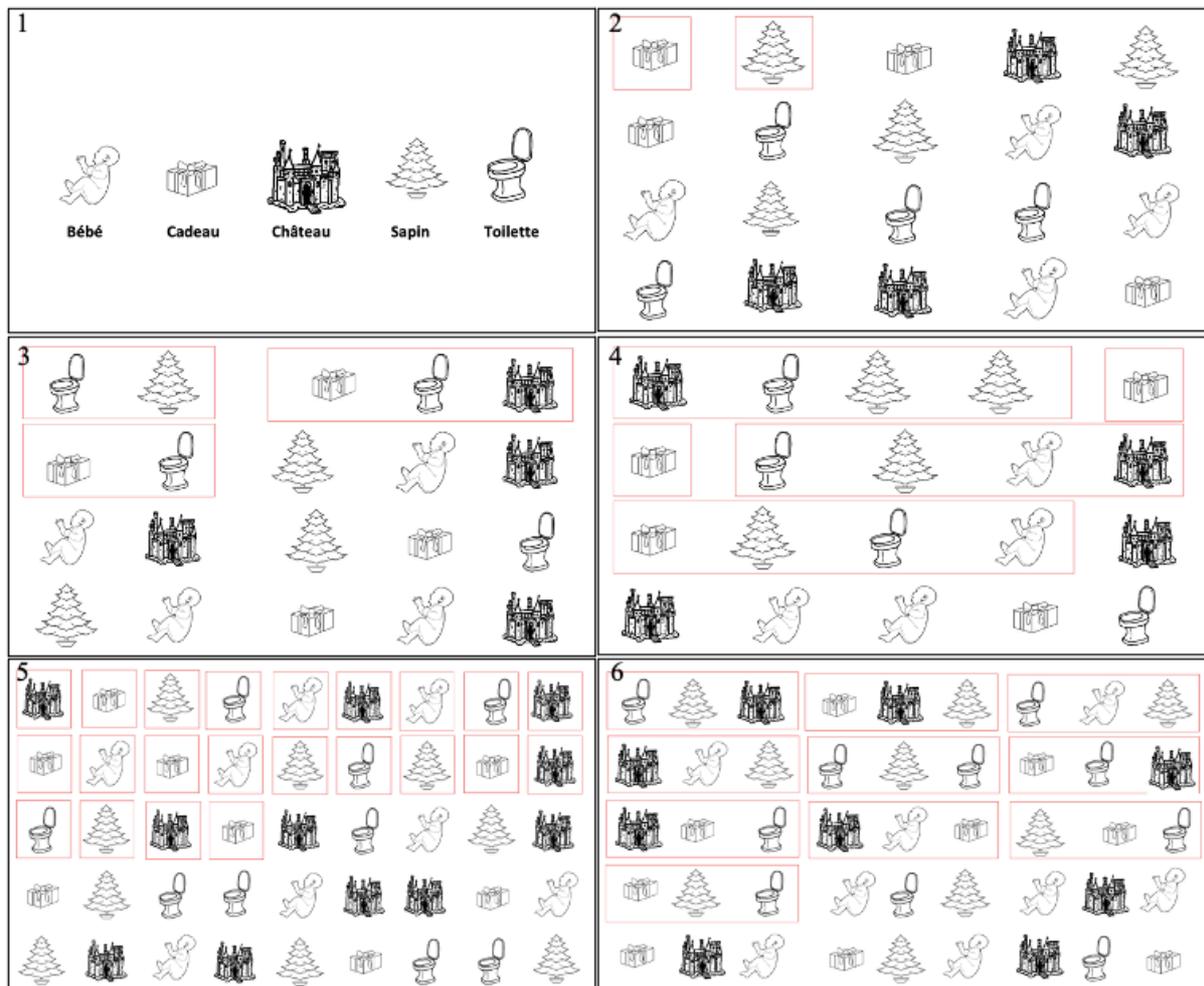
2.3. La dénomination rapide automatisée

L'entraînement de la dénomination rapide automatisée est proposé lorsque les performances au subtest *Dénomination sérielle rapide* de la batterie *Evalec Primaire-Collège*® sont déficitaires. L'outil numérique *Naming Speed* (Harrar-Eskinazi et al., 2020), inspiré du « serious game » italien *Run the RAN* (Pecini et al., 2019) a été créé pour cette étude car il n'existe pas d'équivalent du programme *Run the Ran* en Français. L'objectif est d'entraîner la dénomination rapide de stimuli visuels non alphanumériques et par conséquent d'entraîner différents processus intervenant dans la lecture comme le balayage visuel de gauche à droite, l'attention visuelle, l'accès lexical et la planification phonologique.

Cinq images d'objets en noir et blanc issues de la base de données lexiques LEAD (Bonin et al., 2003) sont présentées à l'écran et répétées aléatoirement sur des lignes horizontales sous forme de matrices de 20 à 60 stimuli (Figure 4.5). L'enfant dénomme les images, dans le sens de lecture, selon une vitesse de dénomination régulière définie automatiquement par le marquage d'un carré rouge entourant l'image ou les images à dénommer. Au fur et à mesure de l'entraînement, la vitesse de dénomination, le nombre d'items sur l'écran et à l'intérieur du carré rouge sont augmentés. L'intervalle inter stimuli passe progressivement de 200 ms à 50 ms. La fréquence lexicale des mots est diminuée progressivement, et parallèlement la complexité phonologique, le nombre de syllabes et le nombre des stimuli sont augmentés au sein de trois séries de 5 séquences composées chacune de 23 diapositives à dénommer. Pour maintenir l'attention et la motivation des participants, des *diamants*, des *figues* et des *Fabulos chanteurs* sont gagnés à la fin de chaque séquence, ce qui permet de découvrir leur pouvoir respectif à travers la découverte d'une vidéo animée (Figure 4.6).

Figure 4.5

Exemples d'items à dénommer avec Naming Speed (Harrar-Eskinazi et al., 2020).



Notes. (1) Dénommer les 5 images avec l'aide de l'examinateur si nécessaire, (2) Dénommer une image parmi 20 images au rythme indiqué par le carré rouge. Le carré rouge se déplace horizontalement de la gauche vers la droite à une vitesse variable de 200 à 50 ms entre chaque image, (3) Dénommer plusieurs images incluses dans le carré rouge, en mode linéaire, (4) ou aléatoire. Le carré rouge peut inclure une, deux, trois, quatre ou cinq images. (5) Dénommer une image parmi 45 images au rythme indiqué par le carré rouge, (6) La vitesse et le nombre d'images incluses dans le carré rouge augmente progressivement (Harrar-Eskinazi et al, 2021).

Figure 4.6

Fin de l'entraînement Naming Speed avec les *Fabulos Chanteurs*



2.4. L'analyse phonémique

L'entraînement de l'analyse phonémique *Le Phonème* ; (Lang & Villuendas, 2011) se compose de tâches orales de fusion de phonèmes en mots ou pseudomots (e.g. d/r/a/g/ɓ : dragon) et de de segmentation de mots ou pseudomots en phonèmes (e.g., jardin : /j/a/r/d/ɛ̃). L'objectif est d'améliorer la conscience phonémique. Dix mots et/ou pseudomots par jour sont entraînés selon une progression établie en fonction des compétences individuelles. L'orthophoniste investigatrice choisit parmi les fiches disponibles (e.g. Figure 4.7) des listes de mots ou pseudomots de 2 à 7 phonèmes, de structure syllabique simple CV (Consonne-Voyelle) ou complexe CCV (Consonne-Consonne-Voyelle) que le participant doit fusionner ou segmenter, lire à voix haute et écrire manuellement. Cet entraînement est expliqué aux parents et contrôlé en séance pour être repris, ensuite, à domicile.

Figure 4.7

Exemples de fiches de segmentation de mots simples et complexes de 4 phonèmes (Lang & Villuendas, 2011)

SEGMENTATION PHONEMIQUE - MC 4P		
<i>Consigne : Découpe chaque mot en sons</i>		
plainte	p.l.in.t	
casque	k.a.s.k	
style	s.t.i.l	
chambre	ch.an.b.r	
éclat	é.k.l.a	
culte	k.u.l.t	
affront	a.f.r.on	
glace	g.l.a.s	
vitre	v.i.t.r	
poste	p.o.s.t	
date :	temps :	secondes /10

SEGMENTATION PHONEMIQUE - MS 4P

Consigne : Découpe chaque mot en sons

bateau	b.a.t.o	
pinson	p.in.s.on	
maison	m.ai.z.on	
poulet	p.ou.l.ai	
laçon	l.a.g.on	
purée	p.u.r.é	
laitue	l.ai.t.u	
saison	s.ai.z.on	
bandit	b.an.d.i	
photo	f.o.t.o	
date :	temps :	secondes /10

3. Programme d'intervention visuo-attentionnelle

Selon le relevé des performances faites à la phase 1 par les tests *Evadys* et *Sigl*, les processus visuo-attentionnels (VA) sont entraînées avec les logiciels informatisés *Maeva* (M. Lobier, 2008) et *Switchipido* (Bedoin & Medina, 2013), à une fréquence de 5 jours/semaine, 10 min/jour et sont associées à un entraînement de la mémoire orthographique *ELOR* 5 jours/semaine, 5 min/jour. Le programme d'intervention VA dure 8 semaines.

Si l'enfant présente à la fois un déficit de l'empan VA et un déficit de la focalisation VA, il effectue l'entraînement *Maeva/ELOR* pendant 4 semaines puis *Switchipido/ELOR* pendant 4 semaines. Si l'enfant ne présente qu'un déficit de l'empan VA sans déficit de la focalisation VA, il effectue l'entraînement *Maeva/ELOR* pendant 8 semaines. Si l'enfant ne présente qu'un déficit de la focalisation VA sans déficit de l'empan VA, il effectue l'entraînement *Switchipido/ELOR* pendant 8 semaines. La première utilisation de *Maeva* et de *Switchipido* nécessite au préalable un paramétrage de l'écran pour uniformiser la présentation des stimuli visuels en fonction de la taille de l'écran utilisé.

3.1. L'empan visuo-attentionnel

L'objectif de *Maeva* est d'augmenter l'empan visuo-attentionnel (nombre d'éléments pouvant être traités simultanément lors d'une fixation oculaire) par une tâche de catégorisation visuelle impliquant cinq catégories de caractères. Chaque catégorie comporte 10 éléments différents et représente des lettres scriptes en minuscules, des chiffres, des caractères japonais Hiragana, des formes géométriques ouvertes et des formes géométriques fermées (cf. Figure 4.8). L'épaisseur des traits, la complexité périmétrique, la taille, la police, la couleur et l'espacement des caractères a été contrôlée afin de s'assurer que l'efficacité d'identification visuelle est équivalente entre les différentes catégories de caractères (M. Lobier, 2008). Après avoir inscrit son prénom, l'enfant accède à un écran de navigation et commence par « la phase de familiarisation » avec les 5 catégories de caractères pendant 2 à 5 minutes, lors des 2 ou 3 premières sessions. Le stimulus présenté doit être attribué à une des cinq « familles » en cliquant sur la bonne étiquette (Figure 4.9).

Figure 4.8

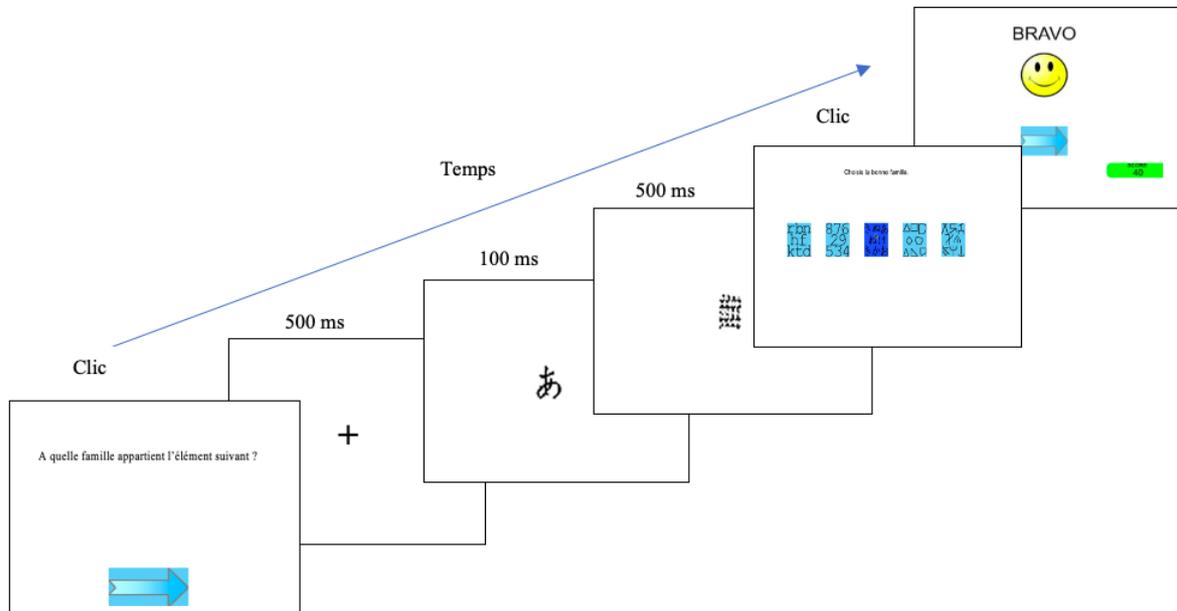
Catégories de stimuli et interface du logiciel Maeva (Lobier, 2008)



Notes. (1) Étiquettes représentatives des cinq catégories visuelles associées aux 10 éléments représentant respectivement chaque catégorie ; (2) Écran de navigation avec accès à la phase de familiarisation, la phase d'entraînement, les meilleurs scores enregistrés ou la sortie du jeu.

Figure 4.9

Maeva (Lobier, 2008), « phase de familiarisation », exemple de déroulement d'un essai



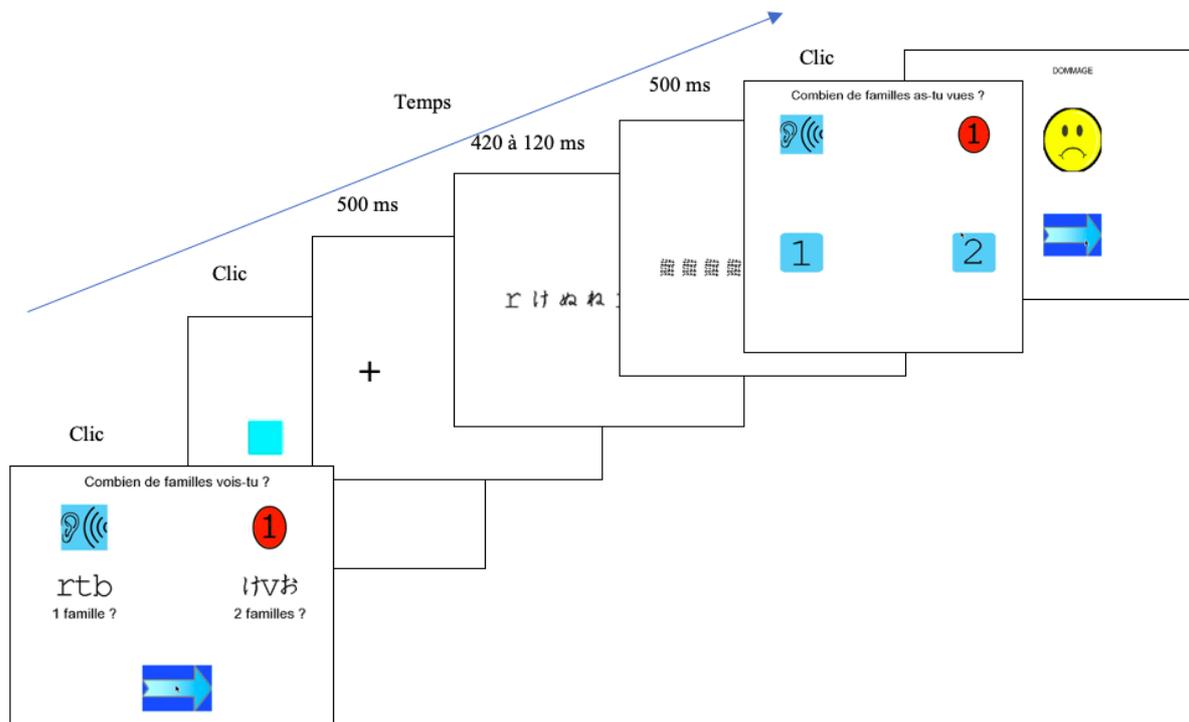
Notes. (1) « A quelle famille appartient l'élément suivant ? », (2) une croix, un stimulus et un masque apparaissent successivement au centre de l'écran, (3) écran de réponse avec les 5 étiquettes familles, (4) feed-back visuel positif et score en bas à droite.

Lors de la « phase d'entraînement », une séquence de deux à sept stimuli visuels est alors présentée à l'écran pendant 120 à 420 ms. À sa disparition, l'enfant doit réaliser une tâche de catégorisation selon six consignes différentes de difficulté croissante : (1) Combien de familles as-tu vu ? ; (2) Est-ce que tu as vu des éléments de cette famille ? ; (3) Quelles étaient les familles présentes ? ; (4) Combien as-tu vu d'éléments de cette famille ? ; (5) Combien d'éléments de chaque famille y avait-il ? ; (6) Quelles familles étaient présentes et combien d'éléments de chaque famille y avait-il ? Un algorithme qui prend en compte les réponses de l'enfant permet d'adapter en temps réel, la consigne, le nombre d'éléments et le temps de présentation de la séquence, le temps de présentation de la séquence et la consigne pour que le taux de réussite oscille autour de 75 %. La position aléatoire du stimulus sur l'écran permet un

maintien attentionnel et une généralisation de l'apprentissage perceptif indépendant d'une position spécifique. L'attribution de scores et de bonus motive l'enfant (cf. Figure 4.10).

Figure 4.10

Maeva (Lobier, 2008), « phase d'entraînement », exemple de déroulement d'un essai



Notes. (1) la consigne est lue ou entendue, (2) un carré bleu se positionne aléatoirement sur l'écran, (3) une croix noire apparaît pendant 500 ms, suivie du stimulus qui apparaît entre 420 et 120 ms, suivie d'un masque pendant 500 ms, (4) écran de réponse et feed-back visuel négatif.

3.2. La focalisation attentionnelle

L'outil numérique *Switchipido* (Bedoin & Medina, 2013) présente brièvement à l'écran des stimuli hiérarchisés de type flèches, lunes, étoiles ou verres (grands stimuli réalisés avec des petits dessins). L'objectif est d'entraîner l'enfant à focaliser son attention visuelle, soit sur la forme globale, soit sur les détails, ou bien mobiliser la bascule de la focalisation visuelle entre le niveau global et le niveau local (e.g. Figure 4.11). Cinq types de tâches sont proposés :

Panneau global : Cet entraînement mobilise la focalisation au niveau global. Sur un stimulus comprenant une petite flèche incluse dans une grande flèche, il s'agit d'indiquer la

direction de la grande flèche. C'est une tâche facile qui permet de démarrer l'entraînement avec Switchipido. L'effet distracteur tient aux variations de taille et de direction des deux flèches.

Triplet global : Cet entraînement mobilise la focalisation au niveau global. L'enfant doit appairer un stimulus simple présenté en haut de l'écran avec un des deux dessins hiérarchisés (un grand stimulus réalisé avec des petits dessins) identique au niveau global. Certains distracteurs contiennent le stimulus cible au niveau local, ce qui génère une interférence supérieure à celle suscitée par des distracteurs neutres (sans reprise de la cible au niveau local).

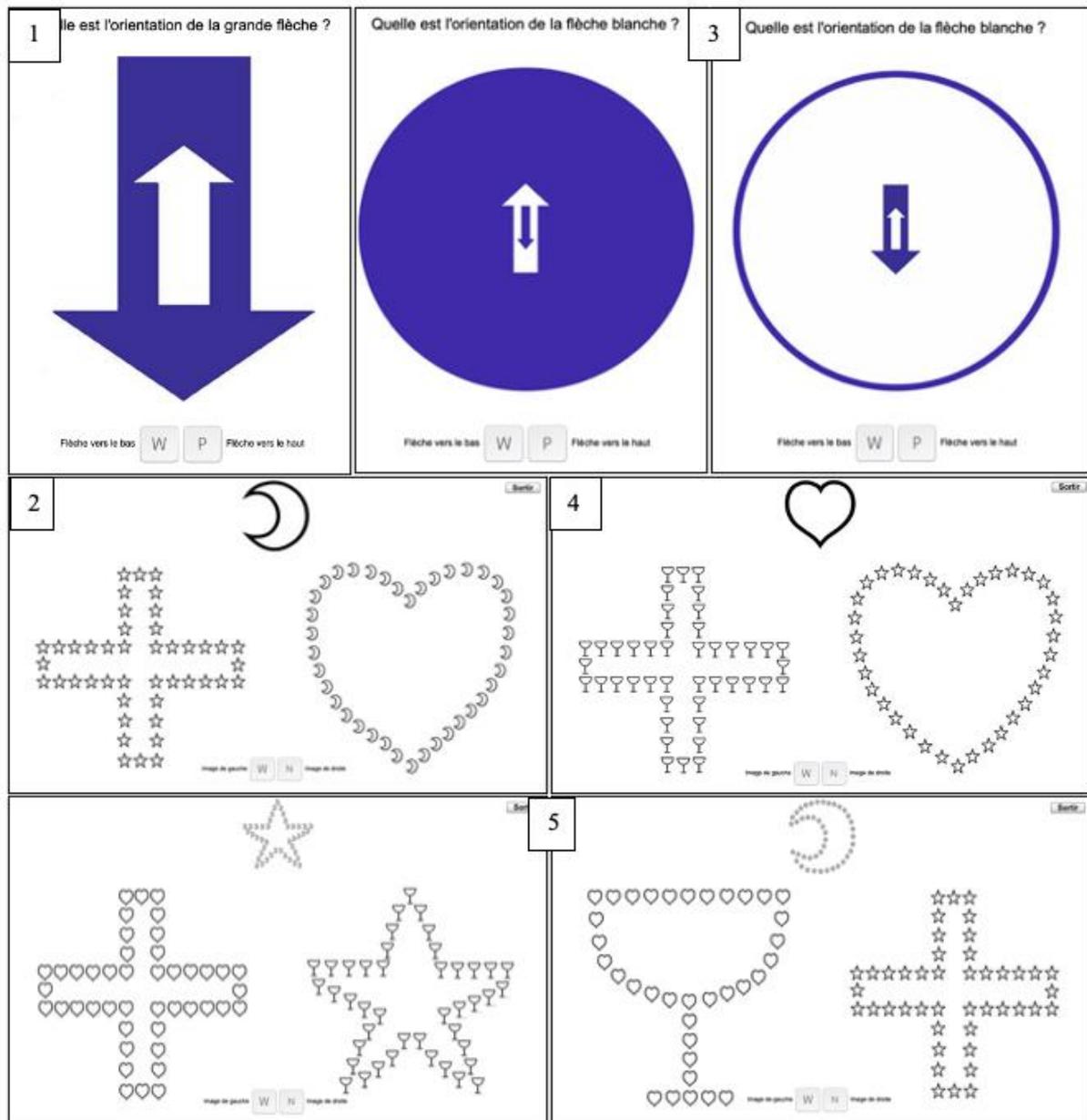
Panneau alternance : Cet entraînement mobilise la bascule de la focalisation entre le niveau local et le niveau global. Sur un stimulus hiérarchisé comprenant deux flèches, une bleue et une blanche, l'enfant doit indiquer la direction de la flèche blanche. L'effet d'interférence tient au fait que la flèche bleue peut-être incorporée dans la blanche ou inversement.

Triplet simple : Cet entraînement mobilise la bascule de la focalisation entre le niveau local et le niveau global. L'enfant doit appairer un stimulus simple présenté en haut de l'écran avec un des deux dessins hiérarchisés (un grand stimulus réalisé avec des petits dessins) identique soit au niveau local, soit au niveau global. La bascule est spécifiquement mobilisée car, d'un item à l'autre, il faut examiner les deux niveaux d'analyse visuelle.

Triplet complexe : Cette tâche mobilise la bascule de la focalisation entre le niveau local et le niveau global. L'enfant doit appairer un stimulus complexe présenté en haut de l'écran avec un des deux dessins hiérarchisés (un grand stimulus réalisé avec des petits dessins) identique soit au niveau local, soit au niveau global. C'est la tâche la plus exigeante en termes de bascule local/global car elle nécessite la prise en compte des deux dimensions du dessin de référence, en sus des deux dimensions des cibles à appairer.

Figure 4.11

Cinq types de tâches du logiciel Switchipido (Bedoin & Medina, 2013)



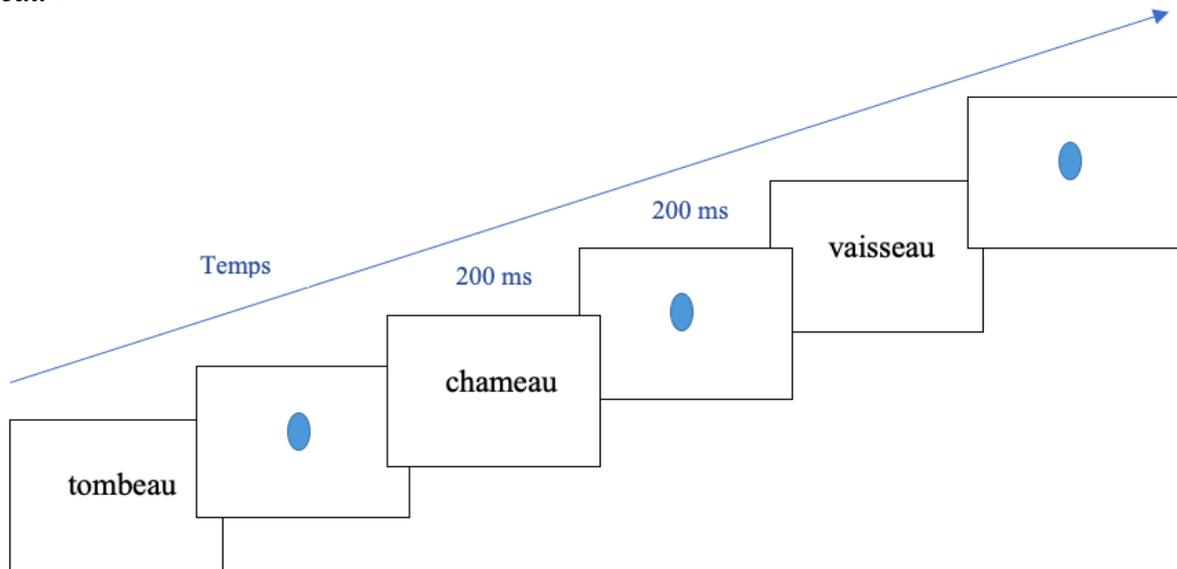
Notes. (1) Panneau global, « indiquer l'orientation de la grande flèche » (2) Triplet global, « appairer un stimulus simple avec un des deux dessins hiérarchisés identique au niveau global » ; bascule de la focalisation entre le niveau local et le niveau global : (3) Panneau alternance, « indiquer la direction de la flèche blanche », (4) Triplet simple, « appairer un stimulus simple avec un des deux dessins hiérarchisés identique soit au niveau local, soit au niveau global », (5) Triplet complexe, « appairer un stimulus complexe avec un des deux dessins hiérarchisés identique soit au niveau local, soit au niveau global ».

3.3. La mémoire orthographique

Les deux programmes d'entraînement *Maeva* (Lobier, 2008) et *Switchipido* (Bedoin & Medina, 2013) sont systématiquement associés au programme informatisé de mémoire orthographique *ELOR* (Lefèvre et al., 2022), à la fréquence de 5 jours/semaine, 5 min/jour. Le programme *ELOR* repose sur le principe d'un processus mnésique d'encodage/stockage/récupération et consiste en une lecture « flash » de 10 à 20 mots sélectionnés avec la même régularité orthographique graphotactique et dont la signification est préalablement contrôlée. Un masquage apparaît pendant 200 ms puis le mot apparaît pendant 200 ms (figure 4.12). À la suite de la lecture, les mêmes mots présentés dans le même ordre en temps limité, doivent être écrits en copie différée. Après la copie, l'enfant est invité à écrire les mots dont il se souvient. L'orthophoniste investigatrice peut également dicter les mots dont l'enfant ne se souvient pas. Les listes de mots et le nombre de mots par liste sont définis par l'orthophoniste et adaptés individuellement en fonction du niveau scolaire, du niveau d'orthographe et des régularités orthographiques. L'entraînement est effectué pendant 5 minutes après les séquences *Maeva* et *Switchipido*.

Figure 4.12

ELOR (Lefèvre et al., 2022), exemples d'items entraînés avec une régularité orthographique « eau »



Notes. (1) les mots qui apparaissent à l'écran sont lus à voix haute ; (2) les mêmes mots sont écrits en copie différée (mot présenté et caché avant la production écrite) ; (3) les mots sont à nouveau lus à voix haute. Le temps inter-stimuli est de 2 secondes mais peut-être adapté à la vitesse de lecture.

4. Programme d'intervention intermodalitaire

L'entraînement des processus intermodalitaires (IM) avec le logiciel *GraphoGame* (Richardson & Lyytinen, 2014) est proposé à tous les LD pendant deux mois (10 min/jour) et est associé à un entraînement de la fluence en lecture (5 min/jour, 5 jours/semaine).

4.1. Intégration grapho-phonémique : GraphoGame

L'objectif est de réduire le déficit spécifique de liaison intermodale (i.e. audio-visuel) entre les lettres et les sons dans le but de renforcer l'automatisation du couplage entre le code orthographique et le code phonologique. Les entraînements phonologiques et VA décrits précédemment reposent sur une présentation non simultanée et soit auditive, soit visuelle, d'unités linguistiques ou non linguistiques. En revanche, *GraphoGame* (Richardson & Lyytinen, 2014) est un entraînement audio-visuel présentant simultanément et de façon répétée

des stimuli auditifs et des stimuli visuels d'unités linguistiques de différentes tailles (phonèmes, syllabes, rimes, mots, phrases). Ce logiciel, conçu comme un *serious game*, propose à l'enfant une progression de jeu qui se complexifie. Le principe est de cliquer à l'écoute d'un stimulus oral, sur sa correspondance parmi plusieurs stimuli écrits. Un casque audio et un ordinateur favorisent l'attention auditive et visuelle.

Trois niveaux de démarrage ont été paramétrés pour s'adapter au niveau de lecture du LD. Le principe est d'associer un stimulus oral avec un stimulus écrit (cf. Figure 4.13). Soixante-sept séquences d'apprentissage ont été construites selon une progression théorique optimale d'apprentissage (Dehaene, 2011) et selon la fréquence et la consistance des correspondances grapho-phonémiques du langage écrit en français (Lété et al., 2004; Peereман & Sprenger-Charolles, 2018; Sprenger-Charolles, 2017). Chaque séquence est composée d'une dizaine de jeux numériques différents où les mêmes correspondances grapho-phonémiques se répètent dans des syllabes, des mots ou des phrases de façon à automatiser l'intégration grapho-phonémique dans des contextes différents. L'enfant doit recommencer la série d'items jusqu'à ce que le critère de réussite fixé à 85 % soit atteint. Les premiers et derniers niveaux de chaque séquence sont des niveaux identiques qui permettent l'évaluation des progrès. Ces niveaux spécifiques ne sont réalisables qu'une seule fois. Pour tous les autres niveaux, un niveau réussi (3 étoiles ou note maximale) ne peut plus être refait. L'attention et la motivation sont maintenues essentiellement par un avatar animé et personnalisé qui peut acheter des vêtements et des accessoires dans un magasin grâce à des pièces de monnaies gagnées en passant les niveaux (Figure 4.14).

Figure 4.13

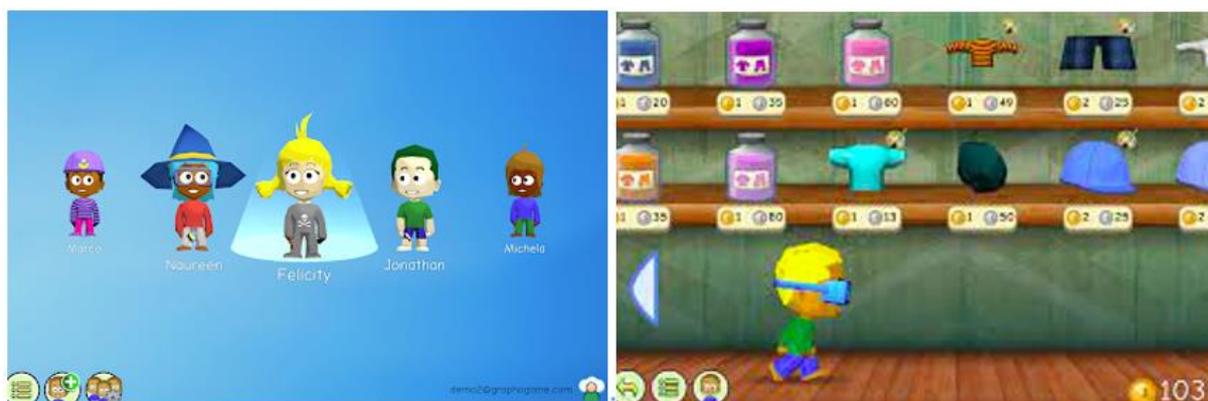
GraphoGame, différents types d'entrâinements (Lassault et al., 2022)



Notes. (1) « Classique », retrouver le mot entendu parmi 2 à 4 mots ; (2) « Multi-instance », retrouver le mot entendu présenté 3 fois à l'écran ; (3) « Formation de mots » reconstruire le mot entendu à partir de différents graphèmes ; (4) « Formation de phrases » reconstruire la phrase entendue à partir de différents mots.

Figure 4.14

GraphoGame : avatars et magasin (Lassault et al., 2022)



4.2. Fluence en lecture : LARMA

L'entraînement avec *GraphoGame* est associé à un entraînement de la fluence en lecture (5 min/jour, 5 jours/semaine) avec le programme *LARMA* (Lecture Accompagnée, Répétée, Masquée, Accélérée). L'objectif de ce programme est d'améliorer la fluidité de lecture et de favoriser l'appétence à lire. Il s'inspire des programmes de lecture accélérée et masquée (Breznitz, 1997b) et de lecture répétée et masquée (Leloup et al., 2021b). L'enfant choisit un livre « papier » adapté à son niveau de lecture pour lire chaque jour un texte à voix haute en suivant 6 étapes. Les étapes 1, 5 et 6 sont obligatoires. Les étapes 2, 3 et 4 sont choisies en fonction du niveau de lecture de l'enfant. Le jour suivant, un texte différent est lu en suivant les mêmes étapes (cf. Encadré 4.1).

Encadré 4.1

Entraînement LARMA : 5 étapes (Harrar-Eskinazi, De Cara, Leloup, Nothelier, et al., 2022)

- (1) Lecture du texte pendant 2 minutes par l'enfant ; le parent relève le nombre d'erreurs.
- (2) Lecture du même texte par le parent, avec une vitesse normale ; l'enfant suit avec un stylo (ou le doigt) le texte lu (traitement audio-visuel).
- (3) Lecture simultanée par l'enfant et le parent (lecture accompagnée), avec le stylo.
- (4) Lecture avec le stylo par l'enfant seul ; le parent corrige les mots erronés ou lit les mots qui ne sont pas lus assez rapidement (lecture répétée).
- (5) Lecture par l'enfant, le plus vite possible, en écoutant une chanson en français de son choix avec un casque audio (masquage auditif).
- (6) Lecture par l'enfant le plus vite possible sans masquage auditif ; le parent relève la vitesse de lecture et le nombre d'erreurs.

5. Moyens mis en œuvre pour optimiser l'engagement

Afin d'optimiser l'engagement et la motivation des enfants et des parents et de promouvoir ainsi les principes d'éducation thérapeutique et de décision partagée, nous avons créé un diaporama pour expliquer ce qu'est la dyslexie et comment la « soigner ». Le diaporama présente les stratégies d'apprentissage de la lecture, le rôle des zones et réseaux cérébraux impliqués dans la lecture chez le normolecteur et le lecteur dyslexique, les implications d'un entraînement spécifique et intensif sur l'activation de ces zones et réseaux, les entraînements proposés pour « soigner » la dyslexie et des liens vidéo donnant accès à des informations sous forme de films d'animation (« La dyslexie, c'est quoi »).

Les parents assistent à toutes les séances tout au long de l'expérimentation afin de renforcer leurs connaissances concernant les difficultés de lecture et d'orthographe de leur enfant, d'apprendre comment effectuer les entraînements et comment les étayer pendant la durée de l'intervention. Pour chaque entraînement, des fiches de consignes écrites leur sont remises pour rappeler pourquoi, quand et comment faire les entraînements, quelle zone cérébrale est activée, comment remplir le calendrier aide-mémo. Chaque fiche incluait un numéro téléphonique de maintenance informatique et un questionnaire de satisfaction. Quatre fiches-parents sont disponibles respectivement pour l'entraînement audio-phonologique, l'entraînement de la DRA, l'entraînement visuo-attentionnel et l'entraînement intermodalitaire (cf. Annexes 3, 4, 5, 6).

Les scores aux tests effectués après chaque programme d'intervention PHO, VA, IM ont été transmis directement à l'enfant pour lui indiquer sa progression et ainsi renforcer l'alliance thérapeutique entre le patient et le clinicien, son investissement et sa motivation. À la fin de l'étude, un « diplôme de lecture » a été attribué à chaque enfant pour le récompenser de sa participation et pour une prise de conscience de l'ampleur de ses progrès (cf. Annexe 10).

Afin d'optimiser l'engagement et l'efficacité des orthophonistes investigatrices dans l'application du protocole de remédiation, l'investigateur principal de l'étude assure leur formation à l'utilisation des programmes d'intervention et aux modalités d'application des entraînements. Pour favoriser l'expertise collégiale, les échanges et les informations pratiques, un forum de questions-réponses est resté disponible pendant toute la durée de l'étude. Cinq *Cahiers de consignes* ont été élaborés pour aider les orthophonistes dans la mise en œuvre du protocole d'intervention multimodale DDMR. Chaque *Cahier de consignes* rappelle l'objectif, la fréquence, le point de départ et la progression de chaque entraînement ; les modalités d'utilisation des logiciels ; les modalités d'évaluation pour chaque *Ligne de base clinique* ; des exemples d'entraînements à proposer pour les séances hebdomadaires au cabinet. Nous présentons, à titre d'exemple, un *Cahier de consignes* à suivre lorsque l'enfant effectue un entraînement de la perception catégorielle, de la mémoire phonologique à court terme, de la fusion et de la segmentation phonémiques, de l'empan visuo-attentionnel et de la focalisation attentionnelle (cf. Annexe 11). Les autres *Cahiers de consignes* sont disponibles sur une plateforme web par les 94 orthophonistes investigatrices de l'étude. Cinq *Cahiers d'observation* ou *Case Report Form* (CRF) ont été mis à leur disposition afin d'indiquer les modalités à effectuer, visite par visite, et de noter les scores de toutes les évaluations et les éventuelles remarques concernant le suivi du protocole de remédiation DDMR (cf. Annexes 7 et 8) (Harrar-Eskinazi, De Cara, Leloup, Nothelier, et al., 2022).

Chapitre 5. Essai Clinique Randomisé

1. Méthode

Trois articles décrivant la méthode ont été publiés. La publication du protocole d'étude (Harrar-Eskinazi, De Cara, Leloup, Nothelier, et al., 2022) s'inscrit dans une volonté de diffuser scientifiquement le protocole d'intervention, contribuer à réduire les biais de publication et à améliorer la reproductibilité des résultats. Le protocole d'essai clinique est décrit selon le modèle *Standard Protocol Items : Recommendations for International Trials* (SPIRIT) fondé sur les preuves et préconisé pour les essais cliniques randomisés (Chan et al., 2013). Le modèle SPIRIT 2013 adhère aux principes éthiques de la Déclaration d'Helsinki de 2008, englobe les éléments du protocole recommandés par les directives E6 de la Conférence internationale sur l'harmonisation des bonnes pratiques cliniques et respecte les exigences d'enregistrement des essais de l'Organisation Mondiale de la Santé et du Comité international des éditeurs de revues médicales. Reformatée afin d'inclure les 51 en-têtes SPIRIT dans le protocole lui-même (Altman, 2015), cette nouvelle façon de structurer le protocole d'essai randomisé permet une lecture plus rapide et vise à réduire les faiblesses méthodologiques (cf. Annexe 2).

La publication d'une étude de cas (cf. Annexe 19, Harrar-Eskinazi et al., 2021) dans le numéro spécial de la revue *Rééducation Orthophonique* dédié aux « Recommandations de Bonne Pratique d'Évaluation, de Prévention et de Remédiation des troubles du langage écrit chez l'enfant et chez l'adulte » s'inscrit dans une illustration pratique de ces recommandations.

La publication d'un acte de colloque (Harrar-Eskinazi, De Cara, Leloup, Denis-Noël, et al., 2022) dans le cadre des XXII^e Rencontres d'orthophonie 2022, intitulé « Langage écrit : état des pratiques orthophoniques et de la recherche », s'inscrit dans une volonté de transmettre une pratique de soin curative, et non compensatoire, basée sur les données probantes et l'expertise des orthophonistes (cf. Annexe 20). Lors de ce colloque, l'intérêt des orthophonistes pour ce type de pratique s'est manifesté par une volonté de participer à la réplication de l'étude prévue en 2023 avec un groupe contrôle et une volonté de se former professionnellement pour changer leurs pratiques.

1.1. Procédure d'inclusion

Critères d'inclusion

Les critères d'inclusion et de non-inclusion des participants répondent aux critères diagnostiques de trouble spécifique neurodéveloppemental de la lecture selon le DSM-5 et la CIM-11 (cf. section 1.2.3) et sont en accord avec le modèle *Simple View of Reading* (Gough & Tunmer, 1986) qui définit la dyslexie développementale comme un trouble d'identification du mot écrit sans trouble de la compréhension orale (voir chapitre 1, section 2.3).

Les participants diagnostiqués dyslexiques, âgés entre 8 et 13 ans, devaient présenter un déficit des compétences en lecture, un déficit du traitement phonologique et un déficit du traitement visuo-attentionnel. Les scores devaient être supérieurs ou égaux à 1.5 écarts-types au-dessous de la moyenne de leur âge chronologique ou développemental (en vitesse et/ou en précision) :

a. aux tests leximétriques *Alouette-R* (Lefavrais, 1967, 2005), et/ou *Evalec Primaire-Collège* (Sprenger-Charolles et al., 2018) et/ou des performances inférieures ou égales au

centile 7 aux tests leximétriques *Mouette*, *Pingouin* ou *EVAL2M* de la batterie *Evaléo 6-15* (Launay et al., 2018),

b. aux épreuves d'analyse phonémique et/ou de répétition de pseudomots et/ou de dénomination rapide automatisée de la batterie *Evalec-Primaire et Collège* (Sprenger-Charolles et al., 2018),

c. aux épreuves de mesure de l'empan visuo-attentionnel en report global et/ou en report partiel du test *Evadys* (Valdois, Guinet, et al., 2014) et/ou aux épreuves de focalisation attentionnelle globale ou locale du test *Sigl* (Bedoin & Medina, 2014).

Critères de non-inclusion

Les enfants présentant un retard intellectuel, des troubles neurologiques, un trouble envahissant du développement, un déficit sensoriel primaire, des carences éducatives, un trouble déficitaire de l'attention avec ou sans hyperactivité ou un trouble développemental du langage oral n'ont pas été inclus. Le foyer des parents devait être équipé d'une installation informatique connectée à Internet pour les entraînements quotidiens.

1.2. Participants

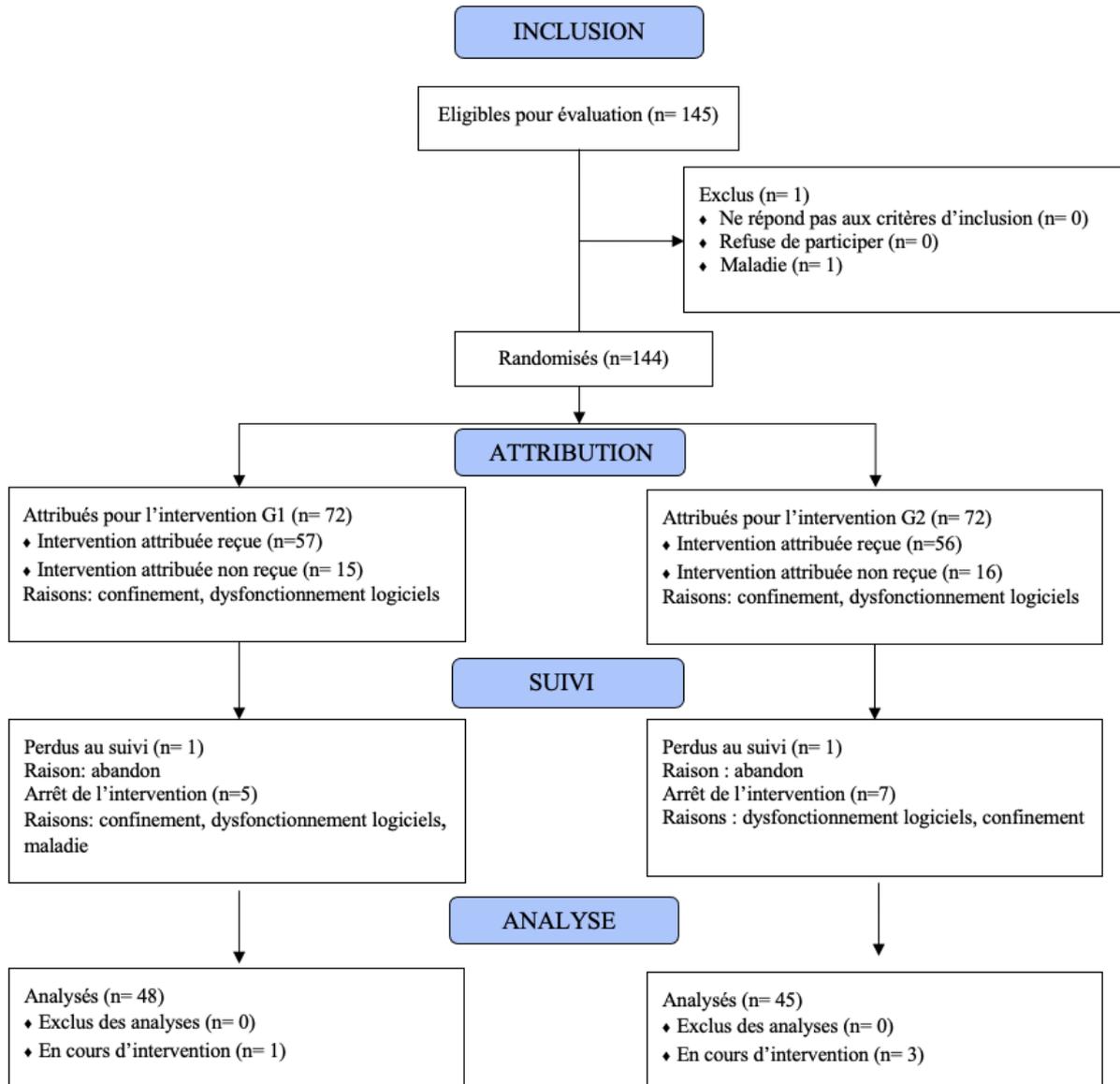
Cent quarante-quatre lecteurs dyslexiques (LD), âgés de 8 ans à 13 ans, ont été inclus dans l'étude par 94 orthophonistes investigatrices pour participer au projet et exerçant en cabinet libéral dans différentes villes de France. La Figure 5.1 correspond à l'organigramme du nombre de participants éligibles pour l'essai clinique, assignés au hasard à un des deux groupes et inclus dans l'analyse principale. Sur les 145 dossiers reçus par l'investigateur principal, seul un dossier ne remplissait pas les critères d'inclusion et a été exclu car il présentait un trouble développemental du langage. Tous les participants initialement

considérés pour l'inclusion ont vérifié le critère de double-déficit PHO et VA (« i.e., la présence d'une seule mesure en deçà de 1.5 ET de la moyenne à l'une des tâches évaluant les processus phonologiques d'une part et les processus visuo-attentionnels d'autre part, suffisait pour être éligible).

À chaque étape, les raisons des exclusions sont rapportées. Sur 144 participants, 93 ont terminé le protocole au moment des analyses effectuées dans cette thèse dont 48 participants dans le groupe PHO-VA et 45 participants dans le groupe VA-PHO.

Figure 5.1

Organigramme de la procédure d'inclusion à l'analyse des données (CONSORT, 2010)



Le Tableau 5.1 présente les moyennes et écarts-types des scores bruts de chaque variable dépendante (VD) mesurée au Temps 1 pour les deux groupes. Nous avons comparé les deux groupes de participants à l'aide du test t de Student pour échantillons indépendants. Les valeurs de p sont indiquées après correction de Bonferroni. La taille des effets (d de Cohen) indique que les deux groupes sont comparables sauf pour l'âge chronologique et par conséquent

la classe, le décalage entre l'âge de lecture et l'âge chronologique. Notons que le groupe PHO-VA (âge moyen 127 mois) est en moyenne plus âgé que le groupe VA-PHO (118 mois) et qu'une année scolaire les sépare. Le décalage entre l'âge chronologique et l'âge de lecture est plus grand dans le groupe PHO-VA (33 mois) que VA-PHO (26 mois).

Une différence entre les deux groupes apparaît aussi en ce qui concerne les moyennes de scores bruts de l'efficacité en lecture de pseudomots, du seuil de lettre, et de l'empan de chiffres à l'endroit. Comme les deux groupes présentent une différence d'âge chronologique, nous les avons comparés en termes de scores standardisés par rapport aux données normatives (cf. Annexe 22). La différence entre les deux groupes se confirme seulement pour les moyennes de scores standardisés de l'analyse phonémique et de la DRA, plus marqués pour le groupe PHO-VA que ceux du groupe VA-PHO. Les autres mesures standardisées sont équilibrées entre les deux groupes.

Tableau 5.1

Moyennes des scores bruts et écarts-types au Temps 1 des participants ayant effectué tout le protocole de remédiation

	Groupe PHO-VA n=48 Moyennes (écarts-types)	Groupe VA-PHO n=45 Moyennes (écarts-types)	<i>t</i> de Student	Valeur de <i>p</i>	<i>d</i> de Cohen
Age chronologique (mois)	127.07 (19.5)	117.7 (15.2)	2.58	0.01*	0.53
Genre (1: féminin; 0: masculin)	0.5 (0.5)	0.68 (0.5)	-1.78	0.08	-0.37
Classe en années d'école élémentaire	5.11 (1.7)	4.38 (1.3)	2.31	0.02*	0.48
Niveau d'étude de la mère	3.22 (1.6)	3.66 (1.6)	-1.35	0.18	-0.28
Age lecture - âge chronologique	-33.17 (13.8)	-25.94 (11.6)	-2.74	0.01**	-0.57
Alouette (eff)	154.07 (86.1)	136.49 (70.5)	1.08	0.29	0.22
DeltaText (eff)	139.67 (77.1)	126.27 (67.1)	0.89	0.37	0.19
Mouette/Pingouin (MCL/2 min)	130.7 (67.4)	118.77 (62.5)	0.88	0.38	0.18
Eval MCL (MCL/2min)	109.2 (38.2)	102.96 (36.7)	0.80	0.42	0.17
Mots réguliers (eff)	9.16 (3.6)	9.09 (2.7)	0.09	0.93	0.02
Mots irréguliers (eff)	7.68 (3.4)	8.26 (3)	-0.87	0.39	-0.18
Pseudomots (eff)	4.11 (2.1)	5.32 (2.4)	-2.21	0.03*	-0.53
Compréhension écrite (RC/36)	17.26 (8.8)	16.47 (7.6)	0.46	0.64	0.10
Orthographe (nombre d'erreurs)	45.89 (17.7)	40.17 (18)	1.55	0.13	0.32
Segmentation syllabe (eff)	224.09 (145.5)	235.32 (97.9)	-0.44	0.66	-0.09
Segmentation phonème CVC (eff)	228 (114.7)	273.02 (130.3)	-1.77	0.08	-0.37
Segmentation phonème CCV (eff)	125.09 (82.7)	153.17 (90.5)	-1.56	0.12	-0.32
Empan phonologique	4 (1.5)	3.96 (1.4)	0.14	0.89	0.03
DRA efficacité	207.53 (86.3)	216.4 (59.9)	-0.57	0.57	-0.12
Seuil de lettre (ms)	63.26 (17.1)	72.79 (18.5)	-2.58	0.01*	-0.53
Empan global de lettres	3.48 (0.8)	3.24 (0.6)	1.54	0.13	0.32
Empan partiel de lettres	4.21 (0.6)	3.98 (0.7)	1.64	0.10	0.34
Interférence/global TE	0.05 (0.1)	0.03 (0.1)	0.94	0.35	0.20
Interférence/global TR (ms)	35.03 (88.4)	60.8 (92.5)	-1.37	0.18	-0.28
Interférence/local TE	0.01 (0)	0.01 (0)	0.85	0.40	0.18
Interférence /local TR (ms)	31.26 (62)	38.24 (58.5)	-0.56	0.58	-0.12
Empan chiffres endroit	4.72 (0.9)	4.34 (0.9)	2.05	0.04*	0.42
Empan chiffres envers	2.78 (1.4)	2.65 (1.6)	0.41	0.68	0.09
Empan visuospatial endroit	5.41 (1)	5.19 (0.9)	1.11	0.27	0.23
Empan visuospatial envers	4.89 (1.1)	4.98 (1)	-0.40	0.69	-0.08
Vocabulaire dénomination (eff)	11.46 (10.8)	14.39 (12.1)	-1.23	0.22	-0.26
Vocabulaire désignation (RC)	146.98 (10.7)	150.36 (12.4)	-1.41	0.16	-0.29
Compréhension orale (NE)	4.57 (2.9)	4.87 (2.7)	-0.52	0.60	-0.11
Matrices (notes standards)	11.15 (2.8)	10.65 (2.5)	0.87	0.39	0.19
Questionnaire Enfant (Likert)	36.16 (8.2)	36.2 (7.1)	-0.03	0.98	-0.01
Questionnaire Parent (Likert)	32.77 (6.5)	33.62 (5.7)	-0.65	0.52	-0.14

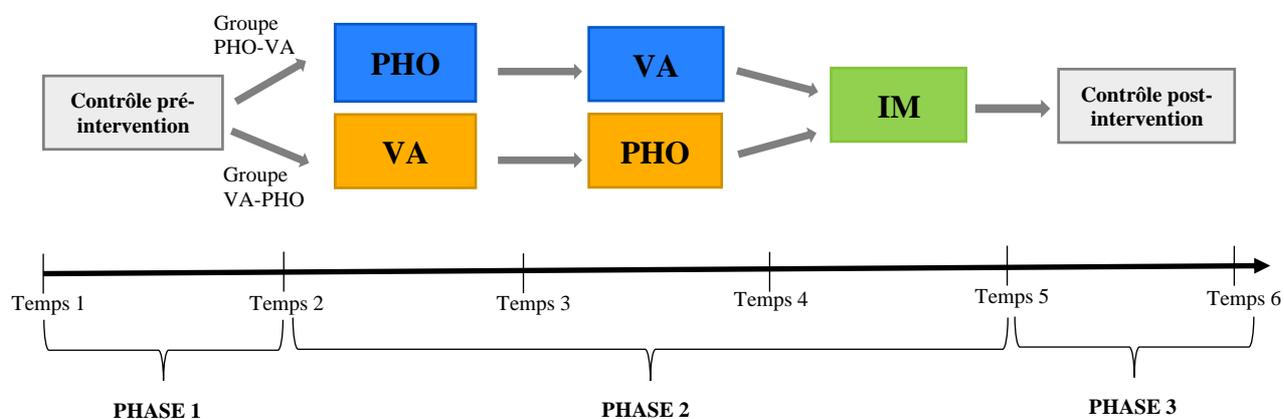
Notes. Moyennes, écarts-types et comparaison des deux groupes : PHO-VA, groupe qui commence par l'entraînement phonologique ; VA-PHO, groupe qui commence par l'entraînement visuo-attentionnel ; classes en années d'école élémentaire de 3 (CE2) à 8 (quatrième) ; eff : efficacité ; eff en lecture de textes Alouette et DeltaText : (mots corrects/temps)*180 ; eff de lecture de texte Mouette/Pingouin et de mots EVAL2M : mots corrects lus en 2 min ; mots réguliers, irréguliers et pseudo-mots efficacité : (% de mots corrects/temps)*100 ; compréhension écrite RC = nombre de réponses correctes/36, segmentation de phonèmes CVC : Consonne-Voyelle-Consonne et CCV : Consonne-Consonne-Voyelle eff : (% de réponses correctes/temps)*100 ; DRA eff : dénomination rapide automatisée de couleurs en % de réponses correctes/temps ; seuil de lettre : identification de lettre en ms, VA : visuo-attentionnel ; Interférence/global : interférence issue du global ; interférence/local : interférence issue du local ; TE : taux d'erreur ; TR : temps de réponse en ms ; vocabulaire en dénomination efficacité : % réponses correctes/temps, RC : réponses correctes ; NE : nombre d'erreurs.

1.3. Protocole d'intervention

Le protocole de remédiation multimodale et multi-composentielle décrit dans le chapitre 4 a été proposé aux participants de cette étude. Même si la prescription de soin au sein d'un programme d'intervention est individuelle et choisie en fonction du profil cognitif et du profil de lecture, tous les participants ont reçu les trois programmes d'intervention. L'expérimentation s'est déroulée en trois phases sur une période de 16 mois, selon la procédure illustrée sur la Figure 5.2. Après l'inclusion des participants, un processus de randomisation selon une procédure d'attribution 1/1 répartit les 144 participants inclus en deux groupes, le groupe PHO-VA et le groupe VA-PHO.

Figure 5.2

Procédure expérimentale en trois phases d'une durée totale de 16 mois



Notes. PHO : intervention PHOnologique ; VA : intervention Visuo-Attentionnelle, IM : intervention InterModalitaire. Chaque intervention dure 8 semaines.

La phase 1 dite de « contrôle pré-intervention » du Temps 1 au Temps 2 consiste une rééducation orthophonique conventionnelle sans entraînement intensif pendant huit semaines, à la fréquence d'une séance hebdomadaire de 30 minutes avec l'orthophoniste. Le Tableau 5.2 détaille et illustre les axes de cette thérapie. Les séances d'évaluation effectuées au Temps 1 et

au Temps 2 par les orthophonistes, sont réparties pendant huit semaines, afin d'éviter un impact de la fatigabilité sur les résultats. La Ligne de base Pré-intervention correspond aux mesures effectuées aux Temps 1 et 2.

Tableau 5.2

Phase 1 « contrôle pré-intervention » : thérapie conventionnelle selon quatre axes thérapeutiques ciblant les troubles comportementaux de la lecture et de l'orthographe (30 min/semaine)

Axes de rééducation	Exemples
Rééducation de la procédure d'assemblage Lecture et orthographe phonologiques	Conversions graphème/phonème et phonème/graphème
	Fusion et segmentation phonémique et graphémique
	Accès au sens
Rééducation de la procédure lexicale Lecture et orthographe lexicales	Épellation de mots et grilles de mots cachés
	Reconnaissance de mots dans un texte
	Accès au sens et dérivation morphologique de mots
	Lecture répétée et accompagnée
Orthographe grammaticale	Nature et fonctions des mots
Production de texte	Manuscrite ou numérique

Note. Axes de rééducation définis par Touzin (2004).

Lors de la phase 2 « intervention avec entraînement intensif », le participant effectue les trois programmes d'intervention intensive, le programme d'intervention audio-phonologique (PHO), le programme d'intervention visuo-attentionnel (VA), et le programme d'intervention intermodalitaire (IM) à son domicile 5 jours/semaine, 15 min/jour (cf. Figure 5.1). Chaque programme dure 8 semaines et s'achève par une pause de 15 jours. L'ordre des deux premières interventions (PHO et VA) est inversé entre les deux groupes : le groupe PHO-VA commence par l'intervention PHO et le groupe VA-PHO par l'intervention VA. La séance hebdomadaire avec l'orthophoniste permet d'ajuster les entraînements en fonction de l'évolution individuelle (cf. Chapitre 4) et de vérifier si les instructions d'entraînement à domicile sont bien comprises et appliquées. Par exemple, en ce qui concerne le programme d'intervention VA, si l'enfant a

un déficit de la focalisation attentionnelle globale/locale, il effectue l'entraînement Switchipido associé à celui de la mémoire orthographique pour lequel l'orthophoniste indique chaque semaine la régularité orthographique à mémoriser (e.g., *eau, ill, ien, gn, ette...*), en fonction de l'évolution et de ses compétences. À la fin de chaque programme d'intervention PHO, VA ou IM, l'orthophoniste évalue de nouveau les compétences en lecture, en orthographe et les processus cognitifs sous-jacents (cf. Tableau 5.3) aux Temps 3, Temps 4 et Temps 5 (durée : 3 mois). De plus au sein de chaque intervention PHO, VA et IM, des *Lignes de base cliniques* sont effectuées tous les mois pour chaque type d'entraînement. Par exemple, en ce qui concerne le programme d'intervention VA, si le participant présente un déficit de l'empan visuo-attentionnel, les *Lignes de base cliniques* (cf. Tableau 5.5, section 1.4) évaluent les performances aux items spécifiques et entraînés sur le logiciel Maeva, les items spécifiques non-entraînés, la généralisation sur l'efficacité en lecture de mots irréguliers et les items neutres non spécifiques.

Lors de la phase 3 « contrôle post-intervention », identique à la phase 1 avec arrêt des entraînements intensifs, le participant continue à bénéficier d'une rééducation orthophonique conventionnelle hebdomadaire de 30 minutes pendant 8 semaines. La ligne de base post-intervention correspond aux mesures effectuées aux Temps 5 et 6.

1.4. Protocole d'évaluation

Le plan d'évaluation, le déroulement des visites et toutes les données collectées par participant sont saisis dans 5 Cahiers d'observation (CRF) disponibles en ligne (cf. Annexes 7 et 8, Harrar-Eskinazi et al., 2022). Le CRF Test 1 indique le plan d'évaluation initial et le nombre de visites nécessaires aux mesures effectuées au Temps 1. Le CRF Groupe PHO-VA indique le plan d'évaluation et le nombre de visites nécessaires entre le Temps 2 et le Temps 6

pour les participants qui commencent par l'intervention PHO, puis VA puis IM. Le CRF Groupe VA-PHO indique le plan d'évaluation et le nombre de visites du Temps 2 au Temps 6 pour les participants qui commencent par l'intervention VA, puis PHO puis IM. Les CRF DRA Groupe PHO-VA et groupe VA-PHO indiquent les plans d'évaluation et le nombre de visites du Temps 2 au Temps 6 pour les participants qui présentent un déficit de la DRA.

La qualité des données est optimisée par des évaluations informatisées pour tous les tests, à l'exception de deux tests de leximétrie (*Alouette* et *DeltaText*), d'un test de compréhension de lecture (*L3-ORLEC*), d'un test d'orthographe (*Chronosdictées*) et d'un questionnaire d'estime de soi avec une échelle de Likert. Tous les tests sélectionnés sont référencés et étalonnés selon des données normatives auprès de normolecteurs, excepté le questionnaire d'estime de soi et *DeltaText* (cf. Tableau 5.2). L'ensemble des épreuves d'évaluation est administré par l'orthophoniste qui a inclus le participant (cf. CRF dans les Annexes 7 et 8, Harrar-Eskinazi et al., 2022).

Lignes de base pré et post-intervention

Les 2 lignes de base pré et post-intervention évaluent les compétences des manifestations en lecture, les compétences en orthographe, les processus cognitifs sous-jacents phonologiques et visuo-attentionnels, les compétences mnésiques, linguistiques, le raisonnement fluide, l'impact du trouble de la lecture sur l'appétence et l'estime de soi en lecture et les compétences scolaires et l'estime de soi. Le tableau 5.3 donne un aperçu des batteries d'évaluation et illustre les mesures effectuées.

Pour toutes les épreuves de la batterie *Evalec Primaire-Collège* (Sprenger-Charolles et al., 2018), les scores sont indiqués en pourcentage d'erreurs pour la précision et en secondes pour la vitesse. Les scores standardisés, représentant l'écart entre le score du participant et la

moyenne normale attendue pour une tranche d'âge déterminée, sont calculés par le logiciel selon l'équation mathématique :

$$\frac{\text{score du participant} - \text{moyenne des données normatives}}{\text{écart - type des données normatives}}$$

Cette équation s'applique également aux tests *Chronosdictées* (Baneath et al., 2006), *Evadys* (Valdois, Guinet, et al., 2014), *Sigl* (Bedoin & Medina, 2014), *blocs de Corsi* (Fournier & Albaret, 2013) et *l'E.CO.S.SE* (Lecocq, 1998) et *L3-ORLEC* (Lobrot, 1967; Piérart & Grégoire, 2004). Pour toutes les épreuves de la batterie *Evaléo 6-15* (Launay et al., 2018), les scores sont distingués selon 7 classes : Classe 1 = centiles inférieurs à 7, Classe 2 = centiles 7 à 20, Classe 3 = centiles 21 à 38, Classe 4 = centiles 39 à 62, Classe 5 = centiles 63 à 80, Classe 6 = centiles 81 à 93, Classe 7 = centiles supérieurs à 93.

Tableau 5.3

Liste des batteries d'évaluation utilisées du Temps 1 au Temps 6

	Compétences évaluées	Mesures	Temps
Lecture et orthographe	Lecture à voix haute : <i>Alouette /DeltaText, Evaléo, Evalec</i>	Textes non signifiants Texte signifiant Mots lus en 2 min Mots réguliers, irréguliers, pseudomots	1 à 6
	Lecture-compréhension : <i>L3-ORLEC</i> Orthographe : <i>Chronosdictées</i>	Phrases Phonétique, lexicale et grammaticale	
	Impact de la DD : <i>échelles de Likert</i>	Appétence lecture et scolaire, auto-évaluation, estime de soi	1,2,5,6
Processus cognitifs sous-jacents	Processus phonologiques : <i>Evalec</i>	Analyse phonologique Mémoire phonologique DRA	1,2,3,5
	Processus visuo-attentionnels : <i>Evadys, Sigl</i>	Empan visuo-attentionnel Analyse global/local	
Évaluations complémentaires	Empan mnésique : <i>Evaléo, Corsi</i>	Empan verbal Empan visuo-spatial	1,2,5
	Langage oral, É. co.s.se : <i>Evaléo</i> Raisonnement non verbal : <i>WISC-V</i>	Vocabulaire actif et passif Compréhension syntaxique Intelligence fluide et visuo-spatiale Matrices	1

Mesures de la lecture de textes

Compte tenu de la répétition des mesures leximétriques aux Temps 1 à 6, un effet *retest*⁹ est attendu (McArthur, 2007). Ainsi, pour tenir compte de cet éventuel effet pour *L'Alouette-R*, le test *DeltaText* (Bedoin, 2017), composée de 4 textes non-signifiants (équilibrés en longueur, en fréquence lexicale et en complexité syllabique et phonémique), est proposé en même temps que le test de *L'Alouette-R*. De même, des versions alternatives sont proposées

⁹ « L'effet *retest* est défini comme un gain dans les résultats à la suite de la reprise du même test ou d'un autre test de capacité cognitive dans des conditions comparables » (Lievens et al., 2007).

pour les tests de lecture de textes signifiants (*la Mouette et le Pingouin*) inclus dans la batterie Evaléo 6-15 et pour le test d'orthographe (*Chronosdictées*) qui propose la passation alternée de deux versions de dictée de phrases (A et B).

L'efficacité en lecture est mesurée par la lecture de trois textes. Les deux premiers sont non signifiants : *L'Alouette-R* et *DeltaText*. *L'Alouette-R* (Lefavrais, 1967, 2005), *gold-standard* des épreuves de leximétrie (Cavalli et al., 2018) est un texte composé de 265 mots qui comprend des « pièges » pour un lecteur qui utiliserait massivement des anticipations contextuelles (« poisson » au lieu de « poison » après « lac ») ou de mauvaises conduites d'identification (items proches visuellement ou phonologiquement, comme « amie/Annie » ou « gai/geai »). Le texte est entouré de dessins favorisant les erreurs contextuelles (dessin d'un écureuil près du mot « écueil »). Le nombre de mots correctement lus et le temps sont relevés. La lecture est interrompue au bout de 3 minutes. Un âge de lecture est calculé en fonction du nombre d'erreurs et du temps de lecture par les « tableaux des niveaux lecture » (Lefavrais, 1967). L'efficacité en lecture est calculée par la formule :

$$\frac{\text{Nombre de mots corrects lus} * 180}{\text{Temps de lecture}}$$

Le deuxième texte non signifiant, *DeltaText* (Bedoin, 2018), est décliné en quatre versions différentes. Les quatre textes contiennent chacun 201 mots et sont appariés en longueur de mots et de phrases, en fréquence lexicale et en complexité syllabique et phonémique. Ces quatre versions sont proposées pour réduire un éventuel effet *retest* (Scharfen et al., 2018). Tous les mots sont réguliers pour permettre une lecture même si le lexique orthographique est insuffisant. Le nombre de mots correctement lus et le temps sont mesurés. La lecture est interrompue au bout de 3 minutes et l'efficacité en lecture est calculée par la même formule que pour *L'Alouette*.

Le troisième texte lu est signifiant, décliné en deux versions différentes, *La Mouette* et *Le Pingouin* (Evaléo 6-15, Launay et al., 2018). Les deux textes contiennent chacun 450 mots et sont appariés en longueur de mots et de phrases, en fréquence lexicale et en complexité syllabique et phonémique afin de réduire un éventuel effet *retest* (Scharfen et al., 2018). Cette tâche évalue le nombre de mots lus correctement dans un temps limité de 2 minutes.

Mesures de la lecture de mots isolés

EVAL2M (Evaléo 6-15, Launay et al., 2018) évalue le nombre de mots lus correctement dans un temps limité de 2 minutes parmi 263 mots présentés en 10 colonnes et ordonnés en fonction de la longueur et de la fréquence.

Par ailleurs, les procédures d'identification de mots sont évaluées par des épreuves de lecture de mots réguliers, irréguliers et de pseudomots de la batterie *Evalec Primaire-Collège* (Sprenger-Charolles et al., 2018) qui mesure les temps d'identification des mots correctement lus par une détection vocale. Les procédures de lecture lexicale ou sublexicale sont évaluées par le calcul du temps de latence en millisecondes des items lus correctement et du pourcentage d'erreurs lors de la lecture de 36 mots réguliers, de 36 mots irréguliers et de 36 pseudomots. L'effet de longueur est évalué en comparant les scores en précision et en vitesse pour 20 mots irréguliers courts et longs et pour 20 pseudomots courts et longs.

Mesure de la compréhension en lecture

Les compétences en compréhension de phrases en lecture silencieuse sont évaluées par la batterie *L3-ORLEC* (Lobrot, 1967; Piérart & Grégoire, 2004) en combinant la vitesse de décodage des mots et le nombre de réponses. Ce test de *closure* présente 36 phrases à compléter avec un mot choisi parmi 5 proposés. Le score brut correspond au nombre d'items corrects effectués en 5 minutes.

Mesures de l'orthographe

L'orthographe lexicale, morphosyntaxique et phonologique est évaluée par le test *Chronosdictées* (Baneath et al., 2006) composé de deux dictées de phrases qui évaluent l'orthographe pour chaque niveau scolaire en primaire et au collège. Les deux dictées sont équilibrées en nombre de mots et en longueur de mots et de phrases, en fréquence lexicale et en complexité syllabique et phonémique afin de réduire un éventuel effet *retest* (Scharfen et al., 2018). Les scores s'expriment en nombre d'erreurs phonologiques, lexicales et grammaticales, en nombre d'erreurs de segmentation et d'omissions de mots et en nombre total d'erreurs.

Mesures de l'estime de soi et de la perception du trouble de la lecture

Deux questionnaires avec réponse sur une échelle de Likert, proposés aux parents et aux participants, avant et après les entraînements, évaluent la perception de la conséquence du trouble de la lecture, d'une part, sur l'appétence et l'estime de soi en lecture et, d'autre part, sur les compétences scolaires et l'estime de soi. Les degrés d'accord ou de désaccord pour 13 affirmations sont exprimés selon une échelle de 1 à 5. Les questions 1 à 8 évaluent *l'appétence et l'estime de soi en lecture* ; les questions 9 à 13 évaluent *les compétences scolaires et l'estime de soi* (cf. Annexe 9). Les deux questionnaires sont administrés avant et après le protocole de remédiation.

Mesures des processus phonologiques

Les processus phonologiques sont évalués par le logiciel *Evalec Primaire-Collège* (Sprenger-Charolles et al., 2018) au moyen de deux types de tâches :

- Une tâche de répétition de pseudomots pour évaluer la mémoire phonologique à court terme. Le participant doit répéter à voix haute des séries de pseudomots de 3 à 6 syllabes. Chaque série propose 3 items composés de syllabes de

structure simple Consonne-Voyelle (CV) et 3 items composés de syllabes de structure complexe Consonne-Voyelle-Consonne (CVC).

- Une tâche orale de segmentation syllabique et deux tâches de segmentation phonémique pour évaluer la conscience métaphonologique. Le participant doit supprimer la première syllabe de 10 pseudomots trisyllabiques de structure simple CVCVCV (e.g. « povidu » « vidu »), puis le premier phonème de 12 pseudomots monosyllabiques de structure complexe de type CVC (e.g. « puf » « uf ») et de 12 pseudomots monosyllabiques de structure complexe de type CCV (e.g. « pra » « ra »).

Mesure de la dénomination rapide sérielle

Cette tâche évalue la récupération des représentations phonologiques lexicales. Le premier support visuel présente des carrés de couleurs. Le participant doit dénommer le plus rapidement et le plus précisément possible 6 couleurs : 3 noms de couleur de structure syllabique CVC (rouge, jaune, vert) et 3 de structure syllabique CCV (bleu, blanc, gris), présentés 8 fois dans un ordre aléatoire (n = 54). Le deuxième support visuel présente le nom écrit de chaque couleur que le participant doit lire.

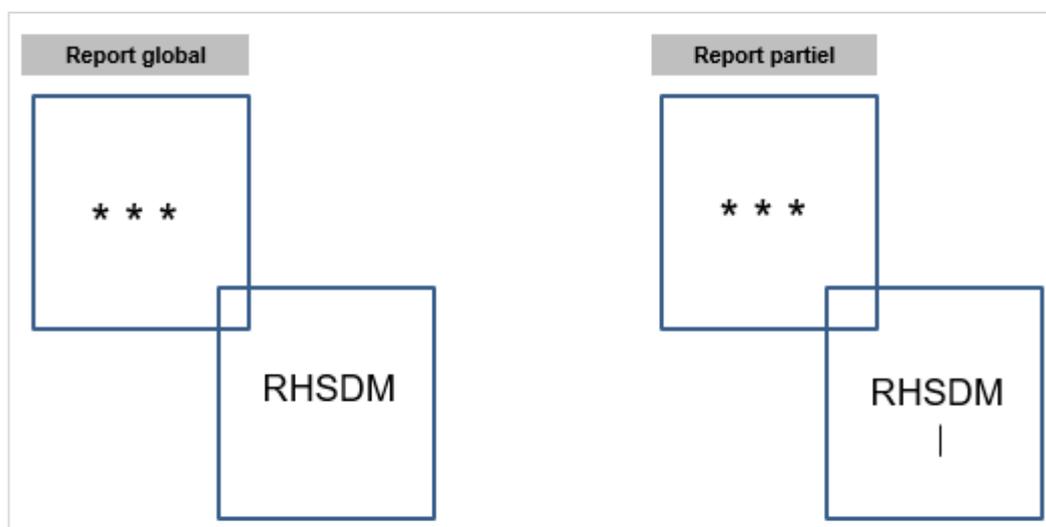
Mesures de l'empan visuo-attentionnel

Les processus VA sont évalués par le logiciel *Evadys* (Valdois, Guinet, et al., 2014) qui détermine l'empan visuo-attentionnel, c'est-à-dire le nombre de lettres perçues simultanément en une fixation oculaire (i.e., 200ms). Deux tâches présentant une séquence de cinq consonnes composent cette épreuve, une tâche de report global et une tâche de report partiel de séquences. Les séquences de lettres sont construites de façon à ne pas activer de connaissances lexicales mémorisées et de façon à éliminer tout effet d'encombrement perceptif (par l'espacement entre les lettres) qui rendrait plus difficile l'identification d'une lettre entourée de deux autres lettres

que lorsque celle-ci est présentée seule. En condition de report global, le participant doit nommer l'ensemble des lettres identifiées immédiatement après la disparition de la séquence à l'écran. En condition de report partiel, une barre verticale apparaît et indique la position de la lettre qui sera à dénommer parmi les cinq lettres présentées (cf. Figure 5.2). Au préalable, une tâche d'identification de lettres isolées est présentée afin d'exclure un trouble de reconnaissance des lettres. Le score est exprimé en nombres d'items réussis et par une mesure de l'empan visuo-attentionnel pour chacune des deux tâches de report.

Figure 5.3

Exemples de tâche de report partiel et global (Evadys)



Note. En report global, la réponse est RHSDM et en report partiel, la réponse est S.

Mesures de la focalisation attentionnelle globale/locale

Le logiciel *Sigl* (Bedoin & Medina, 2014) évalue la capacité à focaliser l'attention visuelle sur un mode d'analyse globale ou locale par présentation de lettres et de dessins hiérarchisés. Seuls les blocs d'items avec dessins hiérarchisés ont été administrés. La tâche est de sélectionner un niveau (global ou local selon la consigne) pour discriminer la cible (e.g., étoile ou lune) à ce niveau. Les stimuli combinent des cœurs, des croix, des lunes et des étoiles (cf. Tableau 5.4). Chaque item est présenté pendant une durée brève (i.e., 175 ms) à gauche ou

à droite de l'écran, aléatoirement. La réponse est donnée en appuyant avec l'index droit à droite et avec l'index gauche à gauche sur les touches *lune* ou *étoile* du clavier, selon la cible sélectionnée. Chaque bloc comporte une majorité de stimuli *Contrôles*, dans lesquels le niveau devant être inhibé ne contient pas une cible (par exemple un grand cœur composé de petites étoiles, la cible étant l'*étoile*), et quelques stimuli *Pièges* dans lesquels le niveau à inhiber contient une cible concurrente à celle qui est présente au niveau pertinent (par exemple une grande lune composée de petites étoiles, la cible étant l'*étoile*). La chute des performances en condition *Piège* témoigne d'une sensibilité à l'interférence issue du niveau qui doit être négligé, et reflète une difficulté à inhiber l'information située à ce niveau. Trois mesures évaluent si l'équilibre entre les niveaux global et local est typique :

- Focalisation globale : la différence de performances entre les conditions *Contrôle* et *Piège* évalue l'interférence locale qui, si elle est forte, témoigne d'un déficit d'inhibition locale et d'une attraction atypique pour les détails ;
- Focalisation locale : la différence de performances entre les conditions *Contrôle* et *Piège* évalue l'interférence globale, généralement élevée ;
- Asymétrie de l'interférence : l'effet d'interférence locale est soustrait de l'effet d'interférence globale et cette différence est typiquement positive.

Le logiciel calcule automatiquement ces valeurs sur les temps de réponse (TR) et les pourcentages d'erreurs.

Tableau 5.4

Exemples de stimuli hiérarchisés avec focalisation locale et globale d'après Bedoin et al (2010)

	Condition <i>Contrôle</i> en focalisation locale	Condition <i>Piège</i> en focalisation globale
Exemples de stimuli hiérarchisés		
Réponse attendue	Étoile	Lune

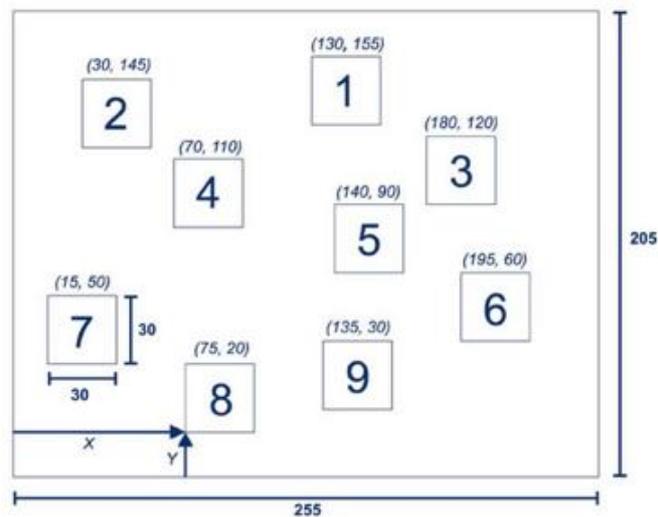
Mesures de l'empan verbal et visuo-spatial

La batterie *Evaléo 6-15* évalue la mémoire verbale à court terme par la répétition de séries de 2 à 7 chiffres à l'endroit et la mémoire de travail par la répétition de séries de 2 à 7 chiffres à l'envers. L'empan verbal correspond au score en nombre de chiffres correctement répétés.

L'épreuve des *blocs de Corsi* (Fournier & Albaret, 2013) évalue la mémoire visuo-spatiale à court terme et la mémoire de travail visuo-spatiale. La tâche consiste à reproduire, dans le même ordre ou en ordre inverse, une séquence de mouvements de pointage de différents cubes, montrée par l'examineur. Le nombre de cubes dans la séquence augmente progressivement ce qui permet de déterminer l'empan visuo-spatial (cf. Figure 5.4).

Figure 5.4

Plan de l'épreuve des blocs de Corsi d'après Kessels et al. (2000)



Note. Les coordonnées en millimètres sont mesurées à partir du coin inférieur gauche de la planche à l'angle inférieur gauche de chaque cube. Les chiffres 1 à 9 sont dessinés sur la face des cubes visible seulement par l'examineur.

Mesures du langage oral

Les compétences lexicales sont évaluées par des tâches de dénomination orale et de *désignation d'images* (Evaléo 6-15). La tâche de dénomination d'images évalue le vocabulaire actif en production et le temps de latence pour dénommer l'image. La tâche de *désignation d'images* évalue le vocabulaire passif en réception. La compréhension sémantico-syntaxique est évaluée par une tâche *d'association image/phrased* (l'E.CO.S.SE, Lecocq, 1998).

Mesure de l'intelligence non-verbale

Le test de raisonnement des *Matrices* de l'échelle d'intelligence de Wechsler pour enfants, WISC-V (Wechsler, 2014), est administré pour déterminer un indice d'intelligence fluide et visuo-spatiale.

Lignes de base cliniques

Plusieurs entraînements sont possibles au sein de chaque programme d'intervention PHO, VA, IM. Le choix des entraînements effectués est prescrit individuellement selon *la Ligne de base Pré-intervention* (i.e., les performances mesurées au Temps 1 et au Temps 2), comme nous l'avons décrit supra mais aussi selon quatre *Lignes de base cliniques*, effectuées avant et après chaque entraînement (voir chapitre 2, section 1.2 pour plus de détails). Adaptées à la nature et à l'ampleur de chaque déficit cognitif sous-jacent et construites en fonction de la zone proximale de développement du participant par l'orthophoniste, ces *Lignes de base cliniques* permettent d'ajuster très précisément les entraînements individuellement et d'en mesurer les effets proximaux. Ces mesures supplémentaires apportent une originalité à notre protocole en combinant la méthodologie d'intervention de l'essai clinique et la méthodologie du cas unique expérimental. Les *Lignes de base cliniques* évaluent les performances aux items entraînés, aux items non entraînés, aux items pour lesquels une généralisation est attendue en lecture ou en orthographe et aux items neutres non spécifiques à l'entraînement, pour lesquels aucune amélioration n'est attendue.

Par exemple, dans le programme d'intervention PHO, si le participant effectue un entraînement de la DRA (*Naming Speed* ; Harrar-Eskinazi et al., 2020) associé à un entraînement de la segmentation orale et écrite de mots en phonèmes (*Le Phonème* ; Lang & Villuendas, 2011), les *Lignes de base cliniques* seront adaptées à l'entraînement afin d'évaluer l'évolution des performances en DRA et en segmentation phonémique sur des items spécifiques entraînés versus non entraînés, la généralisation sur les compétences en lecture de texte et de pseudomots et la spécificité de l'entraînement en proposant des items neutres comme la tâche des *Symboles mathématiques* (cf. Tableau 5.5 a). Plusieurs tableaux illustrent d'autres exemples de *Lignes de base cliniques* pour ajuster les entraînements phonologiques (cf. Tableaux 5.5 b

et c), visuo-attentionnels (cf. Tableaux 5.6 a et b) et intermodalitaires (cf. Annexes 7 et 8, Harrar-Eskinazi, De Cara, Leloup, Nothelier, et al., 2022).

Tableau 5.5

Lignes de base cliniques effectuées avant et après l'entraînement : (a) RapDys et fusion phonémique ; (b) Naming Speed et segmentation phonémique ; (c) Phonopidow et segmentation phonémique.

(a)

Entraînement PHONO 1A - premier mois- V 15		
LDB pré-entraînement PHONO 1A		Résultats
LDBC1 Items entraînés	Fusion de phonèmes, précision sur 10	_ _ _
	Fusion de phonèmes, temps en sec	_ _ _ _
	RapDys, identification, numéro Gnosia	_ _ _ _
	RapDys, discrimination, numéro Gnosia	_ _ _ _
LDBC2 Items non entraînés	Fusion de phonèmes, précision sur 10	_ _ _
	Fusion de phonèmes, temps en sec	_ _ _ _
	Contrepèteries, Evaléo, précision	_
	Contrepèteries, Evaléo, temps en sec	_ _ _ _ . _ _ _
LDBC3	Lecture de pseudomots, score sur 20	_ _ _
	Lecture de pseudomots, temps en sec	_ _ _ _ _ _ _
LDBC4	Fluidité dessins, items réussis en 1 min	_ _ _

(b)

Entraînement PHONO 1A - deuxième mois- V 21		
LDB pré-entraînement PHONO 1B		Résultats
LDBC1 Items entraînés	Segmentation, précision sur 10	_ _ _
	Segmentation, temps en sec	_ _ _ _ _ _ _
	DRA (ppt), nombre d'erreurs	_ _ _
	DRA (ppt), temps en secondes	_ _ _ _ _ _ _
LDBC2 Items non entraînés	Segmentation, précision sur 10	_ _ _
	Segmentation, temps en sec	_ _ _ _ _ _ _
	DRA (ppt), nombre d'erreurs	_ _ _
	DRA (ppt), temps en secondes	_ _ _ _ _ _ _
LDBC3	Monsieur Petit, NMLC en 1 minute	_ _ _ _
	Lecture de pseudomots, précision	_ _ _
	Lecture de pseudomots, temps en sec	_ _ _ _ _ _ _
LDBC4	Symboles mathématiques en 1 minute	_ _ _

(c)

Entraînement PHONO 1B – deuxième mois- V 21		
LDB pré-entraînement PHONO 1B		Résultats
LDBC1 Items entraînés	Segmentation de phonèmes, précision sur 10	_ _
	Segmentation de phonèmes, temps en sec	_ _ _
	Comparaisons de 5 séquences de sons (Phonopidow)	_ _
LDBC2 Items non entraînés	Segmentation de phonèmes, précision sur 10	_ _
	Segmentation de phonèmes, temps en sec	_ _ _
	Acronymes auditifs, BELEC, précision	_ _
	Acronymes auditifs, BELEC, temps en sec	_ _ _ . _ _
LDBC3	Lecture de pseudomots, score sur 20	_ _
	Lecture de PM, temps en sec	_ _ _ _ . _ _
LDBC4	Symboles mathématiques, items réussis en 1 min	_ _

Tableau 5.6

Lignes de base cliniques effectuées avant et après l'entraînement : (a) Maeva et mémoire orthographique ; (b) Switchipido et mémoire orthographique

(a)

Entraînement VA 1A - premier mois - V 20		
LDB post-entraînement VA 1A		Résultats
LDBC1	Items Maeva, score sur 10	_ _
LDBC2	Empan VA Global chiffres Evaléo 6-15	_ . _ _
	RC EVA sur 100	_ _ _
LDBC3	Lecture de mots irréguliers, score sur 20	_ _
	Lecture de mots irréguliers, temps en sec	_ _ _ _ . _ _
LDBC4	Code, temps en secondes	_ _

(b)

Entraînement VA 2B – deuxième mois- V 35			
LDB pré-entraînement VA 2B		Résultats	
LDB1	Triplets complexes Switchipido	Scores bonnes réponses	_ _
		Scores mauvaises réponses	_ _
		Temps moyen en ms	_ _ _ _
LDB2	Empan VA global chiffres, Evaléo	_ . _ _	
	RC, EVA, sur 100	_ _ _	
LDB3	Lecture de mots irréguliers, score sur 20	_ _	
	Lecture de mots irréguliers, temps en sec	_ _ _ _ . _ _	
LDB4	Calcul mental, items réussis en 2 minutes	_ _	

Les modalités d'évaluation et les références de chaque test sont indiquées dans les Cahiers de Consignes Gr PHO-VA, Gr VA-PHO, Gr 1 DRA-VA, Gr 2 VA-DRA et Cahier de Consigne IM (cf. Annexes 7 et 8, Harrar-Eskinazi, De Cara, Leloup, Nothelier, et al., 2022). Nous ne décrivons ici que l'évaluation de la perception catégorielle et l'évaluation de la fusion

et de la segmentation phonémique car elles sont déterminantes pour prescrire les entraînements et ne sont pas effectuées dans les évaluations pré et post-intervention.

Évaluation de la perception catégorielle

Le logiciel *RadDys* (Collet, Colin, & Sernicales, 2017) propose deux tâches avant l'entraînement pour évaluer la perception catégorielle : une tâche d'identification, suivie d'une tâche de discrimination des syllabes /də/ et /tə/. Les stimuli auditifs évoluent le long d'un continuum de délai d'établissement du voisement ou *Voice Onset Time* (VOT) /də/-/tə/ entre +75 et -75 ms, par palier de 30 ms. Les transitions de fréquence fondamentale F1, F2, et F3 sont respectivement de 200, 2200 et 3100 Hz, et la position d'équilibre se situe respectivement à 500, 1500 et 2500 Hz. La fréquence F0 est constante à 120 Hz et chaque syllabe du continuum dure 200ms (pour plus de détails, voir Collet et al., 2012; Zoubrinetzky et al., 2019). En français, /də/ est typiquement perçu comme un VOT négatif et /tə/ comme un VOT positif. Les sons sont délivrés de façon binaurale via un casque. Les deux tâches sont précédées d'une phase de familiarisation comprenant 20 stimuli situés aux extrémités du continuum de VOT, accompagnés d'un feed-back sonore et visuel, qui disparaît pendant la phase de test. Le feed-back est donné par deux personnages animés qui sont deux Gloutons auxquels il faut donner à manger. La tâche d'identification comprend 60 stimuli présentés aléatoirement et composés de 10 essais pour chaque valeur de VOT (-75, -45, -15, +15, +45, +75 ms). Pour répondre /tə/, l'enfant donne à manger à Théo et pour répondre /də/, l'enfant donne à manger à Déa. La tâche de discrimination comprend 80 paires de stimuli présentés aléatoirement et composés de cinq essais de huit paires de stimuli identiques (-75/-75, -45/-45, -15/-15, +15/+15, +45/+45, et +75/+75 ms) et de cinq essais de 10 paires de stimuli différents (-75/-45, -45/-75, -45/-15, -15/-45, -15/+15, +15/15, +15/+45, +45/+15, +45/+75, et +75/+45 ms). Si les stimuli sont différents,

l'enfant donne à manger à Nana et si les stimuli sont identiques, l'enfant donne à manger à Némó (cf. Figure 5.5).

Les scores obtenus avant l'entraînement sont calculés par le logiciel en pourcentage de réussite pour chaque VOT. Les scores d'identification (± 75 et ± 45 de VOT) et de discrimination (0 VOT) inférieurs à 70 % justifient un entraînement. Après 10 séances d'entraînement, *RapDys* propose une seconde évaluation pour déterminer le potentiel d'accroissement après entraînement. Aucun effet *test-retest* n'est constaté par les auteurs même après 4 évaluations successives chez des normolecteurs (Serniclaes et al., 2015).

Figure 5.5

RapDys (1) Tâche d'identification avec Théo et Déa, (2) Tâche de discrimination avec Nana et Némó



Note. Le feed-back est donné par les gloutons pendant la phase de familiarisation puis disparaît pendant la phase test.

Évaluation de la fusion et de la segmentation phonémique

L'évaluation de la fusion et de la segmentation phonémique s'effectue avec 10 items de mots et de pseudomots composés de 7 phonèmes (Métral, 2011). Les stimuli utilisés durant ces deux tâches sont présentés dans la Figure 5.6. Si le score de fusion de phonèmes en mots est inférieur à 8/10 ou si le temps de réponse total mesuré est supérieur à 2 min pour 10 items, un entraînement de la fusion phonémique de mots est effectué. Si le score de fusion de phonèmes

en mots est supérieur à 8/10 dans un temps inférieur à 2 min pour 10 items, la fusion de phonèmes en pseudomots est évaluée. Si le score de fusion de phonèmes en pseudomots est inférieur à 8/10 ou si le temps est supérieur à 2 min pour 10 items, un entraînement de la fusion phonémique de pseudomots est effectué. Si le score de fusion de phonèmes en pseudomots est supérieur à 8/10 dans un temps inférieur à 2 min pour 10 items, l'entraînement n'est pas prescrit. Les directives sont les mêmes pour la segmentation de phonèmes. Toutes les consignes de passation des tests et les procédures d'évaluation sont indiquées sur des Cahiers de consignes (pour plus de détails, cf. Annexe 11 (Harrar-Eskinazi, De Cara, Leloup, Nothelier, et al., 2022). Les épreuves de *retest* sont disponibles dans le manuel *Évaluation du phonème* (Métral, 2011).

Figure 5.6

Exemple d'évaluation de la fusion de phonèmes en mots et en pseudomots (Métral, 2011)

mots - 7 phonèmes		non-mots - 7 phonèmes	
r.e.g.a.r.d.é		r.a.g.i.r.d.o	
k.on.p.r.a.n.d.r		k.ou.p.r.in.d.r	
o.j.ou.r.d.u.i		é.j.a.r.d.i.o	
a.b.a.n.d.o.n.é		i.b.in.d.u.n.a	
o.b.s.a.i.r.v.é		a.b.s.i.r.v.o	
k.a.m.a.r.a.d		k.o.m.u.r.a.i.d	
in.p.r.a.i.s.i.on		in.p.r.ou.s.u.ai	
n.ou.r.i.t.u.r		n.a.r.o.t.e.r	
u.t.i.l.i.z.é		a.t.o.l.é.z.u	
d.é.k.ou.v.a.i.r		d.i.k.on.v.a.r	
temps :		temps :	

1.5. Pré-traitements des données

Le traitement des résultats et les analyses statistiques ont été conduits avec l'appui du Laboratoire d'Anthropologie et de Psychologie Cliniques, Cognitives et Sociales (LAPCOS), de la plateforme CoCoLab de l'Université Côte d'Azur et du Laboratoire de Psychologie Cognitive (UMR 7290 CNRS) d'Aix-Marseille Université.

En particulier, Ambre Denis-Noël, docteure-Ingénieure à la plateforme CoCoLab, et aujourd'hui chercheuse post-doctorante au LPC, a massivement soutenu la réalisation des traitements statistiques en mettant à disposition ses compétences au service de nos questionnements de recherche. Un rôle particulier a également été rempli par Julie Nothelier, ingénieure contractuelle au LPC, pour la saisie et la mise en forme des résultats. Enfin, Elise Lefèvre, docteure au Laboratoire d'Étude des Mécanismes Cognitifs (EMC), Université Lyon 2, a pris une part active dans la conduite des analyses statistiques pour le chapitre 6 (étude de Cas Multiples). Nous tenons à les en remercier.

Le pré-traitement des données et les analyses statistiques ont été réalisés à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2021) version 4.1.2. Les *valeurs aberrantes* ont été identifiées par le *test de Rosner* (Rosner, 1975) à l'aide du package *EnvStats* (Millard & EnvStats-An, 2013) afin d'améliorer les coefficients d'asymétrie (*Skewness*) et d'aplatissement (*Kurtosis*) par référence à la loi normale. Le nombre de valeurs aberrantes supprimées et les coefficients de *Skweness* et *Kurtosis* seront précisés au début de chaque analyse.

2. Effets sur les compétences en lecture de texte, en compréhension écrite et en orthographe

2.1. Objectif et hypothèses

Notre objectif principal était d'évaluer les effets du protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle sur les compétences en lecture et en orthographe. Nous avons émis l'hypothèse que ce protocole combinant trois programmes d'intervention (i.e., PHO, VA, IM) améliorerait significativement les compétences en lecture et que cette amélioration se généraliserait sur les compétences en compréhension de lecture et sur les

compétences en orthographe en comparaison avec une rééducation orthophonique conventionnelle. Enfin, nous nous attendions à ce que cette amélioration se maintienne deux mois après l'arrêt du protocole de remédiation, pour toutes les variables dépendantes mesurées. Nous avons porté une attention particulière à l'évolution des compétences en lecture de textes dans différents contextes sémantique et non sémantique, en utilisant trois variables dépendantes pour évaluer la lecture. La première évalue la lecture dans un contexte non signifiant en faisant appel à des procédures de décodage phonologique (*DeltaText*). La deuxième évalue la lecture dans un contexte peu signifiant et peu écologique en faisant appel à des procédures de décodage phonologique et de recodage lexical (*L'Alouette*). La troisième évalue la lecture dans un contexte signifiant, plus en adéquation avec les exigences scolaires (*Mouette-Pingouin*).

Avant d'exposer les résultats, rappelons que les effets de la thérapie conventionnelle ont été évalués à l'issue des 2 mois de la phase 1 (Temps 2). Ceux de l'intervention multimodale ont été évalués tous les 2 mois à l'issue de chaque programme d'intervention PHO, VA, IM de la phase 2 (Temps 3, Temps 4 et Temps 5) qui marque l'arrêt du protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle et deux mois plus tard (après le retour à une rééducation orthophonique conventionnelle) à l'issue de la phase 3 (Temps 6).

2.2. Analyses statistiques

Pour évaluer les effets du protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle, nous avons utilisé des modèles linéaires à effets mixtes¹⁰. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2021) version 4.1.2 et du

¹⁰ Le plan statistique initial publié dans le protocole d'étude (Harrar et al, 2022) prévoyait comme modèle statistique, l'ANOVA à mesures répétées classiquement utilisée pour évaluer une variable qui évolue dans le Temps et que nous avons appliqué dans une analyse préliminaire des résultats (Harrar-Eskinazi, De Cara, Leloup, Denis-Noël, et al., 2022). Cependant, face aux faiblesses en matière de puissance statistique liées aux problèmes posés par les observations répétées des données longitudinales et à la présence de nombreuses données manquantes, l'utilisation d'un modèle linéaire à effets mixtes semblait plus adaptée à l'analyse de mesures répétées à des moments multiples et différents (Boisgontier & Cheval, 2016 ; Domenico & Benedetto, 2019).

package *lme4* (Bates et al., 2014). Cinq VD ont été sélectionnées : l'efficacité en lecture du test *L'Alouette*, l'efficacité en lecture du test *DeltaText*, le nombre de mots correctement lus au texte *Mouette/Pingouin*, le nombre de réponses correctes au test *L3-ORLEC* et le nombre d'erreurs au test *Chronosdictées*. Pour chacune de ces 5 VD, nous avons construit un modèle linéaire à effets mixtes (Baayen et al., 2008) contenant 2 facteurs à effets fixes (i.e., *Groupe* et *Temps*), leur interaction, la moyenne des performances aux Temps 1 et Temps 2 comme covariable, et un facteur aléatoire (i.e., *Participants*)¹¹. La moyenne des performances aux Temps 1 et Temps 2, calculée pour chaque sujet et chaque VD, est utilisée comme covariable afin de nous permettre de prendre en compte le niveau de l'individu lors de la phase contrôle pré-intervention sans entraînement. Les trois VD mesurant la lecture à voix haute d'un texte (*L'Alouette*, *DeltaText* et *Mouette/Pingouin*) sont analysées aux Temps 1, 2, 3, 4, 5 et 6. Les deux VD mesurant la compréhension écrite (*L3-ORLEC*) et l'orthographe (*Chronosdictées*) sont évaluées aux Temps 1, 2 et 5. Pour la VD mesurant l'orthographe (*Chronosdictées*), le modèle linéaire à effets mixtes est construit avec 3 facteurs à effets fixes (i.e., *Groupe*, *Temps*, *Type d'Erreurs*), leurs interactions, la moyenne des performances aux Temps 1 et 2 comme covariable, et un facteur aléatoire (i.e., *Participants*)¹². Le test de Rosner n'a identifié aucune valeur aberrante. Les résultats du test Shapiro-Wilk indiquent que les résidus des cinq VD ne sont pas normalement distribués ($p < .05$). Cependant, la distribution des résidus présente des coefficients d'asymétrie (*Skewness* : S) proches de 0, bien que les coefficients d'aplatissement (*Kurtosis* : K) soient davantage hétérogènes : *L'Alouette* (S = 0.16 ; K = 4.47) ; *DeltaText* (S = 0.14 ; K = 4.13), *Mouette-Pingouin* (S = 0.11 ; K = 0.96) ; *ORLEC-L3* (S = 0.2 ; K = 2.21) et *Chronosdictées* (S = 0.9 ; K = 7.6).

¹¹ VD ~ Groupe * Temps + μ (Temps 1, Temps 2) + (1|Participant)

¹² VD ~ Groupe * Temps * Type d'erreur + μ (Temps 1, Temps 2) + (1|Participant)

Puisque l'analyse repose sur un plan factoriel, les contrastes ont été évalués avec la méthode des "moyennes marginales estimées" (Searle et al., 1980) en utilisant les packages *emmeans* (Lenth, 2021) et *multcomp* (Hothorn et al., 2008). Cette méthode estime les moyennes marginales prédites par un modèle donné et procède à l'estimation de différents types de contrastes avec des ajustements de *Tukey*.

2.3. Résultats

Efficience en lecture de texte non signifiant DeltaText

Notre première interrogation était de savoir si l'intervention multimodale pouvait améliorer la précision et la vitesse de lecture d'un texte non signifiant. Nous avons choisi d'utiliser le test de lecture *DeltaText* afin d'éviter un éventuel effet de compensation de l'accès au sens et un éventuel effet *test-retest*.

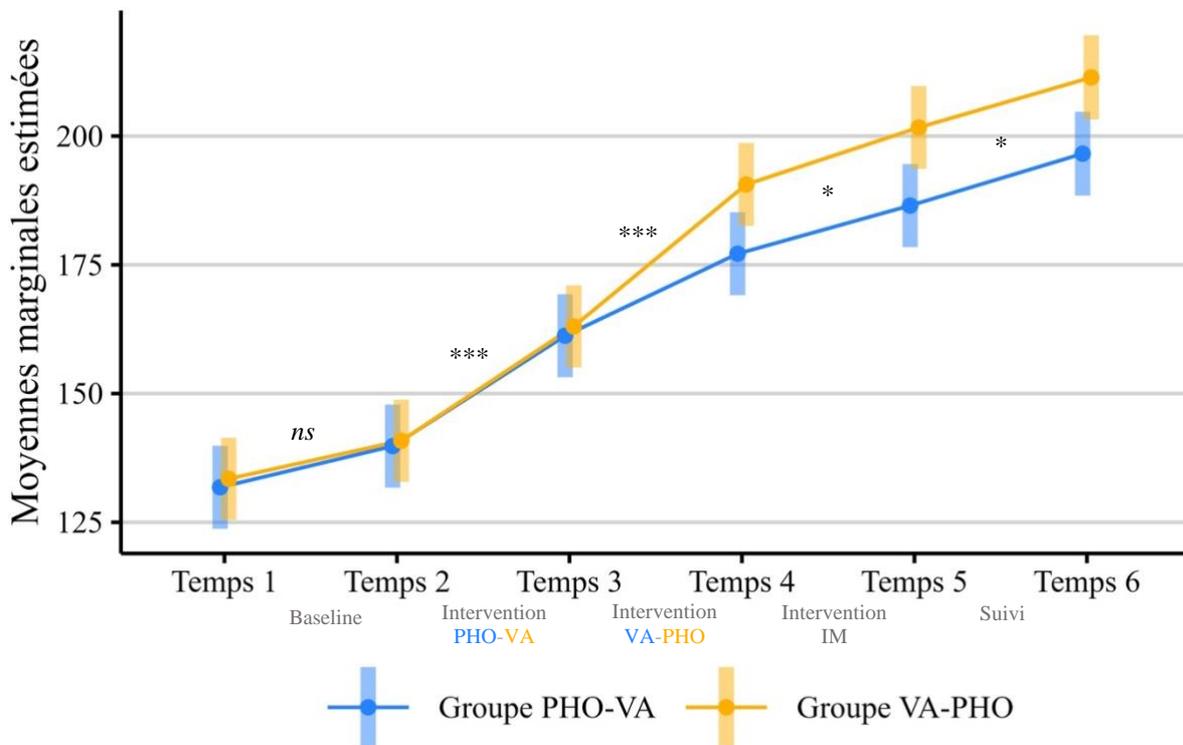
Les prédictions du modèle pour chaque groupe et à chaque Temps, sont présentées dans la Figure 5.7. L'analyse des scores d'efficience en lecture de texte montre que les participants des deux groupes (i.e., PHO-VA et VA-PHO) améliorent significativement leurs performances en lecture de façon progressive au cours de l'intervention ($F(5, 449) = 183.45, p < .001$). Comme attendu, les comparaisons post-hoc (cf. Tableau 5.7) indiquent que la lecture ne s'améliore pas significativement à l'issue de la période pré-intervention se déroulant du Temps 1 au Temps 2 (*estimation* = -7,69, *erreur standard* = 3,41, $t = -2.26, p = .21$), mais s'améliorent de façon significative à l'issue de chaque programme d'intervention intensive, du Temps 2 au Temps 3 (*estimation* = -21,83, *erreur standard* = 3,41, $t = -6.4, p < .001$), du Temps 3 au Temps 4 (*estimation* = -21,75, *erreur standard* = 3,42, $t = -6.36, p < .001$) et du Temps 4 au Temps 5 (*estimation* = -10,21, *erreur standard* = 3,43, $t = -2.86, p = .04$). Par ailleurs, l'efficience en

lecture continue à augmenter après l'arrêt des entraînements de façon significative, à l'issue de la période post-intervention du Temps 5 au Temps 6 ($\text{estimation} = -9.9$, $\text{erreur standard} = 3.46$, $t = -2.86$, $p = .05$).

L'analyse révèle également que le groupe VA-PHO obtient de meilleures performances que le groupe PHO-VA ($F(1, 90) = 4.54$, $p = .036$) et montre une interaction marginalement significative entre les facteurs *Temps* et *Groupe* ($F(5, 449) = 2.16$, $p = .057$).

Figure 5.7

Estimations du modèle concernant l'évolution de l'efficacité en lecture aux tests DeltaText



Note. Représentation des prédictions du modèle pour chaque groupe et à chaque Temps. La ligne bleue représente les moyennes marginales estimées du groupe PHO-VA. La ligne jaune représente les moyennes marginales estimées du groupe VA-PHO. Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95 %. Les étoiles représentent le niveau de significativité des effets simples du facteur *Temps* révélés par les analyses post-hoc (*** : $p < .001$; * : $p < .05$; ns : non significatif).

Tableau 5.7

Comparaisons post-hoc concernant l'effet principal de Temps sur l'efficience en lecture au test *DeltaText*.

Contrastes	Estimations	Erreurs standards	Valeurs de <i>t</i>	Valeurs de <i>p</i>	
T1 - T2	-7.69	3.41	-2.26	.21	
T2 - T3	-21.83	3.41	-6.40	<.001	***
T3 - T4	-21.75	3.42	-6.36	<.001	***
T4 - T5	-10.21	3.43	-2.98	.04	*
T5 - T6	-9.90	3.46	-2.86	.05	*

Note. * : $p < .05$; *** : $p < .001$

Efficience en lecture de texte non signifiant *L'Alouette*

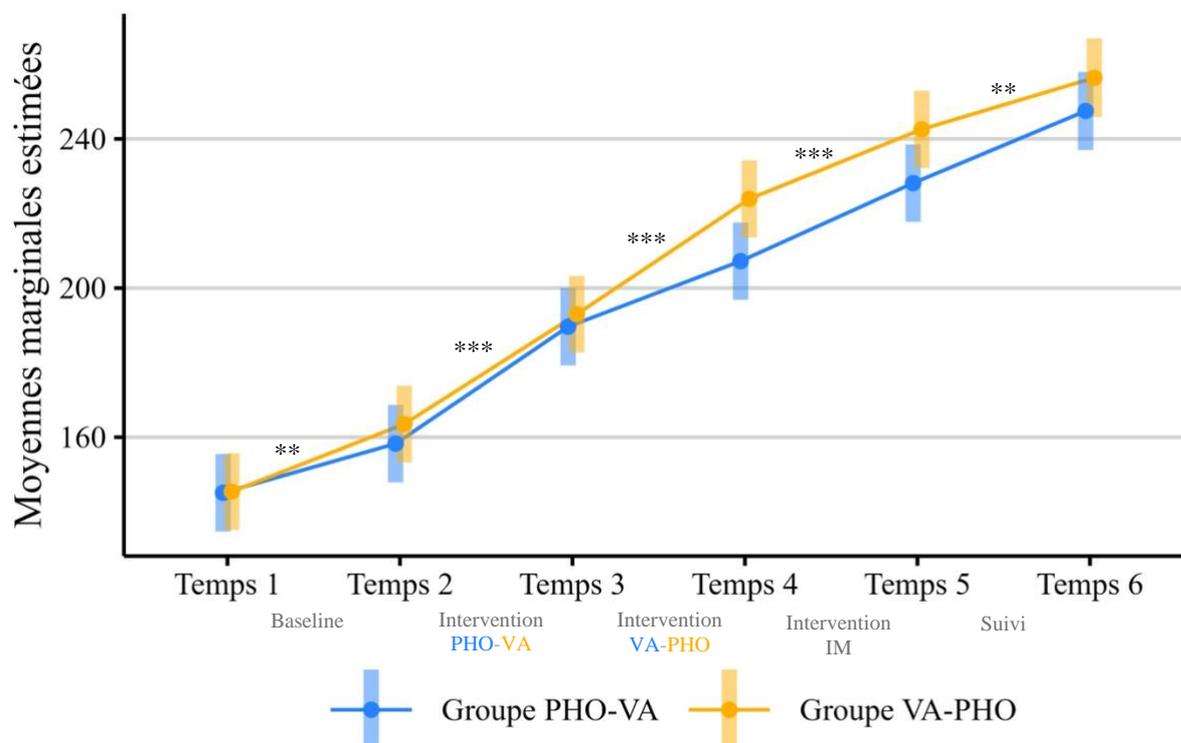
Pour évaluer la précision et la vitesse pour un texte non signifiant, la deuxième VD, choisie pour ses qualités psychométriques, est le test de *L'Alouette*. Les prédictions du modèle pour chaque groupe et à chaque Temps sont présentées dans la Figure 5.8. Comme pour l'analyse précédente, les résultats montrent que les participants des deux groupes améliorent leurs performances en lecture au cours de l'intervention et ce, de façon progressive et significative ($F(5, 449) = 183.45, p < .001$).

Comme attendu, nous observons un effet *retest* dû à l'utilisation du même texte aux Temps 1 et 2 (cf. Tableau 5.8) car le test de *L'Alouette* ne propose pas de version alternative. Pour *DeltaText*, cet effet n'était pas présent car nous avons quatre versions alternatives du même texte. Les comparaisons post-hoc présentées dans le Tableau 5.8 montrent, en outre, une amélioration significative de l'efficience en lecture tout au long de l'intervention et à l'issue de la période post-intervention ($ts < -3.6 ; ps < .01$). Autrement dit, les résultats mettent en évidence une amélioration significative de l'efficience en lecture à l'issue de chaque programme d'intervention PHO, VA et IM et cette amélioration se poursuit à l'issue de la période de suivi post-intervention alors que les entraînements intensifs ne sont plus effectués. Par ailleurs, cette

amélioration est homogène quel que soit l'ordre des interventions PHO et VA, le modèle ne révélant aucun effet significatif principal de *Groupe* ($F(1, 89) = 2.77, p = .099$), ou d'interaction entre *Temps* et *Groupe* ($F(5, 449) = 1.08, p = .36$).

Figure 5.8

Estimations du modèle concernant l'évolution de l'efficacité en lecture au test de L'Alouette



Note. Représentation des prédictions du modèle pour chaque groupe et à chaque Temps. La ligne bleue représente les moyennes marginales estimées du groupe PHO-VA. La ligne jaune représente les moyennes marginales estimées du groupe VA-PHO. Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95 %. Les étoiles représentent le niveau de significativité des effets simples du facteur *Temps* révélés par les analyses post-hoc (***) : $p < .001$; ** : $p < .01$).

Tableau 5.8

Comparaisons post-hoc concernant l'effet principal de Temps sur l'efficience en lecture au test L'Alouette.

Contrastes	Estimations	Erreurs standards	Valeurs de <i>t</i>	Valeurs de <i>p</i>	
T1 - T2	-15.64	4.33	-3.60	.005	**
T2 - T3	-30.41	4.33	-7.01	<.001	***
T3 - T4	-24.25	4.35	-5.57	<.001	***
T4 - T5	-19.79	4.36	-4.54	<.001	***
T5 - T6	-16.58	4.40	-3.76	.003	**

Note. ** : $p < .01$, *** : $p < .001$

Efficience en lecture d'un texte signifiant Mouette-Pingouin

Enfin, la troisième variable dépendante est le score d'efficience en lecture d'un texte signifiant, *Mouette-Pingouin*, choisi pour ses deux versions différentes *test-retest* et pour l'évaluation plus écologique d'une lecture signifiante. Les prédictions du modèle pour chaque groupe, à chacun des Temps, sont présentées dans la Figure 5.9 : l'analyse des scores d'efficience en lecture de textes *Mouette-Pingouin* montre que les participants des deux groupes améliorent de façon significative leurs performances en lecture tout au long de l'intervention et qu'ils lisent mieux à la fin de l'intervention qu'au début ($F(5, 449) = 185.23, p < .001$).

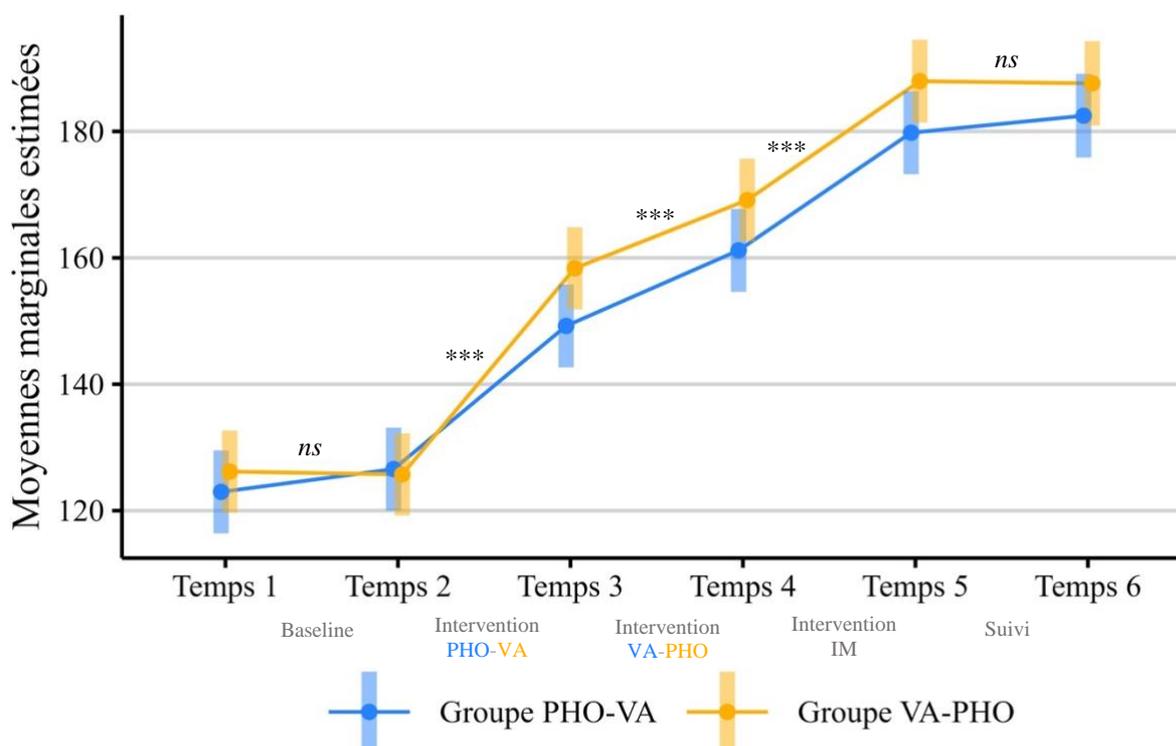
Fait intéressant, les comparaisons post-hoc (cf. Tableau 5.9) ne révèlent aucune amélioration significative des compétences en lecture entre les Temps 1 et 2 (*estimation* = -1.58, *erreur standard* = 2.76, $t = -0.57, p = .99$) ni entre les Temps 5 et 6 (*estimation* = -1.18, *erreur standard* = 2.8, $t = -0.42, p = .99$).

Comme attendu, les comparaisons post-hoc révèlent une amélioration des compétences en lecture significative pendant toute la période d'entraînements intensifs du Temps 2 au Temps 5, et ce, à l'issue de chaque programme d'intervention PHO, VA et IM ($ts < -4.1 ; ps < .001$). Enfin, l'ordre des entraînements n'a pas d'effet sur cette amélioration, homogène pour les deux

groupes PHO-VA et VA-PHO, l'effet principal de *Groupe* ($F(1, 90) = 3,15, p = .079$), et l'effet principal de l'interaction *Temps* et *Groupe* ($F(5, 449) = 0.93, p = .455$) n'étant pas significatifs.

Figure 5.9

Estimations du modèle concernant l'évolution de l'efficiencia en lecture au test Mouette-Pingouin



Note. Représentation des prédictions du modèle pour chaque groupe et à chaque Temps. La ligne bleue représente les moyennes marginales estimées du groupe PHO-VA. La ligne jaune représente les moyennes marginales estimées du groupe VA-PHO. Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95 %. Les étoiles représentent le niveau de significativité des effets simples du facteur *Temps* révélés par les analyses post-hoc (***) : $p < .001$; ns : non significatif).

Tableau 5.9

Comparaisons post-hoc concernant l'effet principal de Temps sur l'efficiencia en lecture au test Mouette-Pingouin

Contrastes	Estimations	Erreurs standards	Valeurs de t	Valeurs de p
T1 - T2	-1.58	2.76	-0.57	.993
T2 - T3	-27.63	2.76	-10	<.001 ***
T3 - T4	-11.37	2.77	-4.1	.001 ***
T4 - T5	-18.70	2.77	-6.74	<.001 ***
T5 - T6	-1.18	2.80	-0.42	.998

Note : *** : $p < .001$

Compréhension en lecture de phrases au test L3-ORLEC

Après avoir évalué les capacités d'identification des mots écrits par trois variables dépendantes mesurant l'efficacité en lecture de textes plus ou moins signifiants, nous voulions également évaluer la compréhension écrite afin de vérifier notre hypothèse selon laquelle une amélioration de l'efficacité en lecture à voix haute pouvait se généraliser à la compréhension en lecture. Les prédictions du modèle pour chaque groupe à chacun des Temps sont présentées dans la Figure 5.10. De manière globale et significative, les participants des deux groupes ont une meilleure compréhension de phrases lues à la fin de l'intervention multimodale qu'au début ($F(2, 179) = 196.22, p < .001$) et l'analyse révèle une interaction significative entre les facteurs *Temps* et *Groupe* ($F(2, 179) = 3.21, p = .042$). En revanche, le modèle ne révèle aucun effet principal significatif du facteur *Groupe* ($F(1, 89) = 2.82, p = .096$).

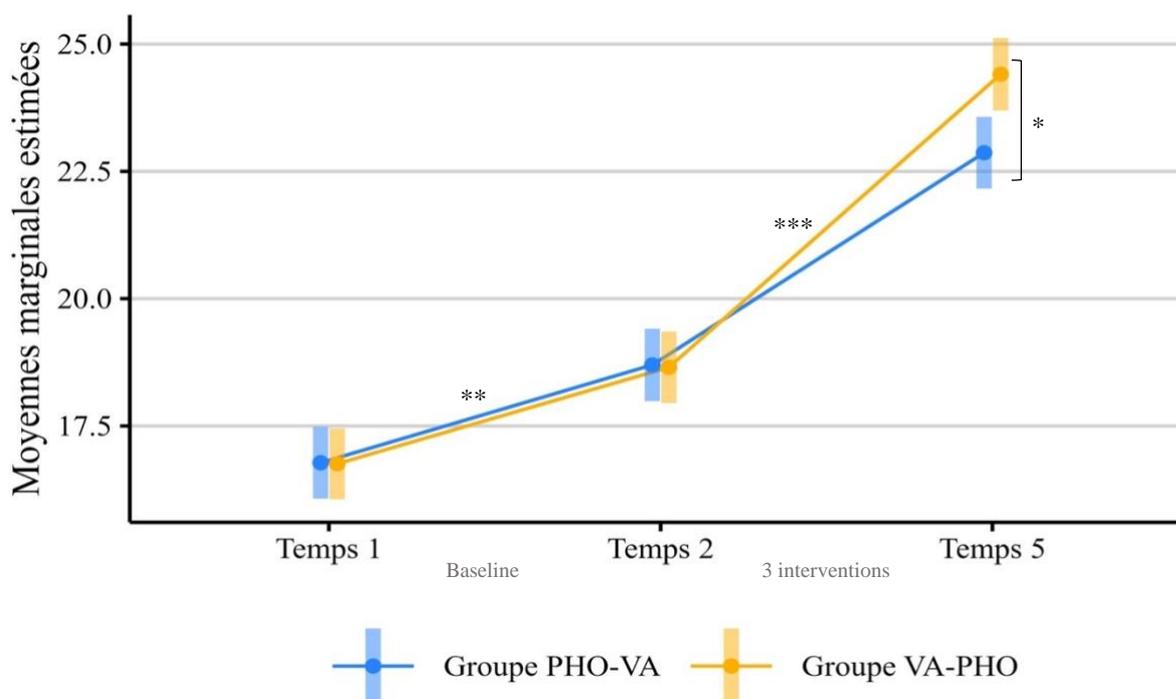
Les comparaisons post-hoc (Tableau 5.10) montrent que les participants du groupe VA-PHO ont des scores supérieurs en compréhension écrite par rapport aux participants du groupe PHO-VA à l'issue de l'intervention multimodale, entre les Temps 2 et 5 ($estimation = -1.54, erreur\ standard = 0.5, t = -3.03, p = .032$), alors que cette différence entre les groupes n'est pas significative entre les Temps 1 et 2 ($ts < 1$), ni dans les analyses précédentes. Cependant, malgré cette différence intergroupe, la compréhension écrite s'améliore de façon significative pour les 2 groupes, à l'issue du protocole d'intervention intensive multimodal au Temps 5 (groupe PHO-VA : $estimation = -4.16, erreur\ standard = 0.5, t = -3.78, p = .003$; groupe VA-PHO : $estimation = -5.75, erreur\ standard = 0.5, t = -11.32, p < .001$).

En revanche, sans doute parce que nous avons utilisé les mêmes phrases aux Temps 1, 2, et 5, les participants des 2 groupes améliorent significativement leurs performances en compréhension de lecture de phrases pendant la période contrôle pré-intervention du Temps 1

au Temps 2 (groupe PHO-VA : *estimation* = -1.92, *erreur standard* = 0.5, $t = -3.78$, $p = .003$; groupe VA-PHO : *estimation* = -1.89, *erreur standard* = 0.5, $t = -3.77$, $p = .003$).

Figure 5.10

Estimations du modèle concernant l'évolution de compréhension de phrases lues au test L3-ORLEC



Note. Représentation des prédictions du modèle pour chaque groupe et aux Temps 1, 2 et 5. La ligne bleue représente les moyennes marginales estimées du groupe PHO-VA. La ligne jaune représente les moyennes marginales estimées du groupe VA-PHO. Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95 %. Les étoiles représentent le niveau de significativité des effets simples du facteur *Temps* révélés par les analyses post-hoc (*** : $p < .001$; ** : $p < .01$; * : $p < .05$).

Tableau 5.10

Comparaisons post-hoc concernant l'effet d'interaction entre les facteurs Temps et Groupe sur l'efficacité en compréhension de phrases lues

Contrastes	Estimations	Erreurs standards	Valeurs de t	Valeurs de p
T1 PHO-VA - T2 PHO-VA	-1.92	0.5	-3.78	.003 **
T2 PHO-VA - T5 PHO-VA	-4.16	0.5	-8.2	<.001 ***
T1 VA-PHO - T2 VA-PHO	-1.89	0.5	-3.77	.003 **
T2 VA-PHO - T5 VA-PHO	-5.75	0.5	-11.32	<.001 ***
T1 PHO-VA - T1 VA-PHO	0.02	0.5	0.04	1
T2 PHO-VA - T2 VA-PHO	0.04	0.5	0.09	1
T5 PHO-VA - T5 VA-PHO	-1.54	0.5	-3.03	.032 *

Notes : *** : $p < .001$; ** : $p < .01$; * : $p < .05$

Compétences orthographiques au test Chronosdictées

Pour évaluer les compétences en orthographe, deux versions alternatives de dictées de phrases nous permet de mesurer le nombre d'erreurs d'orthographe et de les classer en trois types d'erreurs : phonologiques, lexicales et grammaticales. Les prédictions du modèle pour chaque groupe à chacun des Temps, et pour chaque type d'erreur à chacun des Temps sont présentées dans les Figures 5.11 et 5.12, respectivement. L'analyse révèle que, de manière générale, les enfants font significativement moins d'erreurs à la fin de l'intervention qu'au début ($F(2, 716) = 80,95, p < .001$). Par ailleurs, l'analyse révèle également des effets significatifs pour l'effet principal du facteur *Type d'Erreurs* ($F(2, 761) = 10.16, p < .001$), et les interactions entre les facteurs *Type d'Erreurs* et *Temps* ($F(4, 716) = 3.40, p < .05$) et entre les facteurs *Temps* et *Groupe* ($F(2, 716) = 3.40, p = .03$). En revanche, aucun effet significatif principal du facteur *Groupe*, d'interaction entre *Groupe* et *Type d'Erreurs*, ou entre *Groupe*, *Type d'Erreurs*, et *Temps* n'est mis en évidence ($F_s < 1$).

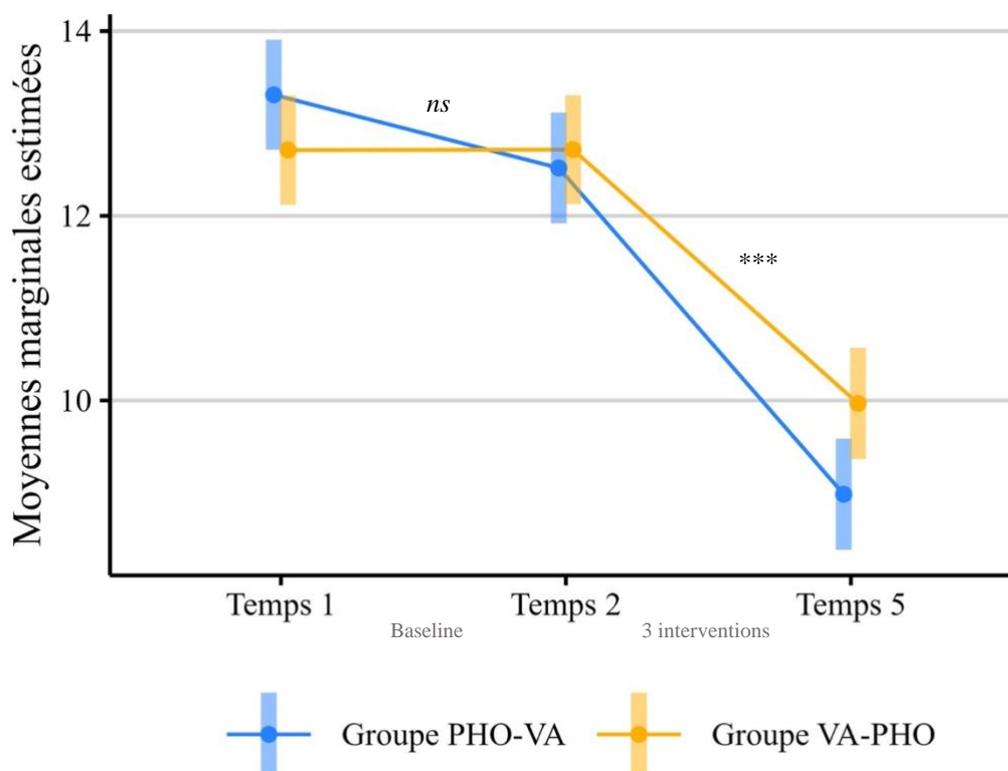
Les comparaisons post-hoc concernant l'interaction entre les facteurs *Temps* et *Groupe* (Tableau 5.12) montrent qu'après la période pré-intervention sans entraînement, le nombre d'erreurs d'orthographe ne diminue pas significativement pour les deux groupes ($t_s < 2, p_s > .4$). En revanche, le nombre total d'erreurs diminue significativement pour les deux groupes progressivement tout au long de l'intervention multimodale (groupe PHO-VA : *estimation* = 3.53, *erreur standard* = 0.43, $t = 8.18, p < .001$; groupe VA-PHO : *estimation* = 2.74, *erreur standard* = 0.42, $t = 6.42, p < .001$).

Les comparaisons post-hoc concernant l'interaction entre les facteurs *Temps* et *Type d'Erreur* (Tableau 5.13) montrent que, quel que soit le type d'erreur, les participants des deux groupes ne diminuent pas significativement le nombre d'erreurs d'orthographe à l'issue de la période pré-intervention ($t_s < 0,79, p_s \leq 1$). En revanche, quel que soit le type d'erreur, les

participants des deux groupes diminuent significativement le nombre d'erreurs d'orthographe à l'issue de la phase 2 au Temps 5 (erreurs grammaticales : *estimation* = 2.18, *erreur standard* = 0.52, $t = 4.15$, $p < .001$; erreurs lexicales : *estimation* = 3.96, *erreur standard* = 0.52, $t = 7.55$, $p < .001$; erreurs phonologiques : *estimation* = 3.26, *erreur standard* = 0.52, $t = 6.18$, $p < .001$). Fait intéressant, au Temps 5 les erreurs phonologiques et lexicales sont significativement moins nombreuses au Temps 5 que les erreurs grammaticales (erreurs phonologiques vs. erreurs grammaticales : *estimation* = 2.57, *erreur standard* = 0.56, $t = 4.52$, $p < .001$; erreurs lexicales vs. erreurs grammaticales : *estimation* = 2.24, *erreur standard* = 0.53, $t = 4.18$, $p < .001$) alors qu'au même Temps, aucune différence significative n'est observée entre le nombre d'erreurs lexicales et phonologiques au Temps 5 (*estimation* = 0.33, *erreur standard* = 0.54, $t = 0.61$, $p = 1$), ni entre les différents types d'erreurs au Temps 1 ou au Temps 2 ($ts \leq 2.6$, $ps > .17$).

Figure 5.13

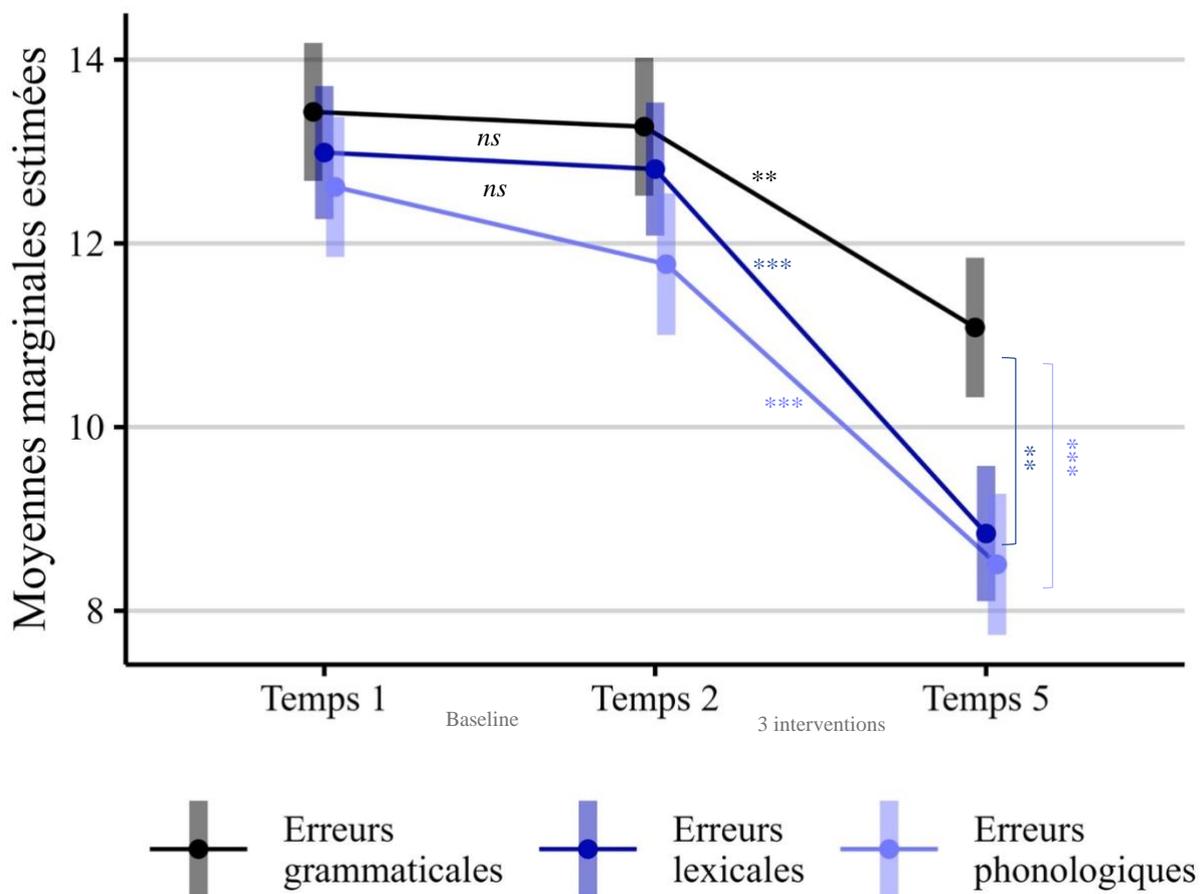
Estimations du modèle concernant l'évolution du nombre total d'erreurs en orthographe



Note. Représentation des prédictions du modèle pour le nombre total d'erreurs en orthographe dans chaque groupe aux Temps 1, 2 et 5. La ligne bleue représente les moyennes marginales estimées du groupe PHO-VA. La ligne jaune représente les moyennes marginales estimées du groupe VA-PHO. Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95 %. Les étoiles représentent le niveau de significativité des effets simples du facteur Temps révélés par les analyses post-hoc (***) : $p < .001$; ns : non significatif).

Figure 5.14

Estimations du modèle concernant l'évolution du nombre d'erreurs phonologiques, lexicales et grammaticales



Note. Représentation des prédictions du modèle pour le nombre d'erreurs phonologiques, lexicales et grammaticales dans chaque groupe aux Temps 1, 2 et 5. La ligne bleue représente les moyennes marginales estimées du groupe PHO-VA. La ligne jaune représente les moyennes marginales estimées du groupe VA-PHO. Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95 %. Les étoiles représentent le niveau de significativité des effets simples du facteur *Temps* révélés par les analyses post-hoc (*** : $p < .001$; ** : $p < .01$; *ns* : non significatif).

Tableau 5.12

Comparaisons post-hoc concernant les effets d'interaction entre les facteurs Temps et Groupe sur le nombre d'erreurs en orthographe

Contrastes	Estimations	Erreurs standards	Valeurs de t	Valeurs de p
T1 PHO-VA - T2 PHO-VA	0.79	0.43	1.84	.437
T2 PHO-VA - T5 PHO-VA	3.53	0.43	8.18	<.001 ***
T1 VA-PHO - T2 VA-PHO	-0.005	0.42	-0.01	1
T2 VA-PHO - T5 VA-PHO	2.74	0.42	6.42	<.001 ***
T1 PHO-VA - T1 VA-PHO	0.59	0.43	1.40	.728
T2 PHO-VA - T2 VA-PHO	-0.19	0.43	-0.46	.997
T5 PHO-VA - T5 VA-PHO	-0.98	0.43	-2.26	.209

Note : *** : $p < .001$

Tableau 5.13

Comparaisons post-hoc concernant les effets d'interaction entre les facteurs Temps et Types d'Erreurs sur le nombre d'erreurs en orthographe

Contrastes	Estimations	Erreurs standards	Valeurs de t	Valeurs de p
T1 Err gram - T1 Err lex	0.44	0.52	0.83	.996
T1 Err gram - T1 Err pho	0.81	0.56	1.44	.880
T1 Err lex - T1 Err phon	0.37	0.53	0.69	.999
T2 Err gram - T2 Err lex	0.46	0.52	0.87	.994
T2 Err gram - T2 Err pho	1.49	0.57	2.62	.178
T2 Err lex - T2 Err pho	1.03	0.54	1.91	.605
T5 Err gram - T5 Err lex	2.24	0.53	4.18	<.001 **
T5 Err gram - T5 Err phon	2.57	0.56	4.52	<.001 ***
T5 Err lex - T5 Err pho	0.33	0.54	0.61	1
T1 Err gram - T2 Err gram	0.16	0.52	0.3	1
T2 Err gram - T5 Err gram	2.18	0.52	4.15	<.001 **
T1 Err lex - T2 Err lex	0.17	0.52	0.34	1
T2 Err lex - T5 Err lex	3.96	0.52	7.55	<.001 ***
T1 Err pho - T2 Err pho	0.84	0.52	1.59	.804
T2 Err pho - T5 Err pho	3.26	0.52	6.18	<.001 ***

Note : *** : $p < .001$; ** : $p < .01$

2.4. Synthèse

Comme nous l'avons prédit, les compétences en lecture de textes à voix haute, en compréhension écrite de phrases et en dictées de phrases s'améliorent de façon significative tout au long de l'intervention multimodale et multi-componentielle, comparées à l'évolution de ces compétences pendant la période pré-intervention. Ces améliorations se maintiennent au moins deux mois après l'arrêt de l'intervention.

Concernant l'évolution des compétences en lecture et en orthographe pendant la période pré-intervention entre les Temps 1 et 2, et comme attendu, aucune amélioration significative n'est mise en évidence pour les variables, *DeltaText*, *Mouette-Pingouin* et *Chronosdictées*. Cependant, pendant cette même période, une amélioration significative est observée pour les variables *Alouette* et *L3-ORLEC*. Cette différence entre les variables pourrait s'expliquer par le fait que, contrairement aux 3 autres, les tests *Alouette* et *L3-ORLEC* ne proposent pas de versions alternatives, augmentant ainsi les chances d'observer un effet *retest* qui serait dû à des effets de mémoire ou d'habituation plutôt qu'à une amélioration effective des compétences testées. Rappelons que les versions alternatives d'un même test sont recommandées pour réduire les effets *retests* (e.g., Arendsay & Sommer, 2017), et que ces effets sont particulièrement élevés à la deuxième passation (voir la méta-analyse de Scharfen et al., 2018 et discussion générale).

Concernant l'évolution des compétences en lecture et en orthographe entre les Temps 2 et 5, tout au long du protocole de remédiation (i.e., du Temps 2 au Temps 5), les analyses révèlent une amélioration significative est relevée pour toutes les variables mesurées. Fait intéressant, l'efficacité en lecture (*L'Alouette*, *DeltaText* et *Mouette-Pingouin*) est significative à l'issue de chaque programme d'intervention quel que soit l'ordre d'exécution des entraînements : du Temps 2 au Temps 3 pour la première intervention PHO ou VA, du Temps

3 au Temps 4 pour la deuxième intervention VA ou PHO et du Temps 4 au Temps 5 pour la troisième intervention IM.

Toutefois, soulignons que les compétences en compréhension de lecture à l'issue de l'intervention au Temps 5 sont plus élevées pour le groupe VA-PHO, que pour le groupe PHO-VA. Cette différence ne peut pas s'expliquer par les compétences initiales en compréhension écrite qui sont similaires entre les deux groupes (cf. Tableau 5.1). Une hypothèse que nous pouvons avancer, avec prudence, serait que l'intervention VA favoriserait plus rapidement un recodage lexical et par conséquent un accès sémantique plus rapide.

Concernant l'évolution des compétences en orthographe, l'analyse du type d'erreurs met en évidence une diminution significative des erreurs phonologiques et lexicales plus prononcée que la diminution des erreurs de type grammatical, pour les deux groupes. Ici, l'interprétation est évidente dans la mesure où les deux premiers programmes d'intervention PHO et VA ciblaient les processus cognitifs phonologiques et visuo-attentionnels, ainsi que les procédures de lecture et de transcription sublexicale et lexicale au niveau des mots, sans sollicitation des processus de traitement syntaxico-sémantique au niveau de la phrase. Cependant, le troisième programme d'intervention IM ciblant l'intégration audio-visuelle de phonèmes, de syllabes, de mots mais aussi de phrases, donc des processus de traitement syntaxico-sémantique, pourrait tout à fait induire une amélioration de l'orthographe grammaticale. Une autre explication serait que l'amélioration de l'orthographe phonologique et lexicale pourrait aussi induire un effet de généralisation sur l'orthographe grammaticale. En effet, une amélioration du codage phono-graphémique et une meilleure disponibilité lexicale permettraient de libérer des ressources attentionnelles pour contrôler les erreurs grammaticales comme le respect des accords et des marques de conjugaison.

Concernant l'évolution de l'efficacité en lecture pendant la période post-intervention, entre les Temps 5 et 6, nous constatons un maintien et une amélioration des performances après

l'arrêt des entraînements, significative pour l'efficacité en lecture d'un texte non signifiant (*DeltaText, L'Alouette*) mais non significative pour l'efficacité en lecture d'un texte signifiant (*Mouette-Pingouin*). D'après le modèle *Simple View of Reading*, les lecteurs experts n'ont pas recours au contexte pour lire, contrairement aux lecteurs dyslexiques qui s'appuient sur le contexte pour compenser le déficit d'identification des mots écrits (Gough & Tunmer, 1986). Par conséquent, l'amélioration de la lecture de textes non signifiants après l'arrêt de l'intervention, montrerait que l'identification des mots étant plus précise, une diminution du recours au contexte signifiant comme moyen de compensation habituellement nécessaire aux LD n'est plus nécessaire.

3. Comparaisons des gains en lecture et en orthographe

3.1. Objectifs et hypothèses

Après avoir comparé l'évolution des capacités en lecture et en orthographe tout au long de l'intervention, il nous a paru intéressant de comparer les gains en lecture, en compréhension de lecture et en orthographe à l'issue de chaque programme d'intervention PHO, VA et IM et le gain total des trois programmes d'interventions (PHO + VA + IM) par rapport à la période pré-intervention sans entraînements intensifs (ou *Ligne de base Pré-intervention*). Chaque intervention devrait générer des gains qui se cumuleraient après les trois programmes d'intervention. Lors de la lecture d'un texte non signifiant, les gains attendus devraient être moins élevés que pour la lecture signifiante, et tout particulièrement pour la VD mesurant le score d'efficacité au test de *L'Alouette* pour lequel un possible effet *retest* a été observé au Temps 2 (cf. Tableau 5.8). Les gains en orthographe phonologique et lexicale devraient être

plus élevés que ceux en orthographe grammaticale. Les gains en compréhension écrite devraient être moins élevés en raison d'un potentiel effet *retest* au Temps 2 (cf. analyses précédentes).

3.2. Analyses statistiques

La taille du gain en lecture et en orthographe pour chaque intervention et le gain total à l'issue des trois interventions sont comparés à la taille du gain de la *Ligne de base Pré-intervention*, pour chaque variable dépendante : *L'Alouette*, *DeltaText*, *Mouette/Pingouin*, *Chronosdictées*, *L3-ORLEC*. Chaque taille de gain est calculée comme suit :

$$\frac{\text{Temps } y - \text{Temps } x}{\sigma (\text{Temps } x, \text{Temps } y)}$$

La taille de gain de la *Ligne de base Pré-intervention* est calculée à partir des temps 1 et 2. La taille de gain totale à l'issue des 3 interventions (i.e., PHO + VA + IM) est calculée à partir des temps 2 et 5. La taille du gain induit par le programme d'intervention PHO est calculée à partir des Temps 2 et 3 pour le groupe PHO-VA, et à partir des Temps 3 et 4 pour le groupe VA-PHO. La taille du gain induit par le programme d'intervention VA est calculée à partir des Temps 3 et 4 pour le groupe PHO-VA, et à partir des Temps 2 et 3 pour le groupe VA-PHO. Enfin, le calcul des gains induit par le programme d'intervention IM implique les Temps 4 et 5.

Les tailles des gains respectifs à l'issue de chaque programme d'intervention PHO, VA et IM et à l'issue du protocole de remédiation (PHO+VA+IM) ont été comparées par des tests *t de Student* pour échantillons appariés, avec correction de *Bonferroni*. La taille de l'effet est calculée par le *d* de Cohen¹³. Le calcul des *t-test* et des *d* de Cohen est effectué avec le package *rstatix* (Kassambara, 2021).

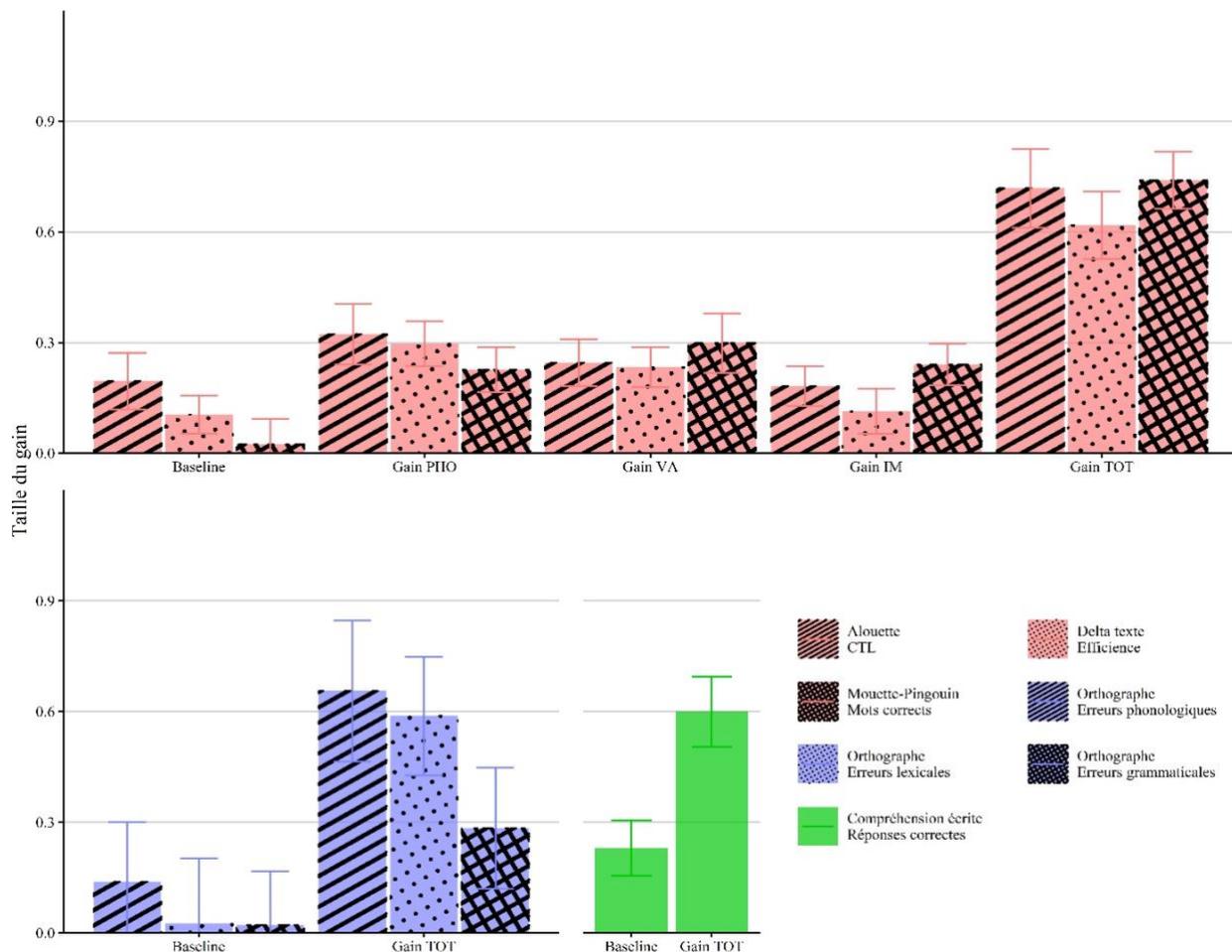
¹³ La taille de l'effet est petite pour les valeurs autour de 0.2, moyenne pour les valeurs autour de 0.5 et grande pour les valeurs autour de 0.8 (J. Cohen, 1988).

3.3. Résultats

La figure 5.15 illustre la taille moyenne des gains obtenus en lecture de textes, en orthographe, et en compréhension écrite. Les tableaux 5.13 a et b résument les tailles d'effets obtenues pour chaque compétence et à chaque intervention par rapport à la *Ligne de base Pré-intervention*. Les performances en orthographe et compréhension écrite ont été mesurées seulement au Temps 5, à l'issue du protocole de remédiation. Ainsi, la taille du gain pour ces performances n'a pas pu être calculée pour chaque programme d'intervention PHO, VA et IM.

Figure 5.15

Gains en efficacité de lecture, en compréhension de lecture et en orthographe



Note. Les gains à l'issue de chaque intervention et à l'issue de l'intervention totale, par rapport à la *Ligne de base Pré-intervention* sont indiqués pour les 3 variables mesurant l'efficacité en lecture (Alouette CTL, DeltaText efficacité et Mouette- Pingouin mots corrects), pour les 3 variables mesurant les compétences en orthographe (erreurs phonologiques, lexicales et grammaticales) et pour la variable mesurant la compréhension de lecture de phrases. *Ligne de base Pré-intervention* : gains entre T1 et T2 ; Gain PHO : gains obtenus à l'issue de l'intervention phonologique ; Gain VA : gains obtenus à l'issue de l'intervention visuo-attentionnelle ; Gain IM : gains obtenus à l'issue de l'intervention intermodalitaire ; Gain TOT : gains obtenus à l'issue des trois interventions (PHO + VA + IM). Les barres d'erreurs représentent les déviations standards.

Gains en efficacité de lecture de texte

DeltaText : la comparaison de gains entre la *Ligne de base Pré-intervention* et le protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle (i.e., PHO + VA + IM) met en évidence une amélioration significative des compétences en lecture et une grande taille d'effet

($t = -9.36$, $p < .001$, $d = 1.45$). La comparaison des gains entre cette *Ligne de base* et chaque programme d'intervention PHO, VA et IM, montre que les compétences en lecture s'améliorent significativement à l'issue du programme d'intervention PHO ($t = -4.76$, $p < .001$, $d = 0.69$) et à l'issue du programme d'intervention VA ($t = -2.95$, $p = .04$, $d = 0.5$). En revanche, la taille du gain obtenu en lecture à l'issue du programme d'intervention IM n'est pas significativement plus importante que le gain observé en *Ligne de base Pré-intervention* ($t = -0.36$, $p = 1$, $d = 0.03$).

L'Alouette : la comparaison des gains entre la *Ligne de base Pré-intervention* et le protocole de remédiation (i.e., PHO + VA + IM) met en évidence une amélioration significative des compétences en lecture ($t = -8.24$, $p < .001$, $d = 1.35$). La comparaison des gains entre cette *Ligne de base* et chaque programme d'intervention PHO, VA et IM montrent que les compétences en lecture ne s'améliorent pas significativement à l'issue du programme d'intervention PHO ($t = -2.85$, $p = .054$, $d = 0.42$), ni à l'issue du programme d'intervention VA ($t = -0.97$, $p = 1$, $d = 0.14$) ou IM ($t = -0.15$, $p = 1$, $d = 0.04$). Ces résultats s'expliqueraient par la présence d'un effet *retest* à la deuxième passation (Temps 2) mis en évidence dans les analyses précédentes.

Mouette-Pingouin : la comparaison des gains entre la *Ligne de base Pré-intervention* et protocole de remédiation (i.e., PHO + VA + IM) met en évidence une amélioration significative des compétences en lecture et une très grande taille d'effet ($t = -13.4$, $p < .001$, $d = 2.3$). Les comparaisons de gains entre la *Ligne de base Pré-intervention* et chaque programme d'intervention montrent des gains en lecture significativement plus élevés à l'issue des programmes d'intervention PHO ($t = -4.64$, $p < .001$, $d = 0.63$), VA ($t = -4.2$, $p < .001$, $d = 0.75$) et IM ($t = -5.01$, $p < .001$, $d = 0.7$) en comparaison des gains obtenus pendant la *Ligne de base Pré-intervention*.

Gains en compréhension de lecture

Les comparaisons de gains entre la *Ligne de base Pré-intervention* et le protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle montrent une amélioration significative des gains totaux en compréhension de lecture ($t = -5.19, p < .001, d = 0.9$).

Gains en orthographe

Les comparaisons de gains entre la *Ligne de base Pré-intervention* et le protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle montrent une diminution significative des erreurs phonologiques ($t = 3.22, p = .002, d = 0.6$), lexicales ($t = 3.89, p < .001, d = 0.69$) et grammaticales ($t = 2.15, p = .03, d = 0.34$). Le gain total en orthographe montre une diminution significative des erreurs ($t = 4.57, p < .001, d = 0.78$).

Tableau 5.13

(a) Tailles d'effet des gains en efficacité en lecture à chaque intervention (d de Cohen)

Tests	Intervention PHO	Intervention VA	Intervention IM	Intervention PHO+VA+ IM
<i>DeltaText</i> 1, 2, 3, 4 (textes non significatifs)	0.69***	0.5*	0.03	1.45***
<i>L'Alouette</i> (texte non significatif)	0.42*	0.14	0.04	1.35***
<i>Mouette/Pingouin</i> (textes significatifs)	0.63***	0.75***	0.7***	2.3***

Note. d de Cohen : la taille de l'effet est petite pour les valeurs autour de 0.2, moyenne pour les valeurs autour de 0.5 et grande pour les valeurs autour de 0.8 (Cohen, 1988); *** $p < .001$; * $p < .05$

(b) Tailles d'effet des gains pour chaque compétence et chaque intervention (*d* de Cohen)

Tests	Intervention PHO + VA + IM
Compréhension en lecture <i>L3-ORLEC</i>	0.9***
Orthographe, erreurs phonologiques <i>Chronosdictées</i>	0.6**
Orthographe, erreurs lexicales <i>Chronosdictées</i>	0.69***
Orthographe, erreurs grammaticales <i>Chronosdictées</i>	0.34*
Orthographe gain total <i>Chronosdictées</i>	0.78***

Note. *d* de Cohen : la taille de l'effet est petite pour les valeurs autour de 0.2, moyenne pour les valeurs autour de 0.5 et grande pour les valeurs autour de 0.8 (Cohen, 1988); *** $p < .001$; ** $p < .01$; * $p < .05$

3.4. Synthèse

Comme attendu, le protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle a permis des gains significatifs en lecture non signifiante, en lecture signifiante, en orthographe et en compréhension écrite. Même si nous avons prévu des gains élevés en lecture signifiante, nous n'avons cependant pas prévu une taille d'effet aussi élevée ($d = 2.3$). De plus, il faut souligner, d'une part, que ces gains sont présents pour toutes les variables mesurées et d'autre part, que chaque programme d'intervention PHO, VA et IM, a permis respectivement des gains significatifs en lecture de texte signifiant.

Toutefois, le résultat le plus surprenant est sans doute la taille d'effet calculée sur les gains en lecture non signifiante ($d = 1.45$). En effet, le niveau de lecture d'un texte non signifiant est une mesure dont l'évolution est très lente chez les LD, voire nulle. Même lorsque la lecture signifiante s'améliore, la lecture non signifiante reste souvent très altérée jusqu'à l'âge adulte, et cela même pour les LD adultes engagés dans un cursus universitaire (Cavalli et al., 2018). Une hypothèse explicative serait que notre protocole de remédiation, caractérisé par une

approche curative, intensive et multimodale ciblée sur les processus cognitifs sous-jacents individuels à la fois phonologiques, visuo-attentionnels et intermodalitaire, aurait possiblement induit une amélioration structurelle et irréversible des procédures de lecture, c'est-à-dire sans recours à des mécanismes de compensation. Une amélioration significative de la lecture de mots réguliers, irréguliers et de pseudomots pourraient confirmer cette hypothèse. Outre la spécificité, la multimodalité et la multi-componentialité des entraînements, il est aussi probable que la quantité élevée et la durée des entraînements (30 heures au total pendant 6 mois) aient pu améliorer les compétences en lecture. D'après la méta-analyse de Galuschka (2014), les interventions avec de petites quantités d'entraînement ou de courte durée sont moins efficaces. Une durée de 10 à 20 minutes par jour, à une fréquence entre 3 à 5 fois par semaine, pendant un minimum de trois semaines, est recommandée pour augmenter l'efficacité d'un entraînement (Ehri et al., 2001; Melby-Lervåg et al., 2012; Suggate, 2016; Wanzek et al., 2016).

Un autre résultat pouvant paraître surprenant est la taille d'effet des gains en compréhension de lecture ($d= 0.9$), d'autant qu'aucun entraînement spécifique n'a été proposé pour la renforcer. Toutefois, ces gains sont en parfaite adéquation avec l'amélioration spectaculaire de la lecture dans la mesure où une lecture plus précise et plus rapide favorise une meilleure compréhension de la lecture et inversement une lecture altérée entraîne des répercussions sur la compréhension écrite puisque notre échantillon représente des LD qui, par définition, n'ont pas de troubles du langage oral (Gough & Tunmer, 1986).

Enfin, outre la généralisation des gains en compréhension de lecture, les résultats mettent en évidence une généralisation sur des gains en orthographe ($d= 0.78$). Comme attendu, alors que les tailles d'effet sont modérées pour les mesures d'orthographe lexicale ($d= 0.69$) et phonologique ($d= 0.6$), elles sont plus petites pour les mesures d'orthographe grammaticale ($d= 0.34$). Comme énoncé dans la synthèse précédente (section 2.4, p.39), ces résultats pourraient s'expliquer par la spécificité des programmes d'intervention PHO, VA et IM, dans

la mesure où les procédures de lecture et de transcription ainsi que leurs processus cognitifs sous-jacents sollicités par les entraînements sont principalement axés sur le décodage phonologique, le recodage lexical, et les processus phonologiques, visuo-attentionnels et intermodalitaire. De plus, il est attendu que l'orthographe grammaticale s'améliore secondairement à une réduction des erreurs phonologiques et lexicales. En améliorant l'orthographe phonologique et lexicale, l'attention qui était portée sur la production écrite phonologique et lexicale peut être allouée à l'application des règles d'orthographe grammaticale. Par conséquent, l'orthographe grammaticale peut être automatisée. Soulignons que l'impact des effets *retest* dus aux mesures répétées peut biaiser l'interprétation des résultats. Cette limite sera discutée dans la discussion générale, section 7.

4. Effets respectifs des interventions phonologique et visuo-attentionnelle

4.1. Objectif et hypothèse

Ici, nous cherchons à déterminer si les effets respectifs des interventions PHO et VA sont spécifiques, autrement dit à évaluer l'efficacité respective de chacune sur l'amélioration des processus phonologiques et visuo-attentionnels après chaque intervention par rapport à la *Ligne de base Pré-entraînement*. Pour ce faire, nous nous sommes interrogés sur la sélection des variables phonologiques et visuo-attentionnelles qui expliquent le maximum de la variance dans chacun de ces domaines de compétence. Nous nous attendons à un effet spécifique du programme d'intervention PHO sur les processus phonologiques et du programme d'intervention VA sur les processus visuo-attentionnels.

4.2. Analyses statistiques

Dans un premier temps, afin de sélectionner les variables qui expliquent le mieux la variance des données au sein de chaque domaine de compétence (i.e., phonologique et visuo-attentionnel), nous avons réalisé deux analyses en composantes principales (ACP), l'une sur les variables phonologiques (sauf la DRA) et l'autre sur toutes les variables visuo-attentionnelles. La première ACP est effectuée sur cinq mesures des processus phonologiques : l'efficacité de suppression de la première syllabe d'un pseudomot (1 donnée aberrante supprimée ; ci-après le nombre de données aberrantes sera signalé entre parenthèses le cas échéant), l'efficacité de suppression du premier phonème dans une syllabe simple ($n = 1$), l'efficacité de suppression du premier phonème dans une syllabe complexe, l'empan phonologique et le temps de réponse dans la tâche de répétition de pseudomots ($n = 17$). La deuxième ACP est effectuée sur huit mesures des processus visuo-attentionnels : l'empan visuo-attentionnel en report global et en report partiel ($n = 6$), le nombre de réponses correctes en report global ($n = 1$) et en report partiel ($n = 1$) ; l'interférence issue du local en taux d'erreurs et en temps de réponse ($n = 29$) ; l'interférence issue du global en taux d'erreurs et en temps de réponse ($n = 27$). Les ACP ont été effectuées avec les packages *FactoMineR* (Lê et al., 2008) et *Factoextra* (Kassambara & Mundt, 2021). Les ACP incluent toutes les mesures prises aux Temps 1, 2, 3 et 5. Les distributions n'étant pas normales, les données ont été centrées-réduites et les valeurs manquantes ont été remplacées par la moyenne de la variable dépendante.

Dans un deuxième temps, afin d'évaluer l'évolution des processus phonologiques et visuo-attentionnels au cours du protocole de remédiation multimodale et multi-componentiel, nous avons extrait la première dimension de chacune des ACP et l'avons analysée via des modèles linéaires à effets mixtes (Baayen et al., 2008) contenant 2 facteurs à effets fixes (i.e.,

Groupe et Temps), leur interaction et un facteur à effets aléatoires (i.e., *Participants*)¹⁴. Ces analyses ont inclus les données au Temps 2 avant l'intervention multimodale, au Temps 3 après la première intervention soit phonologique pour le groupe PHO-VA, soit visuo-attentionnelle pour le groupe VA-PHO et au Temps 5 à la fin de l'intervention multimodale.

Cette fois encore, puisque l'analyse repose sur un plan factoriel, les contrastes ont été évalués avec la méthode des "moyennes marginales estimées" (Searle et al., 1980) en utilisant les packages *emmeans* (Lenth, 2021) et *multcomp* (Hothorn, et al. 2008). Cette méthode estime les moyennes marginales prédites par un modèle donné et procède à l'estimation de différents types de contrastes avec des ajustements de *Tukey*.

4.3. Résultats

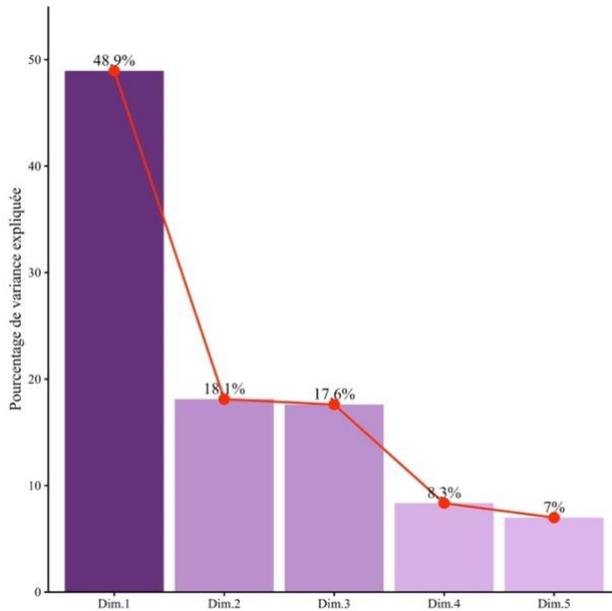
Processus phonologiques

Comme on peut le voir dans la figure 5.16, la première dimension de l'ACP examinant la contribution des variables phonologiques explique 48.9 % de la variance totale. Cette dimension a capturé la variance des tâches de conscience phonologique à 84 % avec des contributions respectives de 27.7 % pour l'efficacité de suppression de la première syllabe d'un pseudomot, de 29.1 % pour l'efficacité de suppression du premier phonème dans une syllabe simple et 27.1 % pour l'efficacité de suppression du premier phonème dans une syllabe complexe (Figure 5.17). Nous nommons cette dimension Conscience Phonologique.

¹⁴ Dim.1 ~ Groupe * Temps + (1|Participant)

Figure 5.16

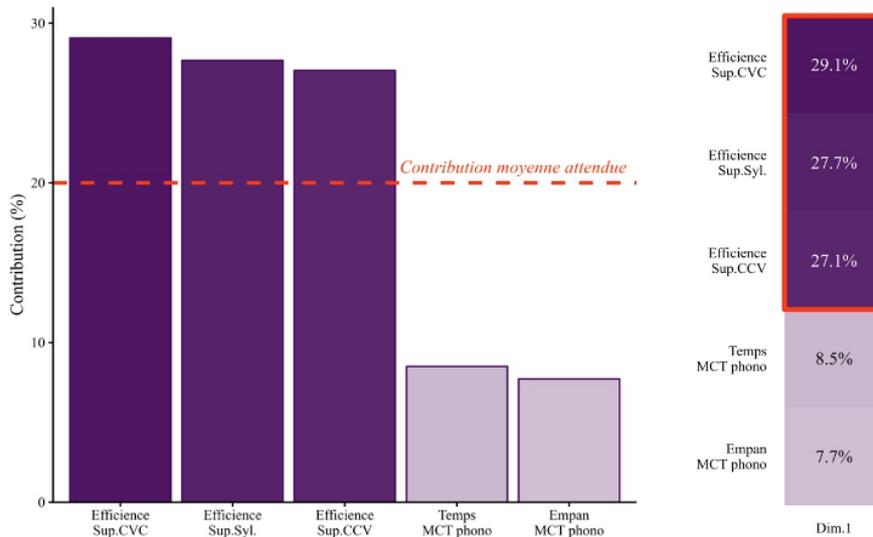
Analyses en composantes principales des variables phonologiques



Note. Les points rouges représentent les pourcentages de la variance expliquée par chaque dimension. L'intensité de la couleur illustre l'intensité de la variance expliquée par chaque dimension.

Figure 5.17

Dimension Conscience Phonologique

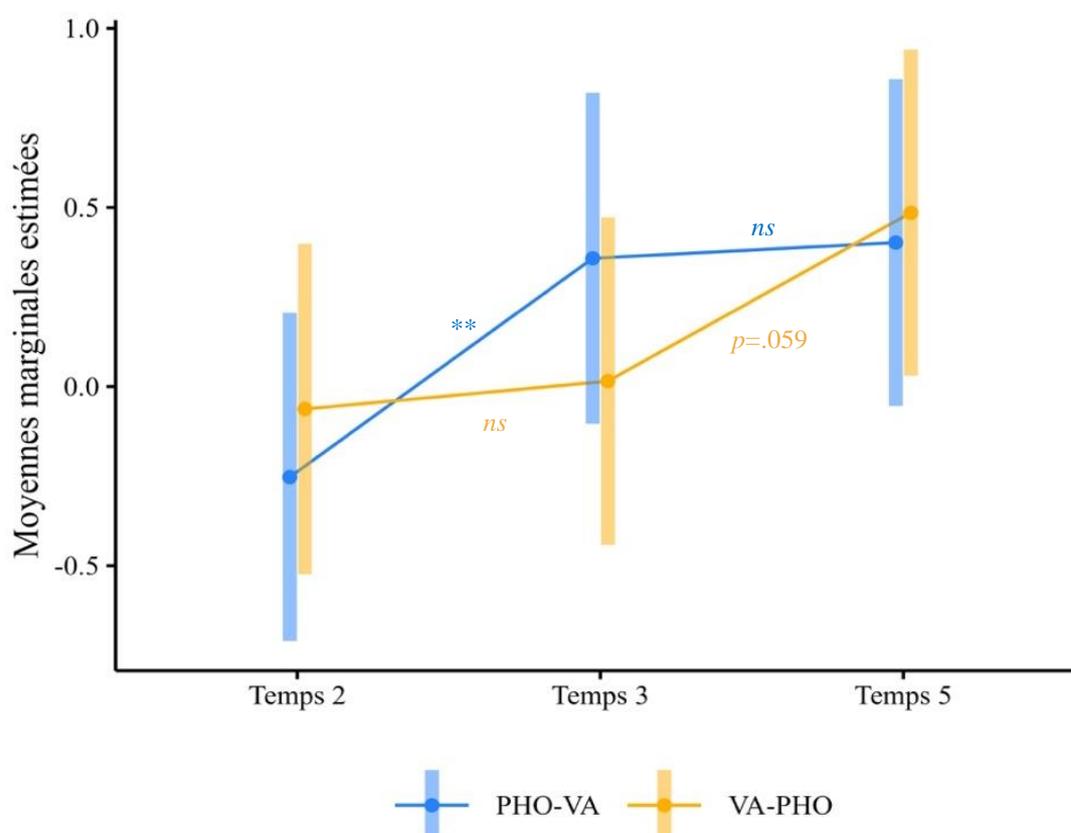


Note. Efficience SupCVC : efficience de suppression de phonème dans une syllabe simple ; Efficience Sup Syl : efficience de suppression de syllabes ; Efficience SupCCV : efficience de suppression de phonème dans une syllabe complexe ; Temps MCTphono : mémoire phonologique à court terme ; Empan MCTphono : empan phonologique. *Notes.* Empan global : empan visuo-attentionnel en report global ; Empan partiel : empan visuo-attentionnel en report partiel ; Interf.Glob : interférence issue du global ; Interf.Loc : interférence issue du local. L'intensité des couleurs est proportionnelle à l'intensité de la contribution de chaque variable. La barre horizontale rouge en pointillés représente la contribution moyenne attendue. Les trois variables entourées en rouge dans le panel de droite contribuent le plus à la dimension retenue (dimension 1 de la figure 5.17).

Les prédictions du modèle linéaire à effets mixtes pour chaque groupe et à chaque Temps sont présentées dans la Figure 5.19. L'analyse de la *dimension Conscience Phonologique* révèle un effet principal significatif du facteur Temps ($F(2, 164) = 12.48, p < .001$), mais pas d'effet principal significatif du facteur Groupe ($F(1, 90) = 0.006, p = .93$). L'interaction entre ces deux facteurs est marginale $F(2, 164) = 2.67, p = .072$). Comme attendu, les comparaisons post-hoc (cf. Tableau 5.14) montrent que les performances en conscience phonologique du groupe PHO-VA sont significativement plus élevées au Temps 3 qu'au Temps 2 (*estimation* = -0.61, *erreur standard* = 0.17, $t = -3.56, p = .005$). En revanche, aucune amélioration n'est observée entre les Temps 3 et 5 (*estimation* = -0.08, *erreur standard* = 0.17, $t = -0.26, p = .99$). De manière intéressante et comme attendu, on observe le pattern de résultats inverse pour le groupe VA-PHO : aucune différence significative entre les Temps 2 et 3 (*estimation* = -0.07, *erreur standard* = 0.17, $t = -0.44, p = .90$) et amélioration marginalement significative de la conscience phonologique au Temps 5 par rapport au Temps 3 (*estimation* = -0.47, *erreur standard* = 0.17, $t = -2.75, p = .059$). Soulignons que les performances des deux groupes en conscience phonologique ne sont pas significativement différentes, et ce, aux trois Temps examinés (tous les $ps > .88$).

Figure 5.19

Évolution des compétences en Conscience Phonologique pour chacun des deux groupes.



Note. Représentation des prédictions du modèle pour chaque groupe aux Temps 2, 3 et 5. La ligne bleue représente les moyennes marginales estimées du groupe PHO-VA. La ligne jaune représente les moyennes marginales estimées du groupe VA-PHO. Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95 %. Les étoiles représentent le niveau de significativité des effets simples de Temps révélés par les analyses post-hoc (** : $p < .01$; ns : non significatif).

Tableau 5.14

Comparaisons post-hoc de la dimension Conscience Phonologique concernant l'effet de l'interaction entre les facteurs Temps et Groupe

Contrastes	Estimation	Erreurs standards	Valeurs de t	Valeur de p
T2 PHO-VA -T3 PHO-VA	-0.61	0.17	-3.56	0.005 **
T3 PHO-VA -T5 PHO-VA	-0.04	0.16	-0.26	0.99
T2 VA-PHO -T3 VA-PHO	-0.078	0.17	-0.44	0.99
T3 VA-PHO -T5 VA-PHO	-0.47	0.17	-2.75	0.059 °
T2 PHO-VA -T2 VA-PHO	-0.18	0.32	-0.57	0.99
T3 PHO-VA -T3 VA-PHO	0.34	0.32	1.04	0.88
T5 PHO-VA -T5 VA-PHO	-0.08	0.32	-0.25	0.99

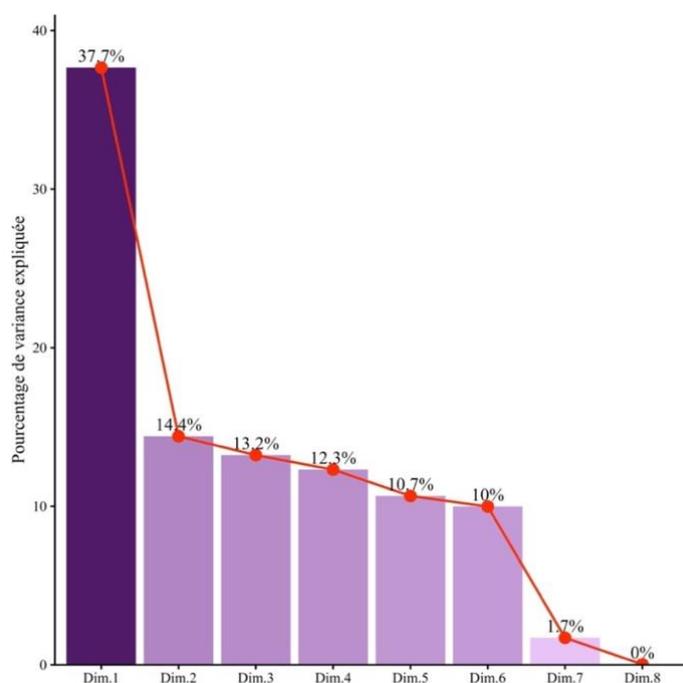
Note : ** : $p < .01$; ° : effet tendanciel

Processus visuo-attentionnels

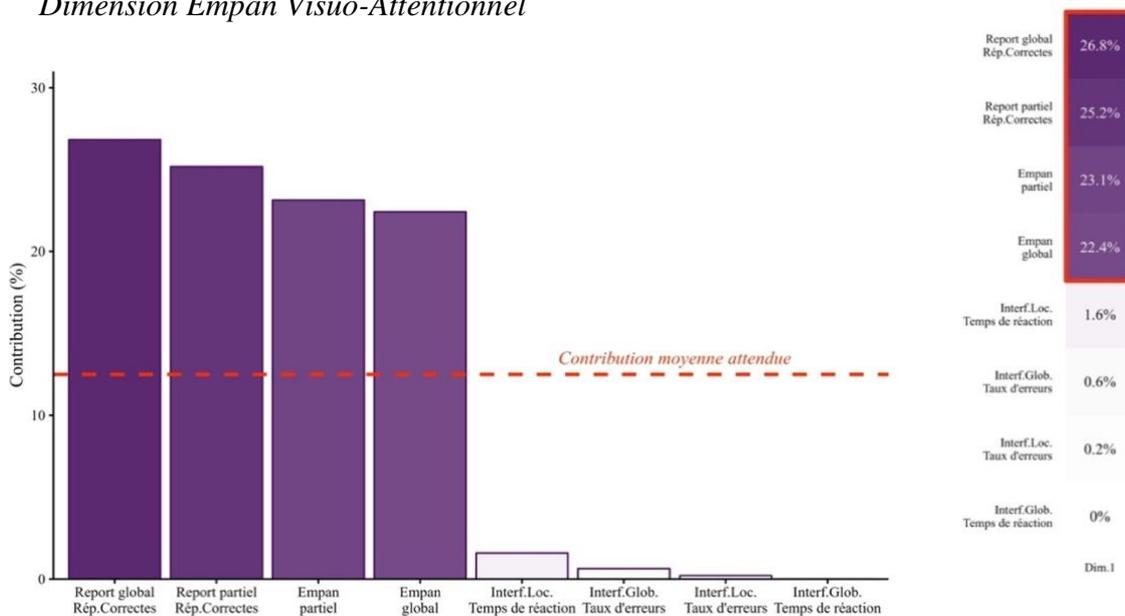
Comme on peut le voir dans la figure 5.20, la première dimension de l'ACP examinant la contribution des variables visuo-attentionnelles explique 37.7 % de la variance totale. Cette dimension a capturé la variance des tâches d'empan visuo-attentionnel à 97 % (Figure 5.21) avec des contributions respectives de 45.5 % pour l'empan visuo-attentionnel en report global et en report partiel et de 52 % pour le nombre de réponses correctes en report global et en report partiel. Nous nommons cette dimension *Empan Visuo-Attentionnel*.

Figure 5.20

Analyses en composantes principales des variables visuo-attentionnelles



Note. Les points rouges représentent les pourcentages de la variance expliquée par chaque dimension. L'intensité de la couleur illustre l'intensité de la variance expliquée par chaque dimension.

Figure 5.21*Dimension Empan Visuo-Attentionnel*

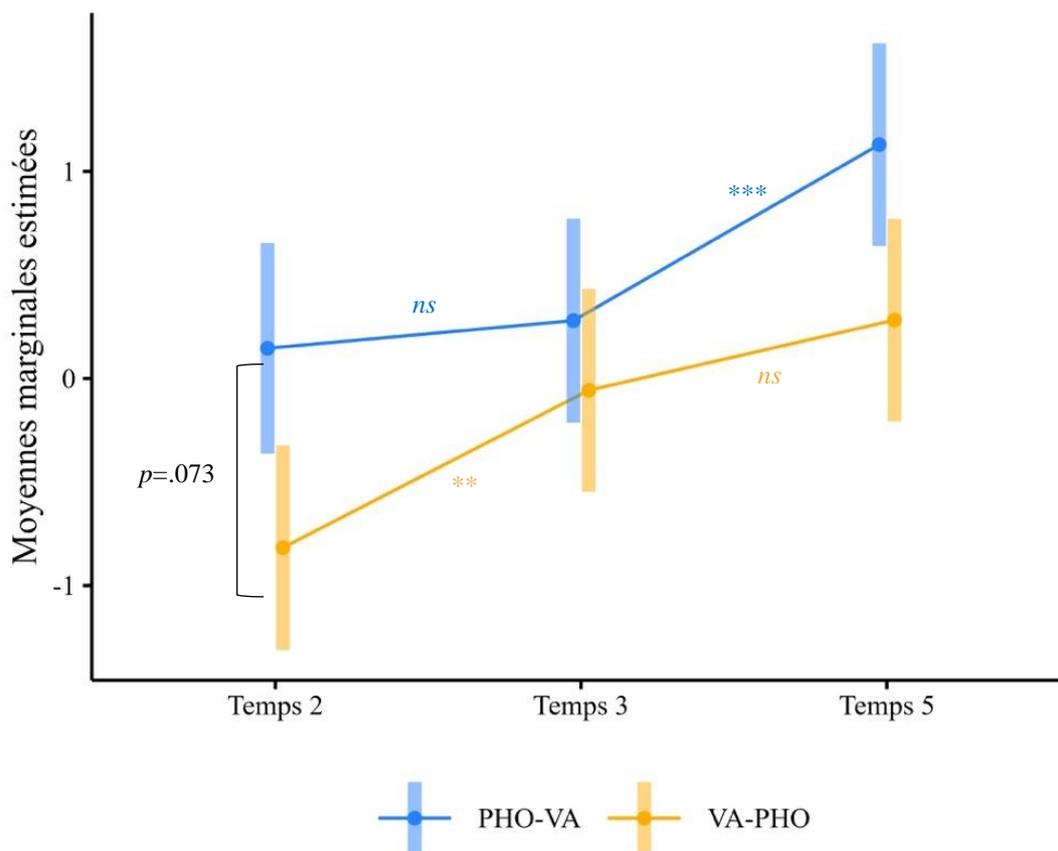
Notes. Empan global : empan visuo-attentionnel en report global ; Empan partiel : empan visuo-attentionnel en report partiel ; Interf. Glob : interférence issue du global ; Interf. Loc : interférence issue du local. L'intensité des couleurs est proportionnelle à l'intensité de la contribution de chaque variable. La barre horizontale rouge en pointillé représente la contribution moyenne attendue. Les quatre variables entourées en rouge dans le panel de droite contribuent le plus à la dimension retenue (dimension 1 de la figure 5.20).

Les prédictions du modèle linéaire à effets mixtes pour chaque groupe et à chaque Temps sont présentées dans la Figure 5.22. L'analyse de la *dimension Empan Visuo-Attentionnel* révèle un effet principal significatif du facteur Temps ($F(2, 124) = 63.7, p < .001$), un effet principal significatif du facteur Groupe ($F(1, 86) = 5.34, p = .023$), ainsi qu'une interaction marginalement significative entre ces deux facteurs ($F(2, 124) = 2.63, p = .075$). Comme attendu, les comparaisons post-hoc (Tableau 5.15) montrent que le groupe VA-PHO est significativement plus performant en *Empan Visuo-Attentionnel* au Temps 3 qu'au Temps 2 ($estimation = -0.76, erreur standard = 0.21, t = -3.63, p = .004$). En revanche, aucun effet significatif n'est observé entre les Temps 3 et 5 ($estimation = -0.34, erreur standard = 0.21, t = -1.59, p = .57$). À l'instar de ce qui a été mis en évidence précédemment pour les processus phonologiques, on observe le pattern de résultats inverse pour le groupe PHO-VA : aucune différence significative entre les Temps 2 et 3 ($estimation = -0.13, erreur standard = 0.21, t = -$

0.64, $p = .98$), et amélioration significative des performances au Temps 5 par rapport au Temps 3 ($estimation = -0.84$, $erreur\ standard = 0.19$, $t = -4.32$, $p < .001$). Il faut cependant noter qu'au Temps 2 (avant l'intervention), le groupe PHO-VA présente de meilleures performances dans les mesures de l'*Empan Visuo-Attentionnel* que le groupe VA-PHO, mais cette différence reste marginalement significative ($estimation = 0.96$, $erreur\ standard = 0.35$, $t = 2.68$, $p = .073$). En revanche, les deux groupes ont des performances similaires au Temps 3 et au Temps 5 (tous les $ps > .13$).

Figure 5.22

Évolution des compétences en Empan Visuo-Attentionnel concernant l'effet marginal d'interaction entre les facteurs Temps et Groupe



Notes. Représentation des prédictions du modèle pour chaque groupe aux Temps 2, 3 et 5. La ligne bleue représente les moyennes marginales estimées du groupe PHO-VA. La ligne jaune représente les moyennes marginales estimées du groupe VA-PHO. Les barres d'erreurs représentent les intervalles de confiance à 95 %. Les étoiles représentent le niveau de significativité des effets simples de *Temps* révélés par les analyses post-hoc (*** : $p < .001$; ** : $p < .01$; ns : non significatif).

Tableau 5.15

Comparaisons post-hoc de la dimension Empan Visuo-Attentionnel concernant l'interaction marginale entre les facteurs Temps et Groupe

Contrastes	Estimations	Erreurs standards	Valeurs de t	Valeurs de p
T2PHO-VA -T3PHO-VA	-0.13	0.20	-0.64	0.98
T3PHO-VA -T5PHO-VA	-0.84	0.19	-4.32	< 0.001 ***
T2VA-PHO -T3VA-PHO	-0.76	0.21	-3.63	0.004 **
T3VA-PHO -T5VA-PHO	-0.33	0.21	-1.59	0.57
T2PHO-VA -T2VA-PHO	0.96	0.35	2.68	0.073 °
T3PHO-VA -T3VA-PHO	0.33	0.35	0.95	0.92
T5PHO-VA -T5VA-PHO	0.87	0.34	2.42	0.13

Notes : *** : $p < .001$; ** : $p < .01$; ° : effet tendanciel

4.4. Synthèse

Pour chaque type d'intervention PHO ou VA, on observe une amélioration des processus ciblés, alors que les processus non ciblés ne s'améliorent pas. Cet effet de spécificité soutiendrait l'interprétation d'une action curative de l'intervention, dans la mesure où des entraînements intensifs et répétés sur un processus cognitif ciblé semblent avoir amélioré uniquement ce processus. Plus précisément, les compétences en *Conscience Phonologique* s'améliorent de façon significative uniquement pour les participants ayant effectué l'entraînement PHO et ne s'améliorent pas de façon significative pour les participants ayant effectué l'entraînement VA. Inversement, les compétences en *Empan Visuo-Attentionnel* s'améliorent de façon significative uniquement pour les participants ayant effectué l'entraînement VA et ne s'améliorent pas de façon significative pour les participants ayant effectué l'entraînement PHO. De plus, cet effet de spécificité renforce l'hypothèse d'un lien entre ces processus cognitifs sous-jacents et l'efficacité en lecture, ainsi que l'indépendance de ces deux processus cognitifs phonologique et visuo-attentionnel.

5. Effets de l'intervention multimodale sur la perception du trouble de la lecture

5.1. Objectif et hypothèse

Après avoir évalué les effets de l'intervention multimodale et multi-componentielle sur les performances en lecture et en orthographe, nous avons cherché à savoir comment les participants, mais aussi leurs parents percevaient ces effets dans leur vie quotidienne. Pour ce faire, à l'aide de questionnaires, nous les avons évalués sur la perception de l'appétence à la lecture, des résultats scolaires et de l'estime de soi, au début et à la fin du protocole. Nous nous attendions à ce que l'intervention multimodale et multi-componentielle améliore l'intérêt pour la lecture, les performances scolaires et l'estime de soi par rapport à la *Ligne de base Pré-intervention*.

5.2. Analyses statistiques

Nous avons réalisé des modèles linéaires à effets mixtes (Baayen, 2008) sur différentes variables dépendantes : la perception du trouble (score total à l'échelle de Likert), l'estime de soi et l'appétence en lecture (scores aux items 1 à 8), l'estime de soi et les compétences et scolaires (scores aux affirmations 9 à 13). Chaque modèle est construit avec un facteur à effets fixes (i.e., *Temps*), un facteur à effets aléatoires (i.e., *Participants*), et la moyenne des performances aux Temps 1 et 2 comme covariable : calculée pour chaque sujet et chaque variable dépendante. Cette covariable¹⁵ permet de prendre en compte le niveau de l'individu lors de la phase contrôle pré-intervention sans entraînement.

¹⁵ $VD \sim \text{Temps} + \mu(\text{Temps 1, Temps 2}) + (1|\text{Participant})$

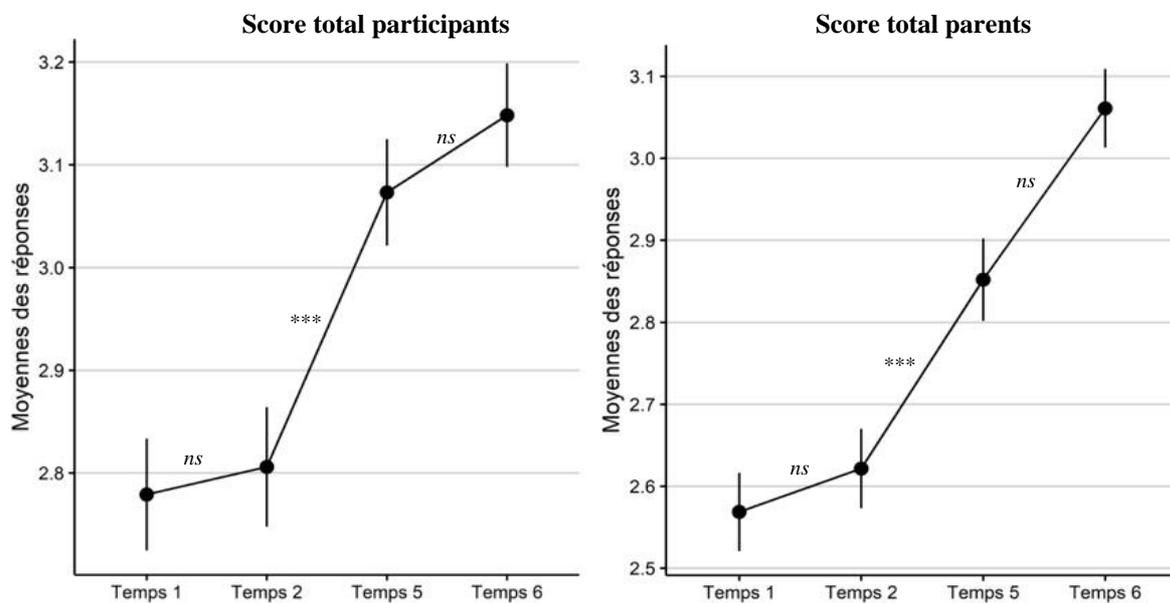
Cette fois encore, les contrastes ont été évalués avec la méthode des "moyennes marginales estimées" (Searle et al., 1980) en utilisant les packages *emmeans* (Lenth, 2021) et *multcomp* (Hothorn, et al. 2008).

5.3. Résultats

Les moyennes des scores obtenus aux questionnaires aux Temps 1, 2, 3 et 5 sont présentées Figure 5.23. Les analyses mettent en évidence une amélioration significative de la perception du trouble pendant la période d'intervention du Temps 2 au Temps 5 et ce, au niveau des réponses fournies par les participants ($F(3, 5206) = 36.06, p < .001$), et par leurs parents ($F(3, 5130) = 61.18, p < .001$).

Figure 5.23

Perception du trouble de la lecture par les participants et par leurs parents

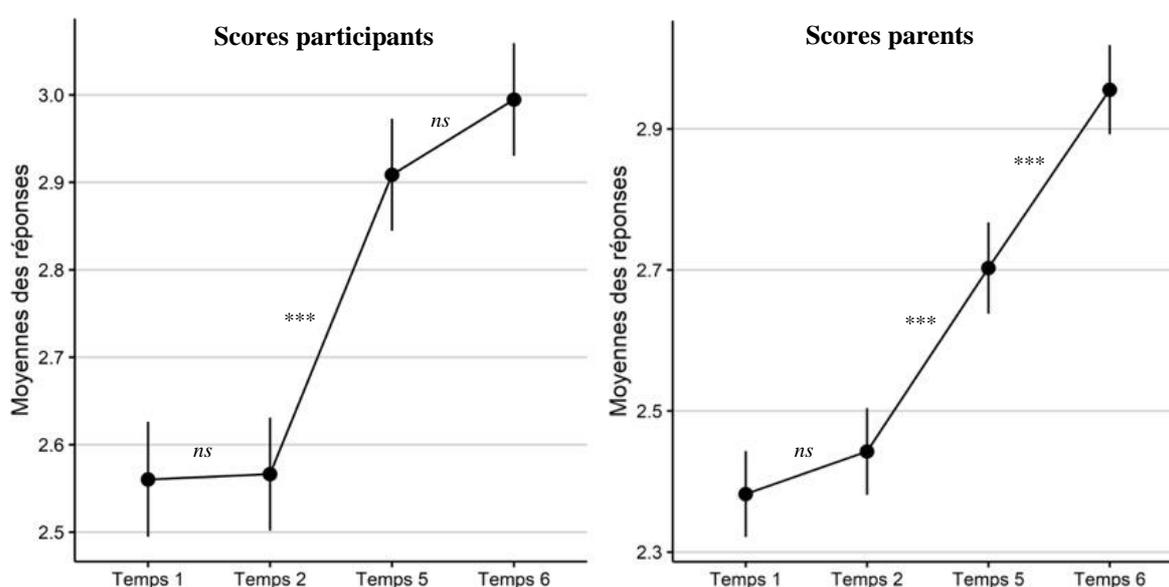


Note. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95 %. Les étoiles représentent le niveau de significativité des effets simples de Temps révélés par les analyses post-hoc (***) : $p < .001$; ns : $p > .05$).

Concernant la sous-dimension qui évalue plus particulièrement l'appétence et l'estime de soi en lecture (cf. Figure 5.24), les analyses révèlent une amélioration significative au cours du temps à travers les réponses fournies par les enfants ($F(3, 3155) = 41.59, p < .001$) et les parents ($F(3, 3106) = 55.99, p < .001$).

Figure 5.24

Perception de l'estime de soi et de l'appétence en lecture chez le LD, par les participants et par leurs parents

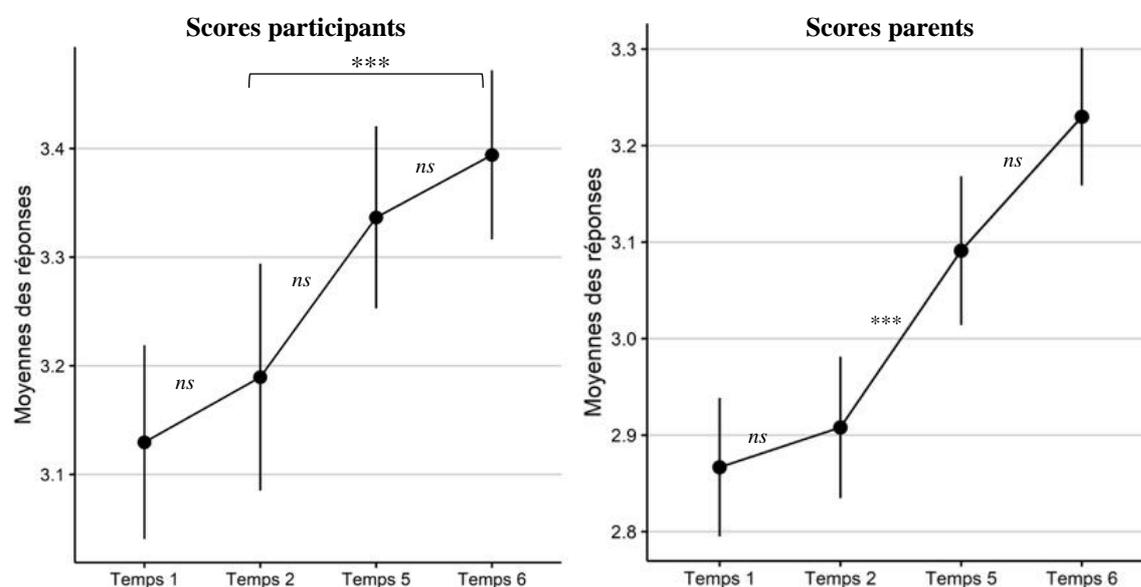


Note. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95 %. Les étoiles représentent le niveau de significativité des effets simples de temps révélés par les analyses post-hoc (*** : $p < .001$; ns : $p > .05$).

Enfin, concernant la deuxième sous-dimension mesurant les compétences et l'estime de soi scolaires (cf. Figure 5.25), les analyses montrent une amélioration significative pour les participants entre le Temps 2 et le Temps 6 ($F(3, 1946) = 5.78, p < .001$) et pour les parents ($F(3, 1921) = 16.18, p < .001$) entre le Temps 2 et le Temps 5.

Figure 5.25

Perception de l'estime de soi et des compétences scolaires par les participants et par leurs parents



Note. Les barres verticales représentent les intervalles de confiance à 95 %. Les étoiles représentent le niveau de significativité des effets simples de temps révélés par les analyses post-hoc (***: $p < .001$; ns : $p > .05$).

5.4. Synthèse

Lors de la période pré-intervention qui correspond à deux mois de rééducation orthophonique conventionnelle sans entraînements intensifs, et qui se déroule entre les Temps 1 et 2, la perception de l'impact du trouble de la lecture ne s'améliore pas. L'évolution n'est pas significative, ni pour les enfants, ni pour les parents, que ce soit au niveau de l'appétence à la lecture, de la réussite scolaire ou de l'estime de soi.

Lors de la période d'intervention qui se déroule entre les Temps 2 et le Temps 5, la perception de l'impact du trouble de la lecture par les parents et les participants s'améliore à l'issue des entraînements intensifs et cette amélioration se maintient au moins deux mois après l'arrêt le protocole de remédiation. Nous nous attendions à ce que cette amélioration soit plus tardive dans la mesure où les bénéfices attendus sur l'appétence à lire, les compétences scolaires

et l'estime de soi nécessiteraient un délai pendant lequel le participant accéderait à la prise de conscience de ces changements positifs. L'hypothèse la plus évidente serait que l'amélioration de l'efficacité en lecture et en orthographe a favorisé les apprentissages scolaires et a eu un impact positif direct sur la perception du trouble dans la vie quotidienne. Une autre explication, n'annulant pas la précédente, est que notre protocole de remédiation multimodale et multi-composante appliqué dans un contexte clinique, intègre les principes d'éducation thérapeutique, de partenariat familial et de renforcement positif. Ainsi, informer les participants et leurs parents des modalités et des objectifs du protocole de remédiation pourrait tout à fait favoriser indirectement les bénéfices immédiats sur la perception du trouble.

Plus précisément, les résultats indiquent que *l'appétence et l'estime de soi en lecture* s'améliorent de façon significative à la fois pour les parents et pour les participants sous l'effet immédiat de l'intervention multimodale (du Temps 2 au Temps 5). En revanche, les résultats concernant *les compétences et l'estime de soi scolaires* s'améliorent seulement à l'issue de la période post-intervention pour les participants (du Temps 2 au Temps 6), alors qu'elles s'améliorent immédiatement à l'issue de l'intervention multimodale pour les parents (du Temps 2 au Temps 5). Cette prise de conscience plus tardive des participants quant à leurs *compétences et leur estime de soi scolaires* pourrait refléter une difficulté à se dégager de la spirale de l'échec scolaire qui a impacté leur scolarité depuis le début de l'apprentissage de la lecture. Une autre hypothèse serait que malgré l'amélioration de la lecture, les participants ne perçoivent pas immédiatement d'amélioration de leurs *compétences et de leur estime de soi scolaires* car leurs résultats scolaires ne se sont pas encore suffisamment améliorés. Il est évident que l'environnement pourrait aussi influencer l'estime de soi du LD dans la mesure où le renforcement positif peut être différent de la part des enseignants, des orthophonistes ou des parents (J.-A. Jordan & Dyer, 2017; Rosenthal, 1973).

Ces résultats sont d'autant plus importants que les LD sont plus à risque d'échec scolaire et d'échec professionnel (Boscardin et al., 2008 ; Daniel et al., 2006 ; Hernandez et al., 2011 ; pour une revue : voir Livingston et al, 2017). Or, dans notre échantillon, les LD ont amélioré leur perception du trouble dans la vie quotidienne, ce qui rejoint les résultats de Nukari et al. (2022) et de Ilaria et al. (2022) qui mettent en évidence qu'une identification et une remédiation de la dyslexie développementale participent à limiter voire prévenir le mal-être scolaire et émotionnel des LD et participent à prévenir les incidences négatives des difficultés de lecture.

6. Prédiction de l'amplitude de la réponse à l'intervention

6.1. Objectif et hypothèse

Les résultats en ce qui concerne la forte amélioration de l'efficacité en lecture nous ont interrogés sur les facteurs pouvant prédire la qualité de la réponse à l'intervention. Ainsi, nous avons cherché à déterminer quelles variables étaient susceptibles d'expliquer le fait que certains participants ont très fortement répondu à l'intervention par rapport à d'autres participants qui ont moins bien répondu. Nous nous attendions à ce que la réponse à l'intervention soit plus modérée pour les participants ayant des compétences phonologiques, visuo-attentionnelles et des compétences en lecture plus altérées.

6.2. Analyses statistiques

Les participants ont été répartis en deux groupes en fonction de leurs gains totaux au test *DeltaText* : les *Très bons répondants* (i.e., ceux dont le gain total est supérieur à la moyenne d'efficacité en lecture de l'échantillon, au test *DeltaText*) et les *Moins bons répondants* (i.e.,

ceux dont le gain total est inférieur à la moyenne d'efficacité en lecture, de l'échantillon au test DeltaText).

Afin d'examiner les variables permettant de prédire l'appartenance des participants à l'un ou l'autre de ces deux groupes, nous avons effectué une analyse de régression logistique à l'aide du logiciel JASP (version 0.16.4, 2022). En nous basant sur les données de la littérature concernant les facteurs de protection, les prédicteurs de troubles de la lecture (phonologiques et visuo-attentionnels) et les modélisations de prédiction dans la dyslexie développementale, nous avons sélectionné 11 prédicteurs : âge chronologique, niveau d'éducation de la mère, niveau intellectuel non verbal, compétences de compréhension orale, score d'efficacité du test de vocabulaire actif, score d'efficacité de la suppression du premier phonème, les réponses correctes en report global et en report partiel, nombre de mots corrects lus au test de lecture *Mouette-Pingouin* et score d'efficacité de la DRA.

6.3. Résultats

Les résultats du modèle de régression logistique présentés dans le Tableau 5.17, montrent que le modèle est statistiquement significatif ($\chi^2(80) = 32.02, p < .001$). Le modèle explique 39 % (Nagelkerke R^2) de la variation des performances d'efficacité en lecture et prédit correctement l'appartenance des enfants au groupe de *Très bons répondants* (groupe 1) ou au groupe des *Moins bons répondants* (groupe 0) à 73.62 %, avec une spécificité de 75 % et une sensibilité de 71 % (cf. Tableau 5.16).

Tableau 5.16

Tableau de classification et résumé du modèle de régression logistique

<i>Classification</i>		<i>Résumé du modèle</i>				
% Correct 0	% Correct 1	Déviance	DI	X ²	p	Nagelkerke R ²
75.51	71.43	93.59	80	30.02	< .001	0.39

Note. Indice de Nagelkerke R² : proportion de variation du critère *efficience en lecture* expliquée par les prédicteurs

Le Tableau 5.17 présente les variables dans l'équation de l'analyse de régression logistique. Comme on peut le voir, l'intensité de la réactivité à l'intervention est particulièrement déterminée par l'efficience en lecture d'un texte signifiant (*estimation* = 5.09, *erreur standard* = 2.12, *Odds Ratio* = 163, *z* = 2.4, *p* = .016), la taille de l'empan visuo-attentionnel en report partiel (*estimation* = 5.04, *erreur standard* = 2.14, *Odds Ratio* = 154.83, *z* = 2.35, *p* = .019), l'efficience en suppression de phonème dans des syllabes complexes (*estimation* = 3.92, *erreur standard* = 1.67, *Odds Ratio* = 50.81, *z* = 2.34, *p* = .019), le niveau d'éducation de la mère (*estimation* = 2.59, *erreur standard* = 1.05, *Odds Ratio* = 13.44, *z* = 2.47, *p* = .013) et l'âge chronologique (*estimation* = -7.63, *erreur standard* = 2.3, *Odds Ratio* = $4.82 \cdot 10^{-4}$, *z* = -3.31, *p* = <.001), indépendamment des autres variables du modèle.

Tableau 5.17*Variables dans l'équation de l'analyse de régression logistique*

Variabiles dans l'équation	Estimation	Erreur standard	Odds Ratio	Valeur de z	Test de Wald	Valeur de p
Intercept	-1.335	1.345	0.263	-0.992	0.985	0.321
Âge chronologique	-7.637	2.303	4.822×10 ⁻⁴	-3.316	10.997	< .001
Niveau d'éducation de la mère	2.599	1.051	13.444	2.473	6.117	0.013
Matrices (WISC-V)	-2.476	1.447	0.084	-1.711	2.927	0.087
Suppression de phonèmes	3.928	1.672	50.817	2.349	5.518	0.019
Vocabulaire dénomination	-2.941	1.571	0.053	-1.872	3.503	0.061
Compréhension orale	1.952	1.414	7.044	1.38	1.906	0.167
EVA, Report global	-3.513	2.036	0.03	-1.726	2.979	0.084
EVA, Report partiel	5.042	2.141	154.834	2.355	5.546	0.019
Mots corrects lus (Mouette)	5.094	2.122	163.003	2.4	5.761	0.016
DRA couleurs	-0.662	1.716	0.516	-0.386	0.149	0.7

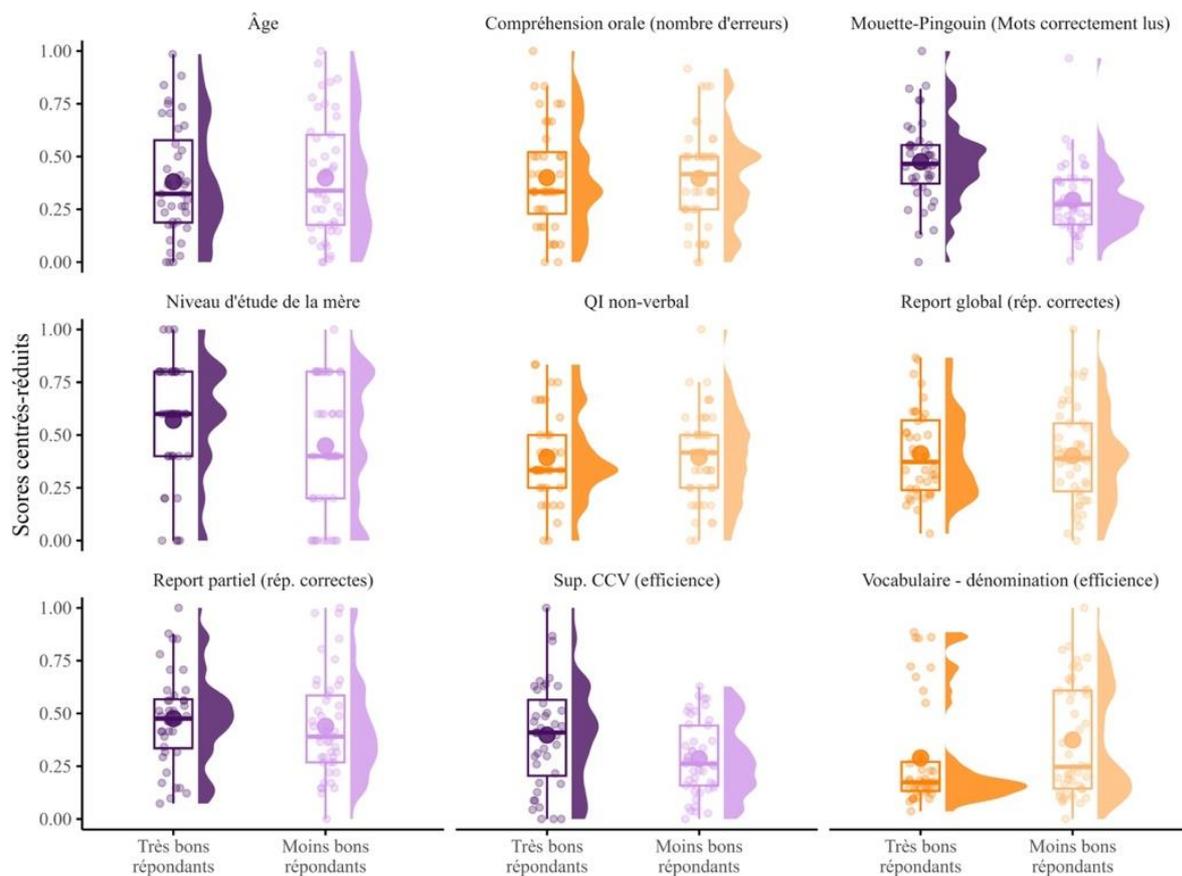
Note. La suppression de phonèmes concerne les syllabes complexes de type Consonne-consonne-voyelle ; EVA : empan visuo-attentionnel.

En ce qui concerne l'efficacité en lecture, l'empan visuo-attentionnel en report partiel, la suppression de phonème et le niveau d'éducation de la mère, pour chacune de ses variables, individuellement et indépendamment des autres, les participants ayant les meilleurs scores ont davantage de chances d'être parmi les *Très bons répondants* (cf. Figure 5.25). En revanche, les analyses montrent que l'âge chronologique est associé au pattern inverse : les enfants les plus âgés ont davantage de chance à être parmi les *Moins bons répondants*, indépendamment des autres variables du modèle (cf. Figure 5.25).

Enfin, certaines variables comme la compréhension orale, le vocabulaire en production, l'empan visuo-attentionnel en report global, l'intelligence non verbale et la DRA, ne semblent pas avoir de pouvoir prédictif sur la probabilité de réponse à l'intervention (cf. Figure 5.25, panels en orange).

Figure 5.25

Distribution des participants pour les variables explicatives à très forte et à très faible probabilité



Notes. Les panels en violets correspondent aux variables ayant un pouvoir de prédiction sur l'appartenance à l'un des groupes : le groupe des *Très bons répondants* est représenté en violet foncé et le groupe des *Moins bons répondants* est représenté en violet clair. Les panels en orange représentent les autres variables du modèle n'ayant pas de pouvoir prédictif. Les points les plus petits représentent les données individuelles, les points les plus gros représentent la moyenne du groupe, les *boxplots* représentent la dispersion et la médiane de chaque groupe. Les courbes pleines à droite de chaque *boxplot* représentent la densité.

6.4. Synthèse

Les participants ayant les meilleures performances initiales en lecture, en taille de l'empan visuo-attentionnel en report partiel et en suppression de phonème dans une syllabe complexe et ceux dont le niveau d'éducation de la mère est plus élevé, ont davantage de chances d'être parmi les *Très bons répondants*. Ces résultats sont en accord avec la littérature. En effet, les LD ayant de légers troubles de la lecture améliorent plus efficacement leurs compétences

en lecture après une intervention, comparés aux LD ayant des troubles plus sévères (Galuschka et al., 2014). Le niveau d'éducation de la mère est décrit comme un facteur de protection, chez les LD (Van Steensel, 2006). Les compétences en conscience phonémique sont connues pour prédire ultérieurement les compétences en lecture (Al Otaiba & Fuchs, 2002). L'empan visuo-attentionnel est aussi un bon prédicteur des performances futures en lecture (Valdois, Roulin, et al., 2019), et l'amplitude de l'empan visuo-attentionnel est liée à une lecture plus rapide et plus précise (Bosse & Valdois, 2009; Prado et al., 2007; M. van den Boer et al., 2013).

Concernant l'âge chronologique, la probabilité pour que les participants les plus jeunes soient parmi les *Très bons répondants* est proche de zéro dans notre échantillon. De plus, les LD classés parmi les *Moins bons répondants* ont aussi amélioré leurs compétences en lecture mais dans une moindre mesure par rapport aux *Très bons répondants*. Par conséquent, il semblerait que notre protocole de remédiation soit efficace quel que soit l'âge. Ce résultat soutient qu'une remédiation de la dyslexie développementale fondée sur les déficits cognitifs sous-jacents de chaque participant représente une réponse efficace aux troubles de la lecture. En outre, comme nous avons adapté les entraînements aux profils sémiologiques de chaque participant, il était donc attendu de ne pas avoir de grande différence de réponse en fonction de l'âge.

Parmi les variables qui n'ont pas de pouvoir prédictif, (e.g., la compréhension orale, le vocabulaire en production, l'empan visuo-attentionnel en report global, l'intelligence non verbale et la DRA), il semble particulièrement étonnant que les compétences linguistiques (i.e., compréhension oral et vocabulaire en production) ne jouent pas le rôle de prédictif. Ce résultat peut s'expliquer par le fait que, dans notre échantillon, les compétences linguistiques initiales ne sont pas altérées. Rappelons que les LD de cet échantillon ont été sélectionnés à condition de ne pas présenter de trouble du langage oral, selon les critères du DSM-5 et du modèle *Simple View of Reading*.

7. Discussion

Cet essai clinique évalue les effets d'une intervention multimodale (auditive, visuelle, audio-visuelle) et multi-componentielle (perception catégorielle, conscience phonologique, mémoire à court terme phonologique, dénomination rapide automatisée, empan visuo-attentionnel, focalisation visuo-attentionnelle, mémoire orthographique, intégration grapho-phonologique) sur l'efficacité en lecture, la compréhension écrite, l'orthographe et la perception de ces troubles chez des LD. Notre idée de départ était relativement simple et consistait à évaluer des entraînements successifs et intensifs de plusieurs processus cognitifs sous-jacents phonologiques, visuo-attentionnels et intermodalitaires, connus pour être impliqués dans l'étiologie de la dyslexie développementale et par conséquent dans sa remédiation. À notre connaissance, ce travail de thèse présente la première étude visant à tester, de manière scientifique une conception multimodale et multi-componentielle de la remédiation de la dyslexie développementale. À la lumière des concepts théoriques de multi-déficits et de syndrome de déconnexion de la dyslexie développementale, nous espérons observer un effet cumulatif des bénéfices de ces trois interventions sur les compétences en lecture et en orthographe. Présentée de cette manière, l'idée nous paraissait relativement séduisante, mais, néanmoins triviale. Cependant, son application pratique l'a été beaucoup moins et au terme de cette étude, nous nous retrouvons dans une situation plutôt complexe, mais, néanmoins toujours séduisante, avec une quantité énorme de données et d'analyses à interpréter à la lumière d'une littérature foisonnante et passionnante.

Notre échantillon de lecteurs dyslexiques (LD) est caractérisé par des multiples déficits cognitifs sous-jacents, touchant à la fois les processus phonologiques et visuo-attentionnels, et par des compétences en lecture et en orthographe très altérées pour les deux groupes. Le groupe PHO-VA, dont l'âge moyen dépasse de 10 mois celui du groupe VA-PHO, présente des scores

standardisés par rapport aux données normatives indiquant des déficits de l'analyse phonémique et de la DRA, plus marqués que ceux du groupe VA-PHO. Les autres mesures standardisées sont équilibrées entre les deux groupes.

Comme attendu, les compétences en lecture de textes à voix haute, en compréhension écrite de phrases et en dictées de phrases s'améliorent de façon significative tout au long du protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle, comparée à la période pré-intervention et cette amélioration se maintient au moins deux mois après l'arrêt de l'intervention. Les gains sur les mesures d'efficacité en lecture de trois types de textes (un signifiant et deux non signifiants) ont révélé des tailles d'effet élevées (respectivement : $d= 2.3$, $d= 1.45$ et $d= 1.35$) à l'issue de l'intervention multimodale. De plus, les comparaisons de gains entre la *Ligne de base Pré-intervention* et l'intervention multimodale montrent une amélioration significative des compétences en compréhension de lecture ($d= 0.9$) et des compétences en orthographe ($d= 0.78$).

L'intervention multimodale et multi-componentielle améliore aussi l'appétence en lecture et l'estime de soi liée à la lecture et aux résultats scolaires. Des performances initiales plus élevées dans les tâches évaluant la lecture, l'empan visuo-attentionnel en report partiel, la suppression de phonème dans une syllabe complexe et le niveau d'éducation de la mère, prédisent une bonne réponse à l'intervention.

7.1. Effets sur la lecture

L'amélioration des compétences en lecture de textes est caractérisée par des grandes tailles d'effet. Cette amélioration est d'autant plus étonnante que dans la plupart des interventions ciblant les troubles de la lecture, les mesures comparatives s'effectuent fréquemment sur la lecture de mots, plus rarement sur la lecture de textes signifiants et encore

plus rarement sur la lecture de textes non signifiants, comme nous l'avons proposé. Étant donné que la dyslexie développementale se caractérise par un trouble de l'identification du mot écrit indépendamment du contexte (Sprenger-Charolles & Ziegler, 2019) et que ce trouble persiste jusqu'à l'âge adulte (Cavalli et al., 2018), une telle amélioration de l'efficacité en lecture de textes non signifiants était inattendue. Sachant que le contexte sémantique aide le lecteur dyslexique, il nous a paru nécessaire de mesurer l'efficacité en lecture de textes non signifiants afin de mettre en évidence une amélioration en lien avec la spécificité du déficit. En effet, l'amélioration de la lecture de textes non signifiants implique celle de l'identification des mots écrits, indépendamment du contexte, en accord avec le modèle *Simple View of Reading* (Gough & Tunmer, 1986). Par conséquent, les principes de la remédiation curative que nous avons appliqués dans ce protocole semblent être très probablement à l'origine de l'amélioration de l'efficacité en lecture de texte non signifiants. Bien que ces effets positifs sur la lecture semblent supérieurs aux résultats annoncés par la littérature, l'interprétation de ces résultats reste néanmoins à modérer en l'absence d'un groupe contrôle.

Interventions menées auprès des lecteurs dyslexiques

Les interventions pédagogiques ciblées sur un enseignement explicite et systématique des compétences fondamentales, c'est-à-dire la conscience phonologique, le décodage phonologique, la lecture de mots et de textes, l'orthographe, et la compréhension de lecture, ont des effets positifs significatifs sur les compétences en lecture et en orthographe des enfants à risque de développer des troubles ou présentant des troubles avérés de la lecture (voir les méta-analyses : Donegan & Wanzek, 2021; Gersten et al., 2020; Neitzel et al., 2022; Slavin et al., 2011; Suggate, 2010; Wanzek et al., 2016, 2018). Plus précisément, les méta-analyses les plus récentes et les plus rigoureuses au niveau méthodologique, rapportent des effets moyens de 0.23 (Neitzel et al., 2022) et 0.39 (Gersten et al., 2020; Wanzek et al., 2018). Cependant, ces méta-

analyses ne différencient pas initialement les mesures de compréhension de lecture avec des mesures d'identification de mots ou de compétences fondamentales, comme la conscience phonologique et le décodage. Par conséquent elles n'englobent pas que les LD mais également les faibles lecteurs.

Dans le cas des LD, qui nous intéressent plus particulièrement ici, des méta-analyses rapportent des effets moyens de 0.32 (Galuschka et al., 2014) et de 0.33 (Hall et al., 2022). Différentes approches interventionnelles ont été évaluées mais en réalité, ces approches incluent majoritairement des interventions traditionnelles ou *phonics instruction*, basées principalement sur des entraînements de la conscience phonologique et de la lecture. Nos résultats ne sont pas comparables avec les données de ces méta-analyses car nous ne pouvons pas comparer des tailles d'effet d'une progression des scores en lecture tout au long de l'intervention avec des tailles d'effet d'une différence entre un groupe d'intervention et un groupe contrôle.

De plus, à notre connaissance, aucune étude n'a combiné trois types d'interventions à la fois multimodales et multi-composantes dans un seul protocole comme nous l'avons fait. Dans la méta-analyse de Hall et al. (2022), les auteurs déclarent que les 70 conditions d'interventions des 53 études incluses, ciblent toutes la connaissance des correspondances graphème-phonème et du décodage. Parmi ces études, 71% ciblent aussi la conscience phonologique (donc des *phonics instruction*), 20% ciblent aussi la conscience morphologique, 73 % ciblent aussi de l'orthographe, 87% ciblent aussi la lecture de textes, 50% ciblent aussi la compréhension en lecture et 41% ciblent aussi le vocabulaire. Seulement 7% étaient décrites comme utilisant une approche « multisensorielle » ou approche *Orton-Gilligham*, c'est-à-dire utilisant simultanément les informations visuelles, auditives, kinesthésiques ou tactiles (pour une revue, voir Stevens et al., 2021). Aucune étude n'incluait des entraînements des processus cognitifs sous-jacents visuo-attentionnels. D'après Stevens et al. (2021), la taille d'effet des

interventions « multi-sensorielles » est de 0.22 et ces interventions ne sont pas plus efficaces que les interventions plus traditionnelles.

À partir de ces données, un point essentiel et plutôt surprenant nous paraît intéressant à discuter, celui de la question du choix des interventions proposées aux LD (voir les méta-analyses de Galuschka et al., 2014; Hall et al., 2022) par rapport aux interventions proposées aux faibles lecteurs (voir les méta-analyses de Gersten et al., 2020; Neitzel et al., 2022; Wanzek et al., 2018). Nous constatons que ces interventions sont les mêmes, en majorité des *phonics instruction* et présentent des tailles d'effets similaires autour de 0.3. Or, les LD présentent des troubles d'apprentissage de la lecture *inattendus* (voir Protopapas, 2019) et des compétences de langage oral théoriquement préservées (Gough & Tunmer, 1986), ce qui est le cas de notre échantillon dont les critères d'inclusion exigeaient des compétences linguistiques normales (vocabulaire et compréhension orale) et des troubles sévères de la lecture et de l'orthographe. En revanche, les faibles lecteurs présentent des troubles de la lecture souvent en lien avec des troubles du langage oral (Capin et al., 2021). Ainsi, il semblerait logique de proposer aux LD sans troubles des compétences linguistiques (à condition de les avoir évaluées), des interventions spécifiques fondées sur leurs déficits cognitifs sous-jacents et par conséquent, d'en attendre des effets plus conséquents. Et ce, d'autant plus si ces interventions sont adaptées aux profils sémiologiques des LD, et combinent trois interventions audio-phonologique, visuo-attentionnelle et intermodalitaire respectivement composées d'entraînements multi-composentiels, comme nous l'avons proposé dans notre protocole d'intervention. Même si l'on reconnaît le fait que les déficits phonologiques soient à l'origine de la dyslexie développementale, il reste néanmoins certain que des déficits multimodaux et variables individuellement caractérisent les profils sémiologiques des LD (McGrath et al., 2020; O'Brien & Yeatman, 2021; Pennington, 2006b).

Récemment, une revue systématique a évalué les effets sur la lecture de différentes approches de remédiation proposées à des LD (Toffalini et al., 2021). Parmi 40 études incluses, Toffalini et al. (2021) rapportent des effets significatifs pour trois approches phonologiques ($d=0.58$), sept *phonics instruction* ($d=0.44$), trois approches mixtes ($d=0.25$), trois interventions de stimulation cérébrale ($d=0.5$), huit interventions visuelles et visuo-attentionnelles ($d=0.35$), cinq interventions avec des jeux vidéo d'action ($d=0.20$), trois programmes d'accélération de la lecture ($d=0.61$) et trois interventions ciblant la mémoire de travail ($d=0.36$). Or, dans notre étude, composée de trois interventions différentes et successives, nous avons relevé des gains en lecture de texte significatifs, pour chaque intervention : $d=0.63$ à l'issue de l'intervention phonologique, $d=0.75$ à l'issue de l'intervention visuo-attentionnelle et $d=0.7$ à l'issue de l'intervention intermodale. Comparativement aux effets relevés par Toffalini et al. (2021), les tailles des effets relevées pour chaque intervention de notre protocole sont supérieures. Cependant, le nombre d'interventions évaluées par Toffalini et al. (2021) pour chaque approche de remédiation étant insuffisant, nous ne pouvons pas en tirer des conclusions définitives.

En revanche, le programme *Triple Focus Reading* de Lovett et al. (2017) qui intègre des entraînements multi-composants, rapporte une grande taille d'effet (d de Cohen = 0.8) chez des enfants faibles lecteurs tout au long des trois premières années d'apprentissage de la lecture. Toutefois, ces entraînements concernent des modules pédagogiques uniquement centrés sur les processus linguistiques sous-jacents à la lecture comme les stratégies de décodage, de compréhension (programme PHAST), les compétences phonologiques, orthographiques, sémantiques, syntaxiques et morphologiques (RAVE-O). De plus, il s'agit d'enseignements scolaires dispensés pendant 125 heures alors que la durée des entraînements dans notre intervention est seulement de 30 heures. Enfin, le programme *Triple Focus Reading* s'adresse à des faibles lecteurs alors que notre intervention s'adresse à des lecteurs dyslexiques

uniquement. Ainsi, pour toutes ces raisons et comme énoncé précédemment, nous ne pouvons pas comparer nos résultats avec ces programmes de remédiation.

Néanmoins, comme nous le décrivons dans le chapitre 6, 52% des participants ne présentent plus de trouble d'apprentissage de la lecture à l'issue du programme de remédiation, si l'on se réfère aux données normatives du test de lecture *Mouette-Pingouin*. De même, si l'on se réfère aux données normatives du test de *L'Alouette*, 43% des participants ne présentent plus de trouble d'apprentissage de la lecture à l'issue du programme de remédiation. L'efficacité de notre protocole de remédiation pourrait s'expliquer par la méthodologie de soin que nous avons appliquée et qui peut se résumer par quatre principes fondamentaux qui structurent l'architecture de notre protocole de remédiation : (1) Le protocole de remédiation est multimodal, multi-componentiel, intensif et longitudinal ; (2) Chaque entraînement est adapté au profil individuel des participants ; (3) Chaque entraînement ciblant un processus cognitif sous-jacent est systématiquement associé à un entraînement ciblant la lecture et la production écrite ; (4) Les entraînements sont numériques, référencés et s'effectuent à domicile, sous tutorat parental préalablement formé aux modalités d'application de chaque entraînement, grâce aux principes de partenariat familial et d'éducation thérapeutique.

Protocole de remédiation multimodale, multi-composante, intensive et longitudinale

En partant du constat de l'hétérogénéité des profils sémiologiques des LD, nous avons conçu notre protocole de remédiation selon les modèles à déficits multiples (Pennington, 2006b) et les modèles multifactoriels (McGrath et al., 2020; O'Brien & Yeatman, 2021; Ziegler et al., 2020) plus cohérents avec l'étiologie multifactorielle et probabiliste des troubles neurodéveloppementaux. Ainsi, cette approche multimodale et multi-composante innovante basée sur de nombreux entraînements ciblant les différents déficits cognitifs sous-

jacent phonologiques, visuo-attentionnels et intermodalitaires, peut constituer une première explication aux tailles d'effet que nous avons mises en évidence.

Une autre explication peut résider dans le dosage des entraînements au cours du protocole de remédiation. Dans notre étude, la durée totale des entraînements est de 30 heures. Alors que certaines méta-analyses n'ont pas relevé de relations significatives entre le dosage de l'intervention et les améliorations en lecture des LD (e.g., Suggate, 2010; Wanzek et al., 2016), d'autres, au contraire, ont relevé des effets positifs sur les compétences en lecture quand la durée des entraînements était augmentée (e.g., Al Otaiba et al., 2005; Hall et al., 2022). Nos résultats sont en accord avec la méta-analyse de Hall et al. (2022) qui mettent en évidence que les interventions plus intenses ont des tailles d'effets plus élevées. Plus précisément, la taille d'effet augmente de 0.002 ($p = 0.04$) pour chaque heure d'intervention supplémentaire. Ainsi, une dose accrue d'entraînement est associée à un développement accéléré de la lecture et renforce les preuves à l'appui des recommandations visant à intensifier les interventions pour accélérer les gains chez les élèves à risque ou souffrant de dyslexie (Leloup et al., 2022). Enfin, nous avons maintenu une intensité du traitement de façon longitudinale pendant 6 mois puisque chaque intervention PHO, VA et IM dure 2 mois. Or, peu de travaux ont étudié les bénéfices d'une remédiation cognitive longitudinale et individuelle. Cependant, fait intéressant, une étude contrôlée randomisée en grappes rapporte que les interventions longitudinales sont plus efficaces à condition que les entraînements soient individualisés (Connor et al., 2013).

Entraînement spécifique et adapté individuellement

Au sein de chaque intervention, nous avons proposé plusieurs entraînements ciblant différents processus cognitifs sous-jacents de façon à adapter les entraînements aux profils sémiologiques de chaque participant, c'est-à-dire aux déficits individuels cognitifs et comportementaux. Pour élaborer l'intervention PHO, nous ne nous sommes pas contentées de

proposer des entraînements de type *phonics instruction*. Nous avons associé les *phonics instruction* (écriture des mots fusionnés et segmentés) à d'autres entraînements spécifiques de la perception catégorielle, de la mémoire phonologique et/ou de la dénomination rapide. Pour élaborer l'intervention VA, nous avons associé un entraînement de la mémoire orthographique aux entraînements spécifiques qui visaient à améliorer l'empan visuo-attentionnel et/ou la focalisation attentionnelle local/global, selon les déficits évalués. L'intervention IM est basée sur deux entraînements audio-visuels de lecture ciblant l'automatisation du décodage phonologique et la fluidité de la lecture.

Nonobstant, le principe le plus fondamental de ce protocole est que chacun de ces entraînements spécifiques est adapté au profil sémiologique individuel c'est-à-dire que le choix des entraînements prescrits s'est effectué à partir d'une mise au jour des déficits présentés par chaque participant. De plus, les items proposés pour chaque entraînement, ont été soigneusement sélectionnés par l'orthophoniste en fonction de la passation de lignes de bases cliniques (Sackett et al., 1996), décrites dans ce chapitre 5 (section 1.4, p.166). Ces lignes de bases cliniques ont évalué les items entraînés et les items non entraînés, spécifiques au processus cognitif ciblé. Une ligne de base dite de *contrôle* évalue des processus non ciblés par l'intervention et sans lien avec les processus entraînés. Ainsi, si cette ligne de base reste constante à l'évaluation post-entraînement, la spécificité de l'entraînement est confirmée. En somme, tous les entraînements étaient adaptés aux compétences de chaque LD selon des lignes de base pré et post-entraînements qui s'effectuaient tous les mois afin d'ajuster les items proposés ou de définir la durée du même entraînement pendant un ou deux mois. Ces lignes de bases cliniques ont ainsi optimisé l'expertise des orthophonistes pour ajuster finement les entraînements mais n'ont pas fait l'objet d'analyses. Cette limite est discutée dans le chapitre 6, section 5.6, page 396.

Entraînement d'un déficit cognitif sous-jacent (DCSJ) associé à un entraînement en lecture et en production écrite

De nombreuses études et méta-analyses ont confirmé que les effets d'un entraînement de la conscience phonémique sont d'autant plus grands et se maintiennent dans le temps s'ils sont associés à un entraînement du décodage phonologique en lecture et en production écrite et à une mise en contexte sémantique (e.g., Ehri et al., 2001; Galuschka et al., 2014). Nous avons appliqué cette règle à tous les entraînements de notre protocole de remédiation. Ainsi, chaque entraînement ciblant un déficit cognitif sous-jacent phonologique, visuo-attentionnel et intermodalitaire a été associé à un entraînement en lecture et/ou en production écrite dans un contexte sémantique, ce qui a probablement aussi participé à augmenter les effets de notre protocole.

Supports numériques

Deux autres facteurs susceptibles d'avoir favorisé l'efficacité de ce protocole sont d'une part, l'utilisation prépondérante des programmes de remédiation numériques et d'autre part, la réalisation des entraînements à domicile sous tutorat parental. Dans un chapitre d'ouvrage nous avons évoqué les avantages des programmes numériques dans l'apprentissage et la remédiation des troubles de la lecture (cf. Annexe 18, Harrar-Eskinazi et al., 2019). En bref, les dispositifs numériques optimisent ce que Dehaene (2013) nomme « *les quatre piliers de l'apprentissage* » c'est-à-dire l'attention, l'engagement actif, le retour d'informations et la consolidation. D'abord, le caractère ludique des entraînements proposés sur dispositifs numériques augmente les capacités attentionnelles (Yu & Tsuei, 2022) et la motivation (Li et al., 2022). Ensuite, ces dispositifs favorisent une plus grande autonomie dans la gestion du temps de travail et des entraînements à effectuer et par conséquent, activent l'engagement dans un processus d'apprentissage. De plus, le *feed-back* correctif et l'affichage des scores permettent un retour

de l'information, un apprentissage sans erreur, un renforcement positif (Maillart et al., 2014), ce qui encourage positivement le participant. Enfin, ces programmes numériques favorisent l'automatisation et la consolidation des apprentissages grâce à la reproductibilité des entraînements, la présentation multimodale des stimuli, la constance de la présentation visuelle et de la forme sonore et la progression selon une adaptation au niveau individuel (De Cara & Plaza, 2010). Ainsi, il est de plus admis que les programmes de remédiations numériques apportent une aide personnalisée et adaptée aux difficultés spécifiques de chaque participant (Cheung & Slavin, 2012; MacArthur et al., 2001) et facilitent la gestion des entraînements par les parents et les orthophonistes. Qui plus est, le temps de travail effectué et les scores obtenus sont consultables sur une plateforme informatique qui permet le recueil précis et exhaustif des données. Ces données sont enregistrées et sauvegardées sans risque d'erreurs, de mauvaise interprétation ou de perte. Ces programmes numériques facilitent également la spécificité de l'intervention en permettant une adaptation des entraînements au profil sémiologique et à la progression de chaque LD, en accord avec le modèle PNI, *Pediatric Neurocognitive Interventions* (Limond et al., 2014). En effet, ce modèle PNI intègre le rôle du développement et de la maturation cognitive dans la planification de la rééducation, en adaptant les objectifs à l'âge et au développement de l'enfant (cf. Annexe 20, Harrar-Eskinazi, De Cara, Leloup, Denis-Noël, et al., 2022).

Partenariat familial et éducation thérapeutique

Pour optimiser l'adhésion des enfants aux entraînements intensifs, nous avons choisi de former les parents pour assurer les entraînements individuels et quotidiens à domicile. Nous les avons formés à utiliser de façon autonome les logiciels d'entraînement à l'aide de tutoriels. Les parents et les participants sont devenus de véritables experts dans le maniement des programmes d'intervention. Comme déjà formulé lors d'une précédente publication (cf.

Annexe 20, Harrar-Eskinazi, De Cara, Leloup, Denis-Noël, et al., 2022), à propos des informations et formations délivrées aux LD et leurs parents (page 391) : « *Nous leur avons fourni toutes les informations nécessaires sur la définition de la dyslexie, sur son impact sur la lecture et l'orthographe et sur les solutions de remédiation que nous proposons pour les soigner. Ces informations ont été répétées plusieurs fois et ont participé à la compréhension du soin, au maintien de l'engagement et à la motivation des participants. Leurs retours et ceux des LD nous ont permis d'améliorer et de préciser notre méthodologie de soin pour la rendre plus efficace. Les résultats obtenus aux différents temps de l'étude ont été communiqués très précisément pour soutenir l'engagement actif des enfants et des parents pendant toute la durée de l'intervention. Cette participation a été renforcée en demandant la présence systématique d'un des parents lors des différentes évaluations et lors des séances hebdomadaires. De surcroît, pendant la période de pandémie mondiale, les entraînements ont pu se poursuivre malgré le confinement. La présence constante de l'adulte a ainsi favorisé l'efficacité du programme de remédiation, en permettant l'étayage et le développement interactif de l'enfant afin de lui permettre d'accéder progressivement à la réussite de l'action en autonomie. Ce principe d'étayage rejoint le concept de Zone Proximale de Développement (Vygotsky & Piaget, 1997) et de dynamique temporelle d'apprentissage (Brossard, 2004). L'entraînement LARMA, proposé dans ce protocole, en est une illustration parfaite puisque l'enfant lit d'abord avec l'aide du parent pendant les premières étapes puis lit seul lors des deux dernières étapes.* »

Le tutorat parental a donc très certainement participé à favoriser le maintien des entraînements à long terme, ce qui a très probablement joué aussi un rôle dans l'efficacité de notre protocole d'intervention. En effet, ce concept de tutorat apparaît dans la méta-analyse de Neitzel et al. (2022) qui rapporte une taille d'effet dans la condition de tutorat individuel (0.41) deux fois plus élevée que dans la condition de tutorat en petit groupe (0.24). De plus, dans le système d'éducation anglo-saxon, l'effet est légèrement plus élevé quand le tutorat est assuré par un

assistant d'enseignement que par un enseignant spécialisé, les deux étant préalablement formés à appliquer des modèles de tutorats bien structurés (Gersten et al., 2020; Neitzel et al., 2022; Wanzek et al., 2016; Wanzek & Vaughn, 2007). Notre protocole de remédiation propose un tutorat individuel, assuré par les parents, eux-mêmes préalablement formés par l'orthophoniste, elle-même formée par l'investigatrice principale selon des modalités méthodologiques bien définies. L'avantage de ce tutorat individuel assuré par les parents est son absence de coût financier, contrairement au tutorat effectué dans les écoles (Neitzel et al., 2022). De plus, les parents ont été très fiers de participer à cette étude car ils ont pu aider leurs enfants dans un cadre méthodologique de soin précis et référencé, donc rassurant pour eux, et ce, d'autant plus s'ils ont été, au préalable, victimes d'errance thérapeutique. Ils se sont montrés très coopératifs, très reconnaissants. Ils étaient rassurés par le fait qu'une méthodologie de soin précise et justifiée leur soit proposée.

Ainsi, l'association des principes d'éducation thérapeutique et de partenariat familial, essentielle et indispensable à la réussite d'une remédiation cognitive (Seron & Van der Linden, 2016) a été optimisée dans notre étude. « *Ces principes ont permis de maintenir une participation active des parents et des enfants dans leurs décisions et leurs engagements de soin et de réduire la mortalité expérimentale inhérente aux contraintes importantes des entraînements intensifs* » (cf. Annexe 20, p.391, Harrar-Eskinazi, De Cara, Leloup, Denis-Noël, et al., 2022).

7.2. Effets sur la compréhension de lecture et l'orthographe

À l'issue de l'intervention, les LD ont amélioré leurs compétences en compréhension de lecture silencieuse. Comme attendu, la taille d'effet (0.9) était inférieure à la taille d'effet de l'amélioration de l'efficacité en lecture à voix haute (précision et vitesse de lecture). Nos

résultats confirment donc une différence des effets selon les compétences évaluées. Notamment, les effets sur les mesures en compréhension de lecture sont plus faibles que les effets sur les mesures en efficacité de lecture (voir les méta-analyses: Gersten et al., 2020; Hall et al., 2022; Neitzel et al., 2022). En effet, en intervenant directement sur les processus cognitifs sous-jacents et sur les procédures de lecture et l'orthographe, nous nous attendions à un effet plus distal sur les mesures de compréhension de lecture. Selon le modèle *Simple View of Reading* (Gough & Tunmer, 1986), les LD présentent une altération de l'identification du mot écrit, sans trouble de la compréhension orale. Donc si l'identification du mot écrit s'améliore à la suite d'une intervention, il est attendu que la compréhension de lecture s'améliore aussi, par effet de généralisation.

Comme attendu, à l'issue de notre protocole de remédiation, les participants ont aussi considérablement amélioré leurs compétences en orthographe ($d=0.78$). Comme nous avons veillé à introduire systématiquement dans tous les entraînements une production des mots écrits associée à la lecture, il est fort probable que cette interaction lecture/orthographe, optimisée par les entraînements des processus cognitifs sous-jacents ciblés et de la mémoire orthographique, ait favorisé simultanément l'amélioration de la lecture et de l'orthographe. Plus précisément, l'orthographe a renforcé la conscience des phonèmes et le principe alphabétique, essentiels à la lecture, tandis que la lecture a favorisé le développement des représentations orthographiques, essentielles à l'orthographe, toutes ces procédures étant elles-mêmes optimisées par les entraînements des processus cognitifs sous-jacents phonologiques, visuo-attentionnels et intermodalitaires altérés et de la mémoire orthographique. Il était donc attendu que l'orthographe phonologique ($d=0.6$) et lexicale ($d=0.69$) se soit améliorée de façon significative et que par conséquent ces effets se soient généralisés à l'orthographe grammaticale ($d=0.34$), par augmentation des ressources attentionnelles nécessaires au traitement morpho-syntaxique.

Cette amélioration de l'orthographe est comparable à celle rapportée par Morris et al.(2012) à l'issue d'un programme mixte ($d= 0.68$), associant l'entraînement de la conscience phonologique au programme RAVE-O (Wolf, Miller, et al., 2000) dont une composante est axée sur un enseignement explicite des stratégies orthographiques. Plus généralement, la méta-analyse de Galuschka et al. (2020), met en évidence l'effet important des interventions mixtes, associant des entraînements de la conscience phonologique, de la conscience morphologique et des *connaissances orthographiques*, sur les compétences en orthographe.

7.3. Gains à l'issue de chaque intervention

Outre l'analyse de l'amélioration des compétences en lecture et en orthographe à l'issue de l'intervention multimodale et multi-componentielle, nous avons aussi analysé ces améliorations à l'issue de chaque intervention PHO, VA et IM. Comme prédit, l'efficiencia en lecture d'un texte signifiant s'est améliorée à l'issue de l'intervention PHO ($d= 0.63$), de l'intervention VA ($d= 0.75$) et aussi de l'intervention IM ($d= 0.7$). En revanche, l'efficiencia en lecture d'un texte non signifiant s'est améliorée en lien avec les interventions PHO ($d= 0.69$) et VA ($d= 0.5$). Une autre étude (Zoubrinetzky et al., 2019) ayant évalué deux entraînements que nous avons utilisés dans notre protocole, rapporte des tailles d'effet similaires après un entraînement ciblé sur la perception catégorielle ($d= 0.45$) et un autre sur l'empan visuo-attentionnel ($d= 0.56$). Ces tailles d'effets ont été obtenues sur des mesures d'efficiencia en lecture de texte signifiant à l'issue d'une intervention d'une durée de 6 semaines, 5 jours par semaine, 15 min par jour, pour chaque entraînement, soit une durée totale de 7 heures et 30 minutes. Dans notre protocole, ces mêmes logiciels ont été combinés à d'autres entraînements au sein de deux interventions différentes PHO et VA dont la durée respective de chaque

intervention était de 10 heures. Les résultats de Zoubrinetzky et al. (2019) et nos résultats vont dans le même sens et soulignent l'efficacité des interventions ciblant les déficits cognitifs sous-jacents dans la remédiation de la dyslexie développementale.

Enfin, l'intervention IM est associée à une taille d'effet de 0.7 pour les mesures d'efficacité en lecture de texte signifiant mais n'améliore pas l'efficacité en lecture de texte non signifiant. Cette troisième et dernière intervention proposée dans notre protocole a pour objectif de renforcer le traitement intermodalitaire de l'intégration audio-visuelle afin d'automatiser la liaison entre le traitement des représentations orthographiques et le traitement des représentations phonologiques. L'intervention IM s'appuie sur le logiciel GraphoGame associé à un entraînement de lecture répétée et masquée. Selon, González et al. (2015) qui proposent une intervention légèrement différente, un entraînement ciblant l'intégration audio-visuelle de lettres et de sons améliore de façon significative la vitesse de lecture des mots plutôt que la précision. Cependant, cet essai contrôlé randomisé a été mené auprès d'enfants néerlandais, le néerlandais étant une langue transparente. Les 23 LD inclus avaient par conséquent une précision en lecture efficace mais une vitesse de lecture altérée. Dans notre étude, nous n'avons pas analysé les évolutions de la précision et de la vitesse de lecture séparément mais l'efficacité en lecture, globalement. Ainsi, nous ne pouvons pas en dire beaucoup plus. Il serait intéressant de le faire. Cependant, l'intervention IM a eu des effets sur la lecture d'un texte signifiant, texte qui favoriserait la lecture par adressage donc la vitesse. En revanche, l'intervention IM n'a pas eu d'effet sur la lecture d'un texte non signifiant, texte qui favoriserait plutôt la lecture par assemblage (voie sublexicale), et donc la précision, ce qui pourrait expliquer nos résultats. Après avoir mis en évidence une amélioration de la lecture à l'issue de chaque intervention, nous avons comparé les gains entre les deux groupes.

7.4. Ordre des interventions

Notre protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle a été expérimenté auprès de LD répartis aléatoirement dans deux groupes dont l'ordre des interventions était différent. Alors que nous ne nous attendions pas à une différence d'amélioration entre les deux groupes, nous espérions néanmoins pouvoir comparer les gains à l'issue de la première intervention du groupe PHO-VA, l'intervention phonologique, avec les gains à l'issue de la première intervention du groupe VA-PHO, l'intervention visuo-attentionnelle. Nous n'avons pas constaté de différence entre les deux groupes à l'issue de la première intervention, ni à l'issue des suivantes, ce qui était attendu puisque les entraînements étaient adaptés au profil sémiologique de chaque participant. Effectivement, les compétences en lecture et en orthographe s'améliorent significativement dès la première intervention qu'elle soit phonologique ou visuo-attentionnelle et continuent d'augmenter de façon significative avec la deuxième et la troisième intervention, ainsi que 2 mois après l'arrêt des entraînements, sans différence significative entre les deux groupes.

Cependant, alors qu'aucune différence n'apparaît entre les deux groupes concernant l'amélioration de l'efficacité en lecture et de l'orthographe, à l'issue de l'intervention la compréhension en lecture du groupe VA-PHO est meilleure que celle du groupe PHO-VA (alors que la compréhension ne différait pas de façon significative entre les groupes en Ligne de base Pré-intervention). Ainsi, les deux groupes présentaient initialement le même niveau de compétences en compréhension écrite et en lecture de texte. La seule différence initiale était que le groupe PHO-VA présentait des scores standardisés indiquant des déficits de l'analyse phonémique et de la DRA, plus marqués que dans le groupe VA-PHO. Ces déficits des processus phonologiques peuvent entraîner une vitesse de lecture plus lente et par conséquent une compréhension écrite plus altérée. Rappelons que le test que nous avons utilisé pour évaluer

la compréhension écrite prend en compte la vitesse de lecture. Ainsi, une amélioration de l'efficacité en lecture induit une amélioration de la compréhension écrite, telle que nous l'avons évaluée.

7.5. Effet de spécificité des interventions

Nous avons ensuite recherché un effet de spécificité des processus entraînés phonologiques et visuo-attentionnels. Comme nous l'avions supposé une amélioration des compétences en conscience phonologique sans amélioration des compétences en empan visuo-attentionnel est mise en évidence seulement à l'issue de l'intervention PHO et un profil inverse est mis en évidence à l'issue de l'intervention VA. Pour chaque type d'intervention PHO et VA, on observe un effet de spécificité avec une amélioration des performances liées aux processus ciblés alors que les performances liées aux processus non ciblés ne s'améliorent pas, entre le temps 2 et le temps 3. Le même schéma se retrouve entre le temps 3 et le temps 5 mais il nous manque une mesure intermédiaire au temps 4 pour pouvoir conclure. Ces effets souligneraient la spécificité des entraînements au sein de chaque intervention et renforceraient l'idée d'un lien entre ces processus cognitifs sous-jacents et l'efficacité en lecture. Ceci est notamment le cas entre T2 et T3 où les interventions PHO et VA sont administrées séparément dans chaque groupe, ce qui permet de les comparer l'une à l'autre. En revanche, entre T3 et T5, les interventions PHO et VA sont systématiquement suivies de l'intervention IM, sans point d'étape complet en T4, ce qui limite leur comparaison.

Les mêmes conclusions sont évoquées par Zoubrinetzky et collaborateurs dans leur étude interventionnelle en 2019, à l'issue de laquelle, outre leurs effets positifs sur la lecture, deux programmes successifs d'entraînement ciblant la perception catégorielle et la capacité d'attention visuelle ont amélioré respectivement ces processus. Enfin, nos résultats renforcent

aussi l'hypothèse d'une indépendance entre ces deux processus cognitifs phonologique et visuo-attentionnels. Cette indépendance, longtemps controversée, a été récemment mise en évidence par le dysfonctionnement de deux faisceaux neuronaux distincts de substance blanche, l'un en lien avec l'empan visuo-attentionnel et l'autre en lien avec les déficits phonologiques chez des LD (Liu et al., 2022).

7.6. Prédicteurs de la réponse à l'intervention

Enfin, pour nous aider à comprendre pourquoi certains enfants sont répondeurs moins bien que d'autres à ce protocole de remédiation, nous voulions mettre au jour les prédicteurs d'une bonne ou d'une moins bonne réponse à l'intervention. Comme attendu, la réponse à l'intervention a été moindre chez les participants ayant des compétences en lecture et des processus cognitifs sous-jacents phonologiques et visuo-attentionnels plus altérés, et plus précisément un déficit plus marqué de l'efficacité en lecture au test *Mouette-Pingouin*, de la suppression du premier phonème dans un pseudomot complexe au test *Evalec* et de l'empan visuo-attentionnel en report partiel au test *Evadys*. Les compétences d'efficacité en lecture initiales ont prédit l'amélioration des compétences en lecture à l'issue de l'intervention, confirmant les résultats de Scheltinga et al. (2010) et de Tilanus et al. (2019). En accord avec la littérature, la majorité des enfants qui présentent une faible réponse à l'intervention, ont un déficit plus marqué de la conscience phonologique (pour une revue voir Al Otaiba & Fuchs (2002); et voir les méta-analyses de Frijters et al., 2011; Galuschka et al., 2014; Ron Nelson et al., 2003; Tran et al., 2011). A notre connaissance, aucune étude n'a évalué l'impact du déficit de l'empan visuo-attentionnel sur la réponse à l'intervention. Cependant, l'étendue de l'empan visuo-attentionnel prédit la fluidité de lecture d'un texte (Valdois et al., 2021), est proportionnelle à la vitesse de lecture (Antzaka et al., 2017), et une intervention ciblant un

déficit de l'empan visuo-attentionnel augmente les compétences en lecture (Zoubrinetzky et al., 2019). Ainsi, il n'est pas étonnant que les participants ayant les scores les plus élevés à la tâche d'empan visuo-attentionnel en report partiel aient davantage de chance d'être parmi le groupe des *Très bons répondants* à l'intervention.

Concernant le niveau d'éducation de la mère, nos résultats ont mis en évidence qu'un faible niveau de scolarité augmentait la probabilité d'une moindre réponse du participant à l'intervention. Dans la mesure où de nombreuses études ont montré que, le statut socio-économique familial, est un des facteurs affectant la capacité de lecture (Hoff, 2003; Noble et al., 2006; Rowe & Goldin-Meadow, 2009), ces résultats n'étaient pas surprenants. En effet, le niveau socio-économique peut être influencé par trois dimensions : le revenu familial, le niveau de scolarité des parents et la profession des parents (Bornstein et al., 2003; Gottfried, 1985; Hauser, 1994). Le niveau de scolarité des parents (Sénéchal, 2006) et plus particulièrement celui de la mère (Van Steensel, 2006) serait positivement lié avec un environnement favorisant l'alphabétisation à la maison avant l'apprentissage de la lecture, c'est-à-dire via l'exposition aux livres d'histoires, l'enseignement de l'alphabet et de la lecture à la maison, lui-même prédicteur de meilleures compétences ultérieures en lecture (Hemmerechts et al., 2016).

Pour clore la discussion des prédicteurs, l'âge chronologique ne semble pas avoir beaucoup de conséquences sur la réactivité à l'intervention que nous avons expérimentée. Ce résultat renforce l'hypothèse que si la remédiation de la dyslexie développementale est fondée sur les déficits cognitifs sous-jacents et les déficits en lecture et en orthographe de chaque participant, son efficacité sera alors probante quel que soit l'âge des participants de notre échantillon. En effet si les entraînements sont adaptés aux déficits individuels, il est attendu d'obtenir des effets très similaires. Dans la littérature, des effets positifs plus élevés sont souvent rapportés chez les lecteurs plus jeunes (e.g., Al Otaiba et al., 2014; Connor et al., 2013; Lovett et al., 2017; Wanzek & Vaughn, 2007). Toutefois, Suggate (2010) rapporte des effets

plus importants chez les lecteurs plus âgés. Ces différences peuvent être dues à la façon dont les tailles d'effet sont calculées, à la durée des interventions, aux différents types d'intervention et aux diverses mesures utilisées, variables d'une étude à l'autre. Par exemple, les mesures expérimentales induisent des effets plus importants que les mesures standardisées (Lovett et al., 2017).

Un autre résultat inattendu est l'absence de pouvoir prédictif de la DRA. En effet, la DRA est un puissant prédictif des capacités d'apprentissage de la lecture et de l'orthographe chez des LD âgés entre 8 et 13 ans (Landerl et al., 2013), dans différentes langues alphabétiques (Di Filippo et al., 2006; Helland & Morken, 2016; Papadopoulos et al., 2016; Torppa et al., 2017; Zoccolotti et al., 2016). Par conséquent, il était attendu que les LD ayant des performances initiales plus faibles en DRA répondent moins bien à l'intervention, ce qui n'a pas été le cas. Une interprétation possible à ce résultat, serait que l'entraînement proposé dans notre protocole de remédiation a été particulièrement efficace, quel que soit le déficit initial présenté par le participant.

7.7. Impact de l'intervention dans la vie quotidienne

L'impact des effets de l'intervention dans la vie quotidienne et notamment la façon dont est perçu le trouble de la lecture et des apprentissages à l'issue de l'intervention, a été aussi l'objet d'une analyse. Comme prédit, l'intervention a amélioré l'intérêt pour la lecture, les performances scolaires et l'estime de soi, et cette amélioration s'est maintenue au moins deux mois après l'arrêt de l'intervention. Comme énoncé précédemment, il est largement décrit que les LD sont plus à risque de résultats scolaires et professionnels négatifs (pour une revue, voir Livingston et al., 2018) et qu'un diagnostic précoce et une remédiation adaptée augmentent le

bien-être scolaire et émotionnel des LD (Al Otaiba et al., 2009; Mathes et al., 2005) en participant à réduire les incidences négatives des difficultés de lecture (Ilaria et al., 2022; Nukari et al., 2022). Ces conclusions vont dans le sens de nos résultats qui rapportent que l'appétence et l'estime de soi en lecture, telles que nous les avons évaluées chez les participants et leurs parents, s'améliorent de façon significative sous l'effet de l'intervention multimodale et multi-componentielle. Plus précisément, les participants ayant effectué tous les entraînements du protocole augmentent leur appétence et leur plaisir à lire, et perçoivent une amélioration de la qualité de leur lecture et de leur compréhension de lecture. Les compétences et l'estime de soi scolaires s'améliorent également mais plus lentement. Les participants perçoivent une augmentation de leurs résultats scolaires et de leur potentielle réussite scolaire et déclarent avoir plus de plaisir à aller à l'école. Si l'on considère les preuves solides de l'existence d'un lien entre les troubles de la lecture et les troubles de l'anxiété généralisée et l'anxiété liée à l'école (Carroll et al., 2005; Willcutt & Pennington, 2000), nos résultats sont très encourageants et montrent qu'une intervention efficace pourrait avoir un impact positif sur ces troubles. Fait intéressant, ces améliorations sont également perçues par les parents, et ce, probablement en lien avec l'application de l'éducation thérapeutique, du partenariat familial et du renforcement positif lors de la remédiation cognitive. Ainsi, ces effets positifs peuvent s'expliquer par les répercussions directes de l'amélioration en lecture et en orthographe sur la perception de l'impact du trouble de la lecture mais aussi par les répercussions indirectes de l'environnement familial.

7.8. Limites de l'étude

Groupe contrôle

La principale limite de cette étude est l'absence d'un groupe contrôle. La comparaison avec un groupe contrôle de LD recevant un entraînement non spécifique (par exemple en mathématiques) est normalement nécessaire pour contrôler la spécificité des effets des entraînements. De plus, un groupe contrôle de LD sans entraînement est nécessaire pour contrôler les éventuels effets *Hawthorne*, placebo (Berthelot, 2016) et *retest* (McArthur, 2007). Toutefois, un entraînement non spécifique assigné aléatoirement pendant 16 mois, n'était pas éthiquement envisageable et augmentait le risque de refus de participation à l'étude. D'après Bhide et al. (2018), inclure un groupe contrôle avec une intervention placebo ou une absence d'intervention pour valider une intervention expérimentale, alors qu'il existe des données probantes de la supériorité de l'intervention expérimentale sur les autres conditions, est contraire à l'éthique. Néanmoins, prendre le risque de conclure à tort à l'efficacité d'un traitement alors qu'il ne l'est pas est aussi contraire à l'éthique. Nous avons alors considéré le fait que les gains obtenus avec un entraînement non spécifique dans un groupe témoin avec un contrôle « inter-sujet » peuvent être supérieurs ou inférieurs aux gains avec un contrôle « intra-sujets » et que ceci peut conduire à une surestimation ou à une sous-estimation de la taille de l'effet (McArthur et al., 2015). Par conséquent, nous avons fait le choix d'un contrôle « intra-sujets » pour évaluer les gains non liés au traitement tout en respectant les exigences éthiques et scientifiques dans un contexte de faisabilité clinique.

Nous sommes tout à fait conscients que cette solution n'est pas idéale dans la mesure où la période contrôle « intra-sujets » ne dure que deux mois avec un rythme d'intervention de l'orthophoniste hebdomadaire alors que la période d'intervention dure plus de 6 mois avec un rythme d'intervention quasi-quotidien. Par conséquent, ces deux périodes d'intervention ne sont pas réalisées sur la même durée et à la même intensité et ne peuvent être comparées. Pour cette raison, nous envisageons de répliquer l'étude avec un groupe contrôle de participants en

attente de traitement pour augmenter les validités externe (effet Hawthorne) et interne (effet développemental) de l'étude.

Effet test-retest

Une autre limite importante, liée à la précédente, est la question de l'effet *retest*. La répétition d'un test lors de mesures répétées contribue à augmenter la taille de l'effet après une intervention. Cet effet *retest* est dû à trois facteurs : le premier est l'effet d'apprentissage de la tâche, le deuxième est la réduction de l'anxiété ou l'augmentation de familiarité face aux tests, et le troisième est le développement de stratégies et de compétences spécifiques aux tests (Hausknecht et al., 2007). En ce qui concerne l'évaluation répétée de la lecture de texte chez des lecteurs dyslexiques ou des normolecteurs, aucune donnée sur les effets *retest* n'a été trouvée. Pour d'autres mesures, il semblerait que la lecture de pseudomots entraîne moins d'effets *retest* que la lecture de mots dans des échantillons cliniques (McArthur, 2007). Dans le domaine de l'évaluation répétée des capacités cognitives, une récente méta-analyse (Scharfen et al., 2018) indique que le gain dû à l'effet *retest* est généralement plus grand à la deuxième passation qu'à la troisième à un intervalle de temps de trois mois puis se stabilise après la troisième passation (Bartels et al., 2010; Scharfen et al., 2018). D'après la méta-analyse de Scharfen et al. (2018), l'effet *retest* est équivalent à un demi écart-type, entre la première et la quatrième passation dans des échantillons sains (Scharfen et al., 2018). Soulignons que l'effet *retest* est en partie atténué par la présentation de versions alternatives du test (Hausknecht et al., 2007; Scharfen et al., 2018) et qu'il est plus faible d'environ un écart-type dans les échantillons cliniques que dans les échantillons sains (Kulik et al., 1984).

Pour les tests *DeltaText*, *Mouette-Pingouin* et *Chronosdictées* dont les versions alternatives ont contribué à atténuer l'effet *retest* au Temps 2, le biais d'effet *retest* est peu probable. Pour les tests *L'Alouette* et *L3-ORLEC*, sans versions alternatives et présentant un

effet *retest* au Temps 2, ce biais est à prendre en considération. Cependant, nous n'avons pas besoin ici d'interpréter les résultats du test *L'Alouette* dans la mesure où les résultats au test *DeltaText* et *Mouette-Pingouin* sont significatifs. Mais si nous avions eu à le faire, ce qui est nécessaire dans un contexte d'évaluation clinique, il est fort probable que l'effet *retest* soit très faible entre les Temps 2 et 6, pour quatre raisons : la première est que le texte est lu par des LD (échantillon clinique) ; la deuxième est que le texte n'a pas de sens ; la troisième est que l'effet *retest* est plus important au Temps 2 et diminue au Temps 3 puis se stabilise (Scharfen et al., 2018) ; la quatrième est que si l'amélioration de la lecture est significative au test *DeltaText*, il est fort probable qu'elle le soit au test de *L'Alouette*, les deux tests évaluant la lecture de textes non significatifs. Pour ce qui concerne l'interprétation des résultats au test *L3-ORLEC*, l'effet *retest* a sans doute contribué au gain en compréhension écrite ($d = 0.9$) mais l'intervalle *test-retest* étant plus long entre les Temps 2 et 5 (9 mois) qu'entre les Temps 1 et 2 (3 mois), l'effet *test-retest* est sans doute minimisé. Même, en étant très prudents et en soustrayant un demi écart-type qui correspond à l'effet *retest* pour les échantillons sains (Scharfen, 2018), la taille d'effet de l'amélioration de la compréhension en lecture serait alors de $d = 0.4$.

Néanmoins, plusieurs arguments peuvent nous laisser penser que les améliorations rapportées ne sont pas seulement la conséquence de l'enseignement scolaire ou des effets *retests* : l'utilisation de trois comparateurs pour évaluer l'efficacité en lecture, l'ampleur des gains en lecture de textes significatifs et non significatifs, l'absence d'amélioration pendant la période pré-intervention et les effets de généralisation sur les compétences en orthographe et en compréhension écrite. Concernant le premier point, nous avons utilisé des tests standardisés pour évaluer les participants tout au long de l'intervention. Pour comparer les scores en lecture, nous avons eu recours à trois mesures : deux mesures issues de tests standardisés (*L'Alouette* et *Mouette-Pingouin*) et une mesure issue d'un test non standardisé dont nous ne sommes pas les auteurs (*DeltaText*). Or, il a été démontré que les mesures élaborées par les chercheurs pour

les besoins de leur étude ont des tailles d'effets considérablement « gonflées » par rapport aux mesures issues de tests standardisés (Cheung & Slavin, 2012; de Boer et al., 2014). Ainsi, en utilisant trois comparateurs dont deux tests standardisés, les effets obtenus qui sont forts et homogènes aux trois tests, appuient la robustesse de nos résultats.

Il est admis que les difficultés de lecture sont durables, ne disparaissent pas spontanément et que les LD ne rattrapent pas leur retard en matière de lecture sans entraînement intensif et spécifique (Juel, 1988; Parrila et al., 2004; S. E. Shaywitz et al., 1999; M. J. Snowling et al., 2007). Nous avons en effet mis en évidence que des entraînements multimodaux, multi-componentiels, intensifs, spécifiques et adaptés au profil sémiologique de chaque LD améliorent les compétences en lecture. De plus, les troubles persistants de la lecture et de l'orthographe peuvent être associés à une perte substantielle de la qualité de vie (Stein et al., 2011). Or, les LD de notre échantillon ont amélioré leur estime de soi concernant leurs compétences en lecture, leurs résultats scolaires et surtout leur appétence à la lecture, ce qui impliquerait une augmentation de l'exposition à l'écrit et donc une amélioration de leurs compétences en lecture sur le long terme. Un suivi de leurs compétences 6 mois et un an après est prévu dans la suite de nos analyses.

Une autre originalité de notre étude, qui selon nous est un point fort et peut-être même une des raisons majeures de son efficacité, peut aussi compenser l'absence de groupe contrôle : afin d'éprouver la spécificité de l'intervention, des mesures supplémentaires pré et post-entraînement ont été systématiquement effectuées au sein de chaque programme d'intervention. Ainsi, nous avons mesuré, sur des temps définis a priori, les processus spécifiques ciblés par l'entraînement, les compétences en lecture ou en orthographe pour lesquelles une généralisation est attendue et les processus non spécifiques à l'entraînement pour lesquels aucun effet n'est attendu. Ces résultats n'ont pas encore été analysés statistiquement mais ont permis un

jugement clinique pour ajuster les entraînements individuellement et s'assurer de leur effet et de leur spécificité.

Puissance statistique

Concernant la taille de l'échantillon requise pour tester statistiquement notre hypothèse, nous l'avons calculée avec un risque de première espèce à 5 % et une puissance à 95 % (cf. Annexe 1, Harrar-Eskinazi, De Cara, Leloup, Nothelier, et al., 2022). Cependant, nous n'avons pas tenu compte de l'effet multi-niveaux imputable aux différents investigateurs dans ce calcul car nous ne savions pas, a priori, si tous les investigateurs allaient inclure un ou plusieurs participants. Comme certains investigateurs ont inclus plusieurs participants, il serait pertinent d'ajouter la structure multi-niveaux dans les analyses, une fois l'étude terminée. Le fait que nous n'avons pas inclus dans les analyses statistiques présentées dans cette thèse, les données des participants qui ont abandonné en cours d'intervention ($n = 43$) constitue une autre limite. Cependant, en effectuant ces analyses en « intention de traiter », les résultats étaient similaires aux résultats obtenus après les analyses « par protocole ». Finalement, nous avons choisi de présenter les analyses « par protocole » où seules les données des participants ayant terminé le traitement sont prises en compte car elles permettent une estimation plus juste de l'effet du traitement et de l'effet de spécificité de chaque entraînement. Selon les recommandations pour l'utilisation des modèles linéaires à effets mixtes (Meteyard & Davies, 2020), nous avons refait les analyses en faisant varier le codage des variables (scores normés ou scores bruts), la présence ou l'absence de covariable ou des valeurs aberrantes, toutes les données ou les données partielles. Les résultats sont restés étonnamment stables, sans variation des valeurs de p . Nous avons aussi effectué des analyses en utilisant la méthode plus classique des ANOVAs à mesures répétées (cf. Annexe 20, Harrar-Eskinazi, De Cara, Leloup, Denis-Noël, et al., 2022). Les effets rapportés sont toujours équivalents à ceux présentés dans ce chapitre.

Chapitre 6. Étude de cas multiples

Dans le chapitre 5, nous avons mis en évidence une nette amélioration des compétences en lecture et en orthographe à l'issue d'un protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle basée sur l'entraînement des processus cognitifs sous-jacents phonologiques, visuo-attentionnels et intermodalitaires. Nous nous sommes alors demandée si les profils sémiologiques individuels des participants avaient évolué à l'issue de cette intervention et de

quelle manière. Pour rappel, le profil sémiologique d'un LD inclut son profil cognitif (i.e., son niveau de compétences phonologiques et visuo-attentionnelles) et son profil comportemental (i.e., son niveau de compétences en lecture et en orthographe). En accord avec les modèles à déficits multiples, nous allons examiner quelles sont les processus cognitifs altérés ou « facteurs de risque » et les compétences préservées ou « facteurs de protection » chez des LD de notre échantillon et plus particulièrement, les chevauchements des différents déficits cognitifs sous-jacents (DCSJ) caractérisant l'hétérogénéité des profils cognitifs (participants qui présentent plusieurs types de déficits). Puis, nous effectuerons une étude longitudinale de ces profils cognitifs du Temps 1 au Temps 6, afin de mettre en relation la diminution des DCSJ et celle des troubles de la lecture.

1. Méthode

La méthode est identique à celle décrite dans le chapitre 5 pour l'essai clinique randomisé. Le tableau 6.1 présente les performances moyennes (i.e., scores bruts) des participants aux Temps 1 et 5¹⁶ sans distinction de groupe. Les performances de l'échantillon à ces deux temps sont comparées à l'aide du test *t* de Student pour échantillons appariés. Les valeurs de *p* sont indiquées après correction de Bonferroni. Les résultats montrent que les performances sont significativement meilleures au temps 5 qu'au temps 1 pour toutes les variables mesurées excepté les variables mesurant la focalisation attentionnelle (interférence issue du niveau global ou local), l'empan visuo-spatial, et la perception du trouble de la lecture par les parents. En ce qui concerne les variables dont l'amélioration est significative, les *d* de Cohen indiquent des tailles d'effet modérées à grandes.

¹⁶ Ici, nous choisissons de présenter les moyennes et écart-types des participants au Temps 5 car au Temps 6, seules les performances en lecture de texte (signifiant et non-signifiant) ont été évaluées.

Tableau 6.1

Moyennes des scores bruts et écarts-types au Temps 1 et au Temps 5 des participants ayant effectué tout le protocole (n = 93)

	Temps 1 Moyennes (<i>et</i>)	Temps 5 Moyennes (<i>et</i>)	t de Student	Valeur de p	d de Cohen
Age lecture – âge chronologique	-29.52 (13.2)	-11.98 (18.7)	-7.34	<.001***	1.08
Alouette efficience	145.18 (78.7)	235.06 (110.9)	-6.32	<.001***	0.93
DeltaText efficience	132.9 (72.1)	193.72 (91.5)	-5.02	<.001***	0.74
Mouette/Pingouin (MCL/2 min)	124.67 (64.9)	183.51 (77.9)	-5.579	<.001***	0.82
EVAL2M MCL (MCL/2min)	106.04 (37.4)	141.35 (38)	-6.3639	<.001***	0.94
Mots réguliers efficience	9.12 (3.2)	11.21 (3.2)	-4.5662	<.001***	0.66
Mots irréguliers efficience	7.97 (3.2)	10.45 (3.5)	-5.1308	<.001***	0.74
Pseudomots efficience	4.8 (2.4)	7.31 (2.8)	-5.9519	<.001***	0.97
Compréhension écrite (RC/36)	16.86 (8.2)	23.54 (7.8)	-5.81	<.001***	0.83
Orthographe (nombre d'erreurs)	42.24 (16.5)	30.27 (16.5)	4.8381	<.001***	0.72
Segmentation syllabe (efficience)	229.77 (123.2)	290.85 (95.6)	-3.6074	<.001***	0.55
Segmentation phonème CVC (eff)	250.75 (124.3)	336.74 (111.1)	-4.87	<.001***	0.73
Segmentation phonème CCV (eff)	139.28 (87.4)	232.6 (101.5)	-6.63	<.001***	0.98
Empan phonologique	4.3 (0.9)	4.7 (0.9)	-2.702	0.008**	0.43
DRA efficience	207.78 (61.9)	251.21 (70.3)	-4.25	<.001***	0.65
Seuil de lettre (ms)	68.08 (18.4)	50.39 (13.3)	7.5448	<.001***	1.1
Empan global VA de lettres	3.36 (0.7)	3.89 (0.6)	-5.11	<.001***	0.76
Empan partiel VA de lettres	4.09 (0.7)	4.57 (0.6)	-5.2323	<.001***	0.76
Interférence/global TE	0.04 (0.1)	0.03 (0.1)	0.67	0.502	0.1
Interférence/global TR (ms)	47.91 (90.9)	45.75 (68.6)	0.0767	0.939	0.02
Interférence/local TE	0.01 (0)	0.01 (0)	0.4787	0.633	0.09
Interférence /local TR (ms)	34.75 (60)	30.43 (52.2)	0.4201	0.675	0.07
Empan chiffres endroit	4.53 (0.9)	4.88 (0.8)	-2.4942	0.014*	0.4
Empan chiffres envers	2.72 (1.5)	3.47 (1.1)	-3.64	<.001***	0.56
Empan visuospatial endroit	5.3 (1)	5.53 (0.9)	-1.5029	0.135	0.24
Empan visuospatial envers	4.93 (1.1)	5.14 (1.2)	-1.1294	0.26	0.19
Questionnaire Enfant (Likert)	36.18 (7.6)	39.03 (7)	-2.6065	0.011**	0.39
Questionnaire Parent (Likert)	33.2 (6.1)	35 (6.6)	-1.6631	0.101	0.28

Note : *et* : écart-type ; efficience en lecture de textes Alouette et DeltaText : (mots corrects/temps)*180 ; efficience de lecture de texte Mouette/Pingouin et de mots EVAL2M : mots corrects lus en 2 min ; mots réguliers, irréguliers et pseudo-mots efficience : % de mots corrects/temps ; compréhension écrite RC = nombre de réponses correctes/36, segmentation de phonèmes CVC : Consonne-Voyelle-Consonne et CCV : Consonne-Consonne-Voyelle efficience : % de réponses correctes/temps ; DRA efficience : dénomination rapide automatisée de couleurs en % de réponses correctes/temps ; seuil de lettre : identification de lettre en ms, VA : visuo-attentionnel ; Interférence/global : interférence issue du global ; interférence/local : interférence issue du local ; TE : taux d'erreur ; TR : temps de réponse en ms ; vocabulaire en dénomination efficience : % réponses correctes/temps, RC : réponses correctes ; NE : nombre d'erreurs.

2. Prévalence des compétences altérées et préservées

2.1. Objectif et hypothèses

Afin de rendre compte de la complexité sémiologique présentée par les LD de notre échantillon, nous avons analysé la prévalence des compétences altérées et préservées. Nous nous attendions à ce que l'intelligence non verbale, la compréhension orale et le vocabulaire passif ne soient pas altérés, contrairement aux compétences en lecture, en orthographe et aux compétences phonologiques et visuo-attentionnelles, puisqu'il s'agissait d'un critère d'inclusion. Puis nous avons analysé les chevauchements entre les compétences phonologiques et visuo-attentionnelles et au sein de chaque domaine de compétence afin de mettre en évidence une majorité de profils cognitifs mixtes. Autrement dit, combien de participants présentaient plusieurs DCSJ à la fois phonologiques, visuo-attentionnels et de la dénomination rapide automatisée ? Et enfin combien de participants présentaient plusieurs DCSJ phonologiques (à la fois de la conscience phonologique, de la mémoire phonologique à court terme et de la dénomination rapide) et plusieurs DCSJ visuo-attentionnels (à la fois de l'empan visuo-attentionnel global et/ou partiel et de la focalisation attentionnelle globale/locale) ?

2.2. Analyses statistiques

Nous avons utilisé des analyses de déviations pour évaluer la prévalence des processus cognitifs dont les scores sont supérieurs ou égaux à 1,5 écarts-types au-dessous de la moyenne des données normatives (*Déficits*) et ceux dont les scores sont supérieurs ou égaux à 1,5 écarts-types au-dessus de la moyenne des données normatives (*Forces*). Pour mettre en évidence les chevauchements entre les DCSJ, nous les avons illustrés par des diagrammes de Venn à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2021) version 4.1.2 et du package *ggVennDiagram* (Gao, 2023).

2.3. Résultats

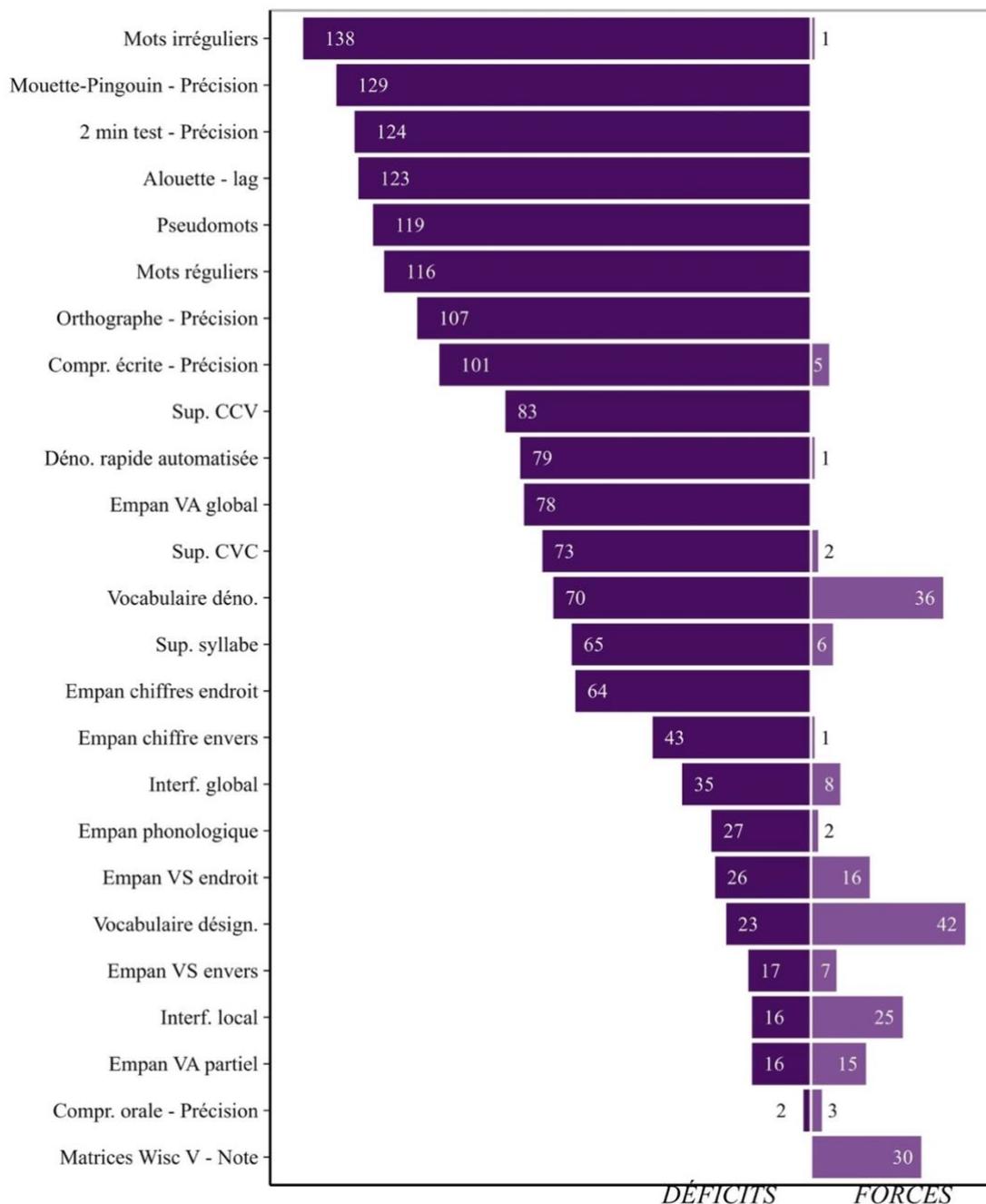
La Figure 6.1 met en évidence la prévalence des *Déficits* (cf. Figure 6.1, panel de gauche). Comme attendu chez les LD, les *Déficits* relevés pour cet échantillon concernent, par ordre décroissant de prévalence, la lecture et l'orthographe, la conscience phonologique, la dénomination rapide automatisée, l'empan visuo-attentionnel global, le vocabulaire actif, la conscience syllabique et la mémoire verbale à court terme.

Par ailleurs, la Figure 6.1 met aussi en évidence la prévalence des *Forces* (panel de droite). Comme attendu chez le LD, les *Forces* relevées concernent, par ordre décroissant de prévalence, le vocabulaire actif, le vocabulaire passif et l'intelligence non verbale. Il est intéressant de noter que quelques participants peuvent aussi être très performants dans les tâches qui mesurent l'interférence issue du local, l'empan visuo-spatial endroit, l'empan visuo-attentionnel partiel et l'interférence issue du global. Soulignons que, selon les participants, le vocabulaire actif et passif, l'interférence issue du local et du global, l'empan visuo-spatial endroit et envers et l'empan visuo-attentionnel partiel peuvent être soit des *Déficits* et soit des *Forces*.

Enfin, certaines capacités ne sont ni des *Déficits* ni des *Forces* selon nos critères préalablement définis mais se situent entre 1.5 et -1.5 écarts-types de la moyenne des données normatives. Ainsi, ces capacités varient le long d'un continuum de compétences, allant des *Déficits* aux *Forces*, en passant par la moyenne et rajoutent de la variabilité aux profils cognitifs. Cette analyse illustre parfaitement l'hétérogénéité et la complexité des profils cognitifs des LD.

Figure 6.1

Prévalence des déficits (-1,5 écarts-types) et des forces (+1,5 écarts-types) de l'échantillon total



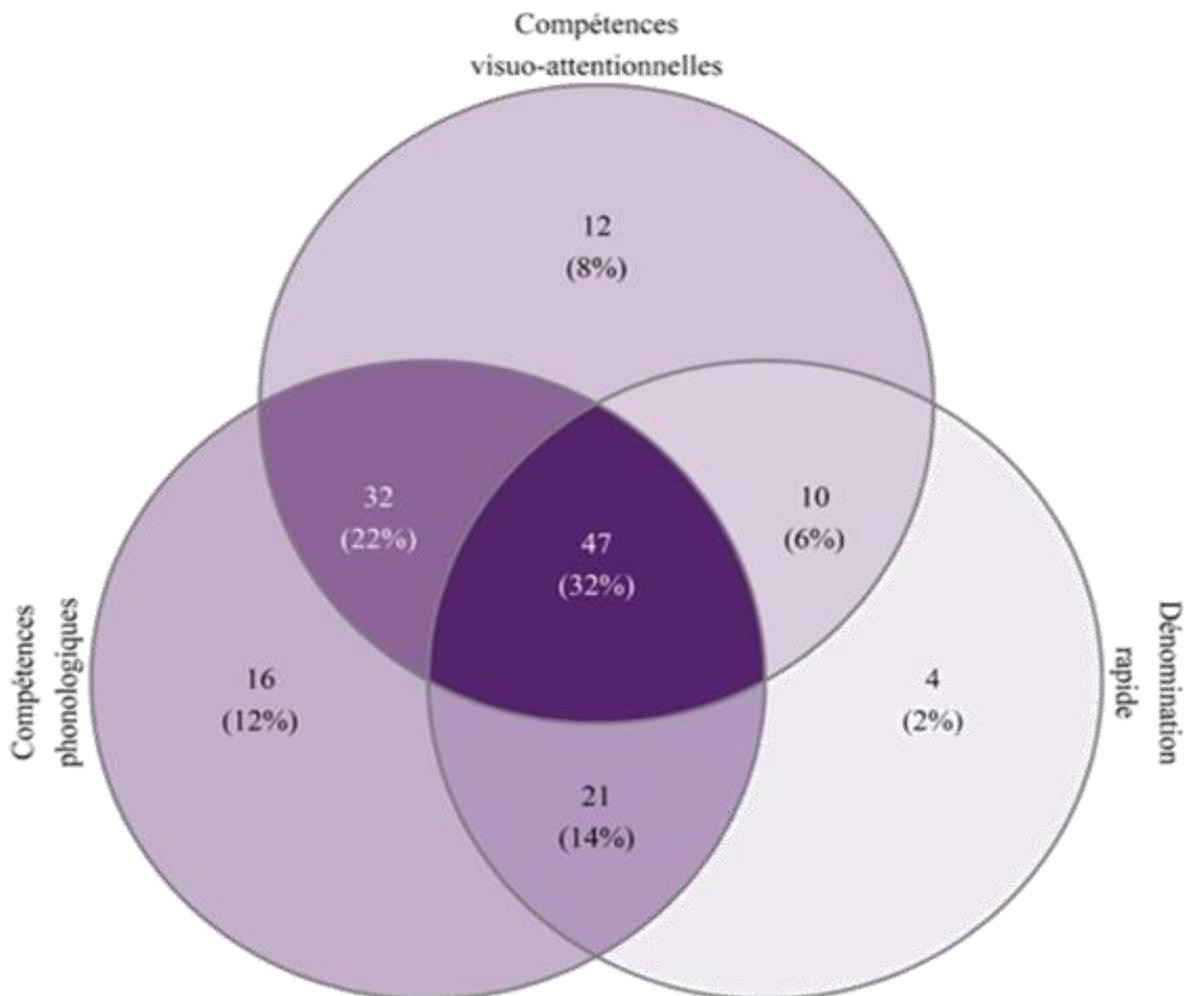
Note. Les chiffres indiquent le nombre de participants présentant soit un déficit soit une force pour chaque variable. Mots irréguliers, réguliers et pseudomots (score d'efficacité) ; Mouette-Pingouin (nombre de mots corrects lus) ; 2 min test (nombre de mots lus) ; Alouette lag (différence entre l'âge de lecture et l'âge chronologique en mois) ; Orthographe (nombre d'erreurs) ; Compr. écrite (compréhension écrite, réponses correctes en 5 minutes) ; sup. CCV, CVC (suppression de phonème) ; sup. syllabe (suppression de syllabe) ; Empan VA global et partiel (empan visuo-attentionnel en report global ou partiel) ; Vocabulaire déno. (vocabulaire actif) ; Interf. global et Interf. local (interférence issue du global et interférence issue du local) ; Empan VS (empan visuo-spatial) ; Compr. orale (compréhension orale, réponses correctes).

Après avoir analysé les *Déficits* et les *Forces* de notre échantillon, nous avons analysé les chevauchements entre les différents processus phonologiques (conscience phonologique et/ou mémoire phonologique à court terme), visuo-attentionnels (empan visuo-attentionnel et/ou focalisation attentionnelle *globale/locale*) et de dénomination rapide automatisée. Au total, 80% des LD présentent un déficit phonologique, 70% des LD un déficit visuo-attentionnel, et 54% un déficit de la dénomination rapide automatisée. Si l'on admet que la dénomination rapide automatisée est un déficit d'accès aux représentations phonologiques, 88% des LD présentent un déficit phonologique.

Il est intéressant de noter que 74% des LD présentent des profils cognitifs mixtes incluant au moins deux de ces déficits et que 47% des LD présentent les trois déficits (cf. Figure 6.2). Soulignons que 2% ont un déficit isolé de la dénomination rapide automatisée, 8% un déficit isolé des processus visuo-attentionnels et 16% un déficit isolé des processus phonologiques.

Figure 6.2

Diagramme de Venn présentant le nombre et le pourcentage de participants ayant des performances déficitaires dans 1, 2, ou 3 domaines de compétences : phonologique, visuo-attentionnelle et de dénomination rapide automatisée



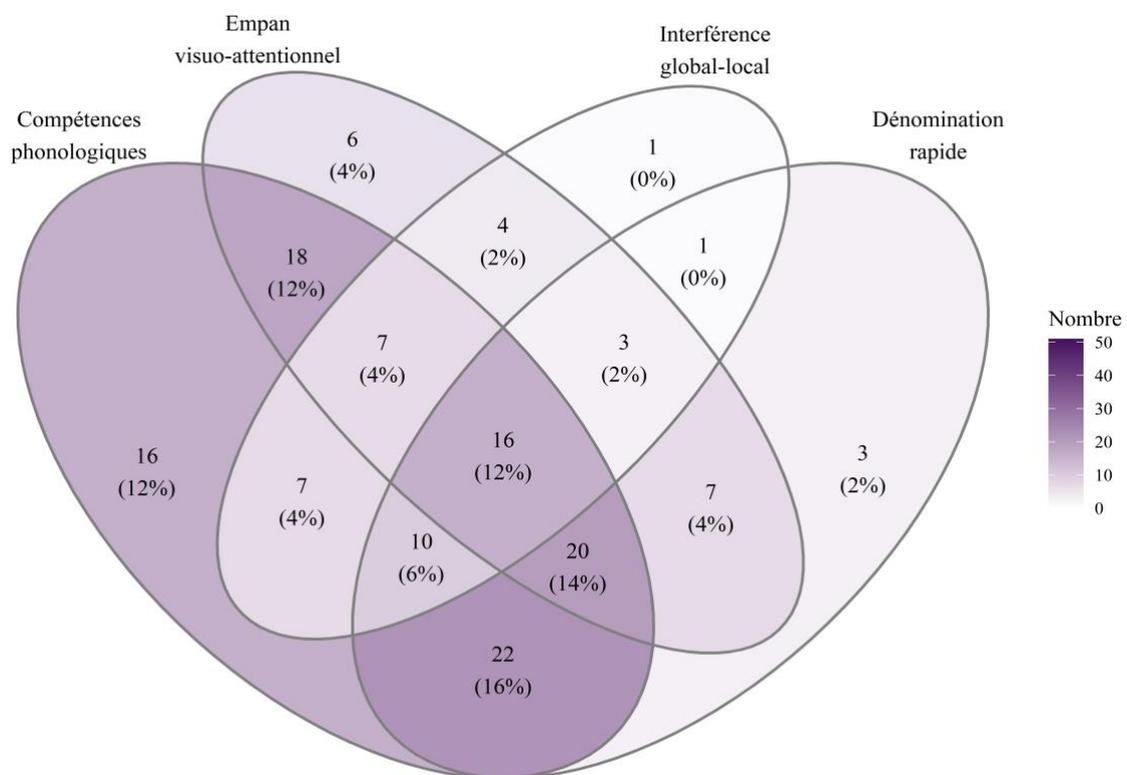
Note. Seuil pathologique fixé à - 1,5 écarts-types. Les chiffres correspondent aux nombres de participants présentant le déficit. Les pourcentages indiqués entre parenthèses correspondent au rapport entre le nombre de participants présentant le déficit et le nombre total de participants. Les couleurs représentent, par ordre décroissant d'intensité la prévalence pour chaque sous-ensemble du diagramme de Venn.

Au sein de chaque type de processus visuo-attentionnels et phonologiques, nous avons ensuite voulu déterminer comment se répartissaient les différents DCSJ et quels étaient leurs chevauchements avec les déficits de la dénomination rapide automatisée (cf. Figure 6.3). Ce second diagramme de Venn indique une prévalence équivalente entre le déficit de l'empan

visuo-attentionnel en report global et/ou partiel (57%) et le déficit de la dénomination rapide automatisée (54%), ainsi qu'une plus faible prévalence du déficit de focalisation attentionnelle sur les modes global et/ou local (30%). Les différents profils de DCSJ et leur variabilité se dessinent à la lumière des différents chevauchements du diagramme de Venn, illustrés par l'intensité des couleurs. Ainsi, les déficits les plus fréquemment associés sont les déficits de l'empan visuo-attentionnel et des compétences phonologiques (42%).

Figure 6.3

Diagramme de Venn illustrant le nombre et le pourcentage de participants présentant un déficit des compétences phonologiques (conscience phonologique et mémoire phonologique à court terme), de la dénomination rapide automatisée, de l'empan visuo-attentionnel, de l'interférence issue des modes global ou local.



Note. Seuil pathologique fixé à - 1,5 écart-type. Les chiffres correspondent aux nombres de participants présentant le déficit. Les pourcentages indiqués entre parenthèses correspondent au rapport entre le nombre de participants présentant le déficit et le nombre total de participants. Les couleurs représentent, par ordre décroissant d'intensité la prévalence pour chaque sous-ensemble du diagramme de Venn.

Pour aller plus loin, et dans la mesure où nous avons adapté les entraînements aux déficits individuels, au sein de chaque intervention de notre protocole de remédiation (cf.

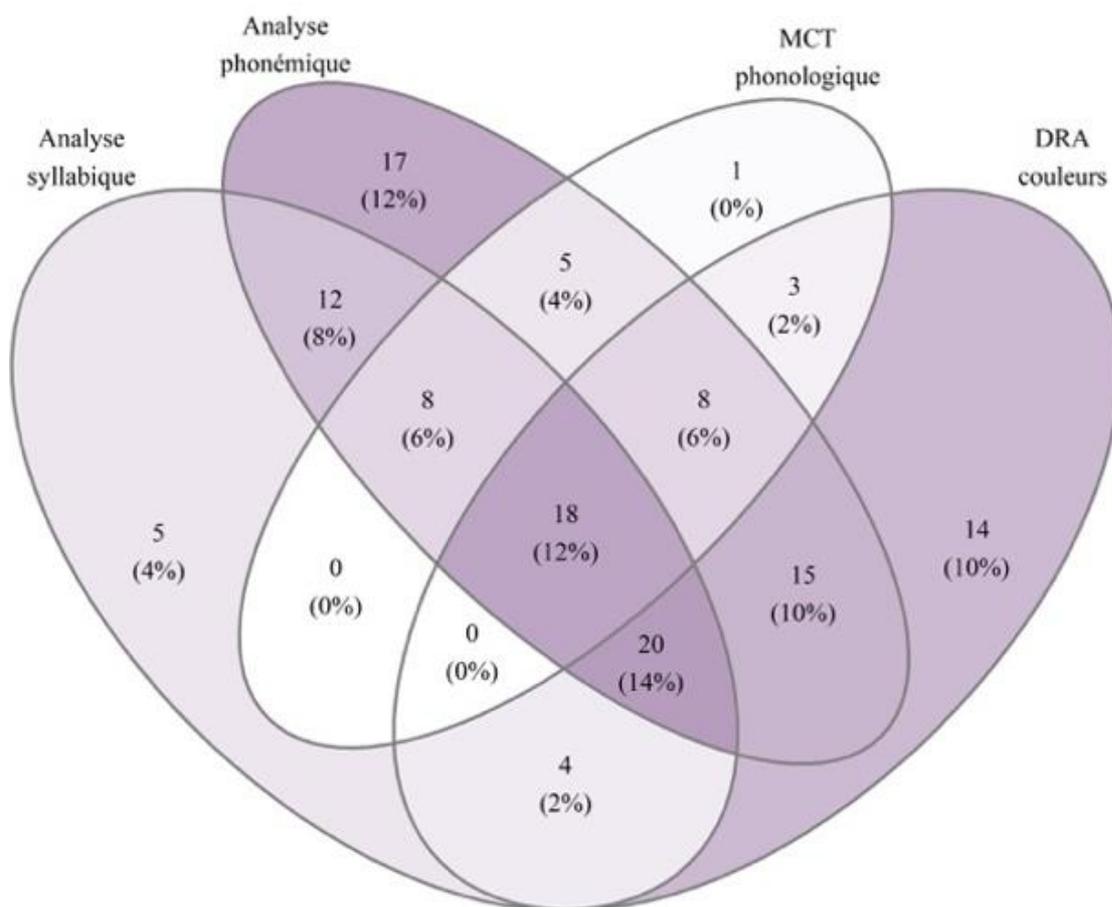
chapitre 5), nous nous sommes demandé comment les profils cognitifs variaient pour chaque modalité, soit visuo-attentionnelle, soit phonologique. Parmi les LD présentant des DCSJ visuo-attentionnels, le diagramme de Venn de la Figure 6.4 indique par ordre décroissant de fréquence que 54% des LD présentent un déficit de l'empan visuo-attentionnel global, 26% présentent un déficit de l'interférence issue du global, 12% un déficit de l'empan visuo-attentionnel partiel et 10% un déficit de l'interférence issue du local.

Les combinaisons de DCSJ visuo-attentionnels peuvent combiner trois déficits (4%), deux déficits (22%) ou un seul déficit (46%).

phonologique à court terme, triples déficits de la dénomination rapide automatisée, de l'analyse syllabique et phonémique, doubles déficits de la dénomination rapide automatisée et de l'analyse phonémique.

Figure 6.5

Diagramme de Venn illustrant le nombre et pourcentage de participants présentant les différents sous-types de déficits phonologiques



Note. Seuil pathologique fixé à - 1,5 écarts-types. Le temps de réponse a été aussi pris en compte pour la mesure de l'empan phonologique (MCT phonologique). Les chiffres correspondent aux nombres de participants présentant le déficit. Les pourcentages indiqués entre parenthèses correspondent au rapport entre le nombre de participants présentant le déficit et le nombre total de participants. Les couleurs représentent, par ordre décroissant d'intensité la prévalence pour chaque sous-ensemble du diagramme de Venn.

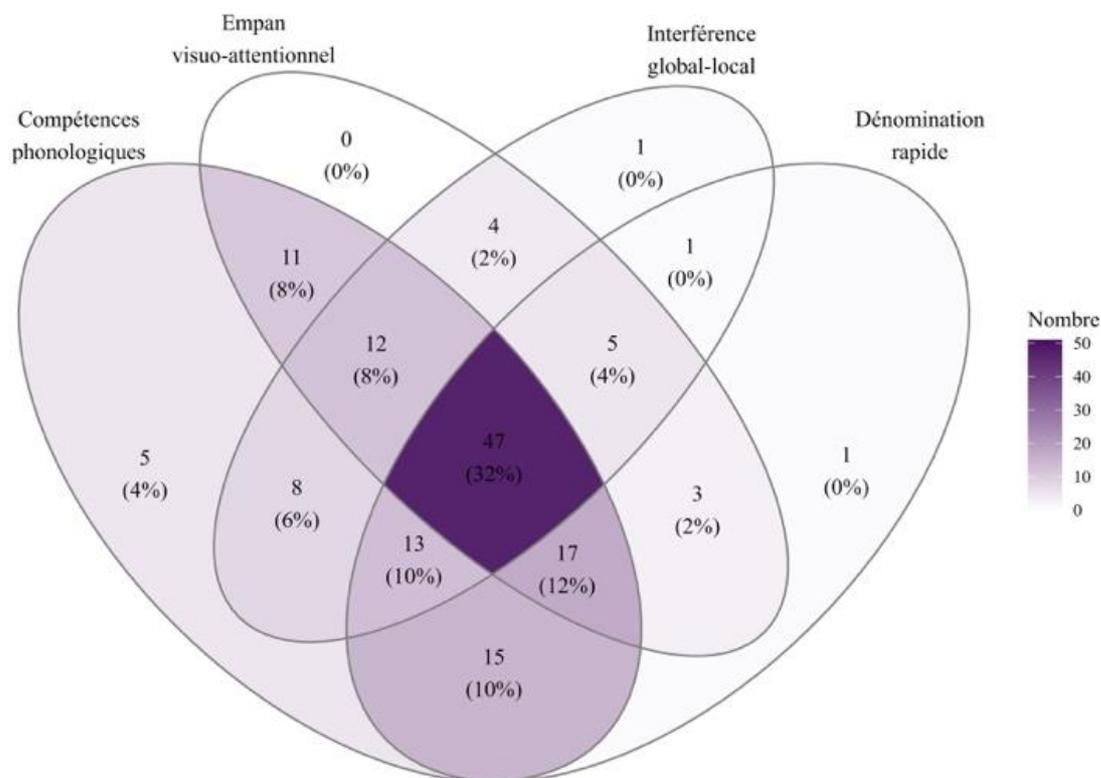
Enfin, notre dernière interrogation concernant l'hétérogénéité des DCSJ portait sur leur prévalence à un seuil pathologique moins sévère de 1 écart-type en dessous de la moyenne des

données normatives. Cette analyse était justifiée d'une part, par le concept de multi-déficits de la dyslexie développementale, selon lequel plusieurs déficits modérés peuvent induire un trouble de la lecture. D'autre part, à la suite d'une erreur de programmation détectée dans le logiciel *Sigl*, les participants identifiés initialement comme déficitaires (avec un score se situant à 1.5 écarts-types en dessous de la moyenne des données normatives) étant beaucoup moins nombreux, nous avons cherché à connaître la prévalence de ces déficits à un seuil de -1 écart-type. Pour rappel, le logiciel *Sigl* évalue la focalisation attentionnelle sur un mode d'analyse visuelle global ou local. Après correction de l'erreur de programmation du logiciel *Sigl*, 91 participants présentaient des déficits au seuil de 1 écart type, alors que le nombre était de 51 pour un seuil de 1,5 écarts-type (cf. Figure 6.6).

Le diagramme de Venn présenté en Figure 6.6 illustre les chevauchements entre les différents DCSJ phonologiques (conscience phonologique et/ou mémoire phonologique à court terme), visuo-attentionnels (empan visuo-attentionnel et/ou focalisation attentionnelle *globale/locale*) et de dénomination rapide automatisée dont les scores se situent à 1 écart-type en dessous de la moyenne. Au total, 95% des participants présentaient des déficits multiples et seulement 5% des participants présentaient un déficit unique. Fait intéressant, 32% des participants présentaient les quatre déficits.

Figure 6.6

Diagramme de Venn illustrant le nombre et pourcentage de participants présentant des déficits phonologiques, visuo-attentionnels et de dénomination rapide automatisée



Note. Seuil pathologique fixé à - 1 écart-type. Les chiffres correspondent aux nombres de participants présentant le déficit. Les pourcentages indiqués entre parenthèses correspondent au rapport entre le nombre de participants présentant le déficit et le nombre total de participants. Les couleurs représentent, par ordre décroissant d'intensité la prévalence pour chaque sous-ensemble du diagramme de Venn.

2.4. Synthèse

Les *Déficits* les plus fréquents concernent les compétences en lecture, en orthographe et les compétences phonologiques et visuo-attentionnelles. Les *Forces* les plus fréquentes concernent les compétences en vocabulaire et l'intelligence non verbale. Ces résultats montrent que ces capacités qui varient le long d'un continuum de compétences, allant des *Déficits* aux *Forces*, en passant par des scores moyens, contribuent à la variabilité des profils cognitifs.

Nous avons observé un déficit phonologique dans tous les processus testés et plus particulièrement un déficit de l'analyse phonémique et syllabique chez 80% des participants, un déficit de la dénomination rapide automatisée chez 54% des participants et un déficit de la mémoire phonologique à court terme chez 30% d'entre eux. Par ailleurs, 57% des LD présentaient des troubles de l'empan visuo-attentionnel et 30% des LD présentaient des troubles de la focalisation attentionnelle sur les modes d'analyse global ou local. Au total, 70% des LD présentent un déficit visuo-attentionnel, 80% un déficit phonologique et 54% un déficit de la dénomination rapide automatisée. L'examen des différents profils cognitifs des LD de notre échantillon a mis en évidence une hétérogénéité des DCSJ. Cette hétérogénéité se caractérise de deux manières. La première est illustrée par des déficits hétérogènes entre les trois domaines de compétences évalués : phonologique, visuo-attentionnel et de dénomination rapide. Nous la nommerons hétérogénéité *inter-compétences*. La deuxième est définie par des déficits hétérogènes au sein d'un même domaine de compétence soit phonologique, soit visuo-attentionnel. Nous la nommerons hétérogénéité *intra-compétence phonologique* ou *visuo-attentionnelle*.

L'hétérogénéité *inter-compétences* varie selon le seuil pathologique appliqué. À un seuil pathologique fixé à un score au-delà de 1.5 écarts-types en dessous de la moyenne, 75 % des LD ont un profil cognitif mixte caractérisé par des combinaisons de DCSJ multiples très différentes. À un seuil pathologique fixé à 1 écart-type en dessous de la moyenne, 95% des LD ont un profil cognitif mixte.

L'hétérogénéité *intra-compétence phonologique* se caractérise par un, deux, trois ou quatre DCSJ de l'analyse syllabique et/ou de l'analyse phonémique et/ou de la mémoire phonologique et/ou de la dénomination rapide automatisée, dont les multiples combinaisons aboutissent à des profils de déficits phonologiques hétérogènes. De la même manière, l'hétérogénéité *intra-compétence visuo-attentionnelle* se caractérise par de multiples

combinaisons entre les DCSJ de l'empan visuo-attentionnel global et/ou partiel et/ou de l'interférence issue du global et/ou de l'interférence issue du local qui définissent des profils de déficits visuo-attentionnels hétérogènes à un, deux, trois ou quatre déficits.

3. Évolution des déficits cognitifs sous-jacents et des compétences en lecture

3.1. Objectifs et hypothèses

Après avoir examiné la prévalence et les chevauchements des DCSJ au Temps 1, nous nous sommes intéressés à l'évolution longitudinale de ces déficits à un niveau individuel, à l'issue de l'intervention aux Temps 5 et 6, à la fin de notre protocole de remédiation. Au vu des résultats de l'analyse de groupe exposés dans le chapitre précédent, nous pensions qu'après les entraînements intensifs, les processus cognitifs sous-jacents altérés allaient s'améliorer pour chaque participant. De plus, nous nous attendions à ce que cette amélioration des processus cognitifs sous-jacents induise une amélioration des compétences en lecture.

3.2. Analyses statistiques

Pour tester nos hypothèses, nous avons effectué dans un premier temps une analyse des DCSJ de chaque participant au Temps 1 et au Temps 5, afin de préciser la combinaison de déficits propre à chacun. Puis, une analyse a précisé combien de participants présentent la même combinaison de DCSJ au Temps 1 et au Temps 5. Dans un deuxième temps, nous avons analysé la répartition des participants en fonction du nombre de DCSJ. Enfin des analyses de corrélation de Spearman ont décrit la relation entre l'efficacité en lecture et le nombre de DCSJ.

3.3. Résultats

Comme attendu, l'étude de cas multiples met en évidence chez les participants inclus au Temps 1, une majorité de profils cognitifs mixtes et hétérogènes dont l'analyse dévoile 23 combinaisons différentes de DCSJ phonologiques et visuo-attentionnels (score inférieur ou égal à 1.5 écarts-types au-dessous de la moyenne) pouvant inclure de 5 à 1 DCSJ. Les analyses de déficits pour chaque cas individuel sont décrites dans les Annexes 23 et 24. Il est intéressant de noter qu'après l'intervention, au Temps 5, nous relevons encore 24 combinaisons différentes de DCSJ mais que chaque combinaison inclut moins de déficits.

Une analyse de ces profils cognitifs indique qu'au Temps 1, les participants ont en moyenne 3 DCSJ et qu'aucun participant ne présente 0 DCSJ. En revanche, au Temps 5, les participants ont en moyenne 1 seul DCSJ et 31 participants présentent 0 déficit. Le Tableau 6.2 présente le pourcentage de participants présentant jusqu'à cinq déficits des processus cognitifs sous-jacents au Temps 1 puis au Temps 5. Les combinaisons de déficits par participant et le nombre de participants par combinaisons de déficits sont détaillés dans les Annexes 23 et 24. Annexes 23 et 24.

Tableau 6.2*Prévalence du nombre de déficits pré et post-intervention, au Temps 1 et au Temps 5*

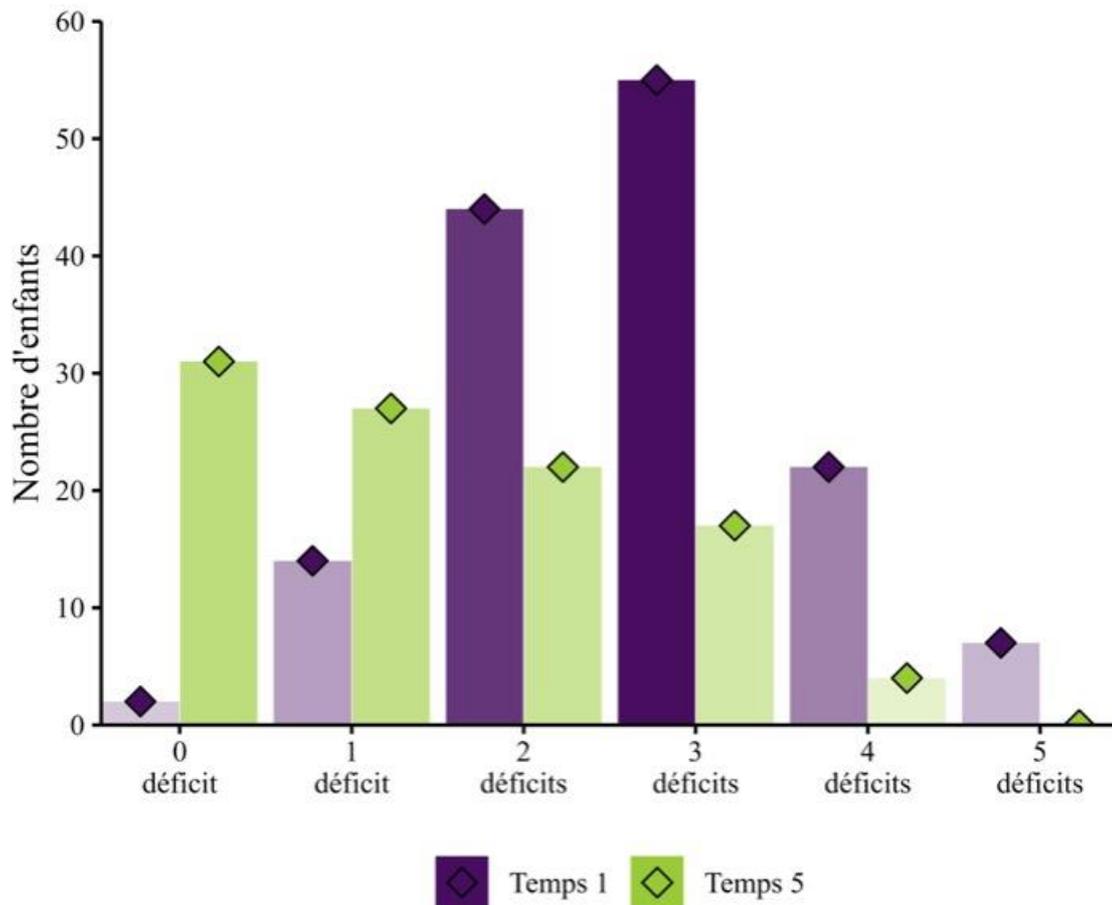
Nombre de déficits	Pourcentage de participants au Temps 1	Pourcentage de participants au Temps 5
0	0	30,69 %
1	9,72 %	26,73 %
2	30,55 %	21,78 %
3	28,19 %	16,83 %
4	15,27 %	3,96 %
5	4,86 %	0 %

Note. Ce tableau est une synthèse des résultats présentés en Annexes 23 et 24. Les pourcentages ont été calculés par rapport aux données normatives de chaque test.

La figure 6.7 illustre plus clairement le rapport entre le nombre de DCSJ et le nombre de participants au Temps 1 et au Temps 5. Comme indiqué dans le tableau précédent, le nombre de participants ayant 0 à 1 DCSJ augmente, entre le Temps 1 et le Temps 5, alors que le nombre de participants ayant 2 à 5 DCSJ diminue. De plus, l'analyse individuelle des profils montre que parmi les 31 participants n'ayant plus de DCSJ, 23 ne présentent plus de trouble de la lecture.

Figure 6.7

Répartition des participants en fonction du nombre de déficits phonologiques et visuo-attentionnels pour chaque temps

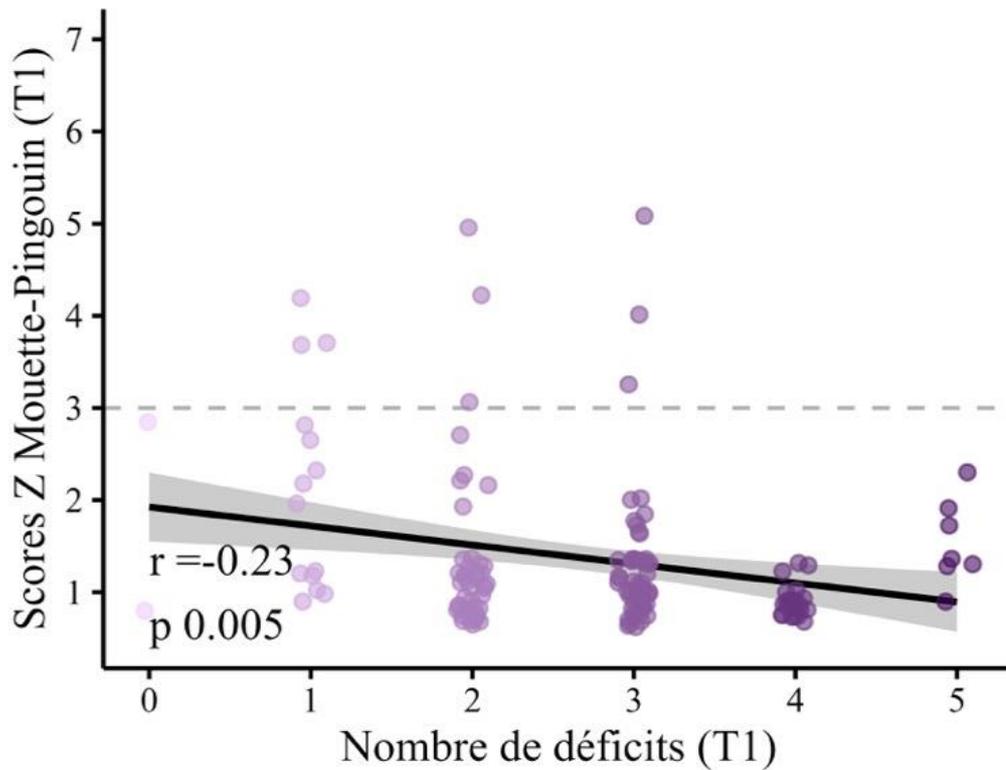


Note. Les déficits sont définis par un score supérieur ou égal à 1,5 écarts-types au-dessous de la moyenne. L'intensité des couleurs augmente avec l'effectif.

L'analyse de corrélation indique que, au Temps 1 comme au Temps 5, plus le nombre de DCSJ est important, plus l'efficacité en lecture au test DeltaText est altérée (Temps 1 : $r = -0.27$, $p < .001$, cf. Figure 6.8 ; Temps 5 : $r = -0.43$, $p < .001$, cf. Figure 6.9).

Figure 6.8

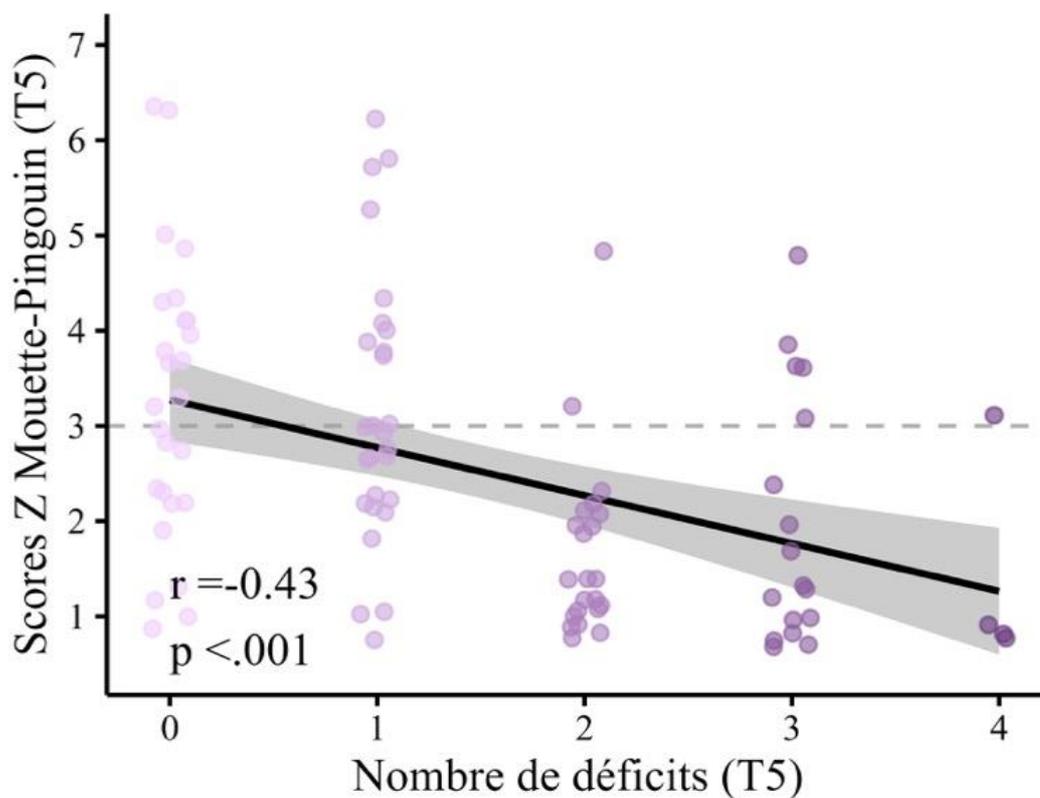
Analyse de corrélation entre le nombre de déficits et l'efficacité en lecture au Temps 1



Note. Les points représentent les données individuelles. La ligne noire correspond à la pente de corrélation. La zone grisée indique l'intervalle de confiance. r est le coefficient de corrélation de Spearman, p indique le seuil de significativité de la corrélation : $p = .005$. La ligne en pointillé gris indique les scores qui se situent entre les centiles 21 à 38. Au-dessus de cette ligne les scores correspondent aux moyennes attendues pour l'âge.

Figure 6.9

Analyse de corrélation entre le nombre de déficits et l'efficacité en lecture au Temps 5



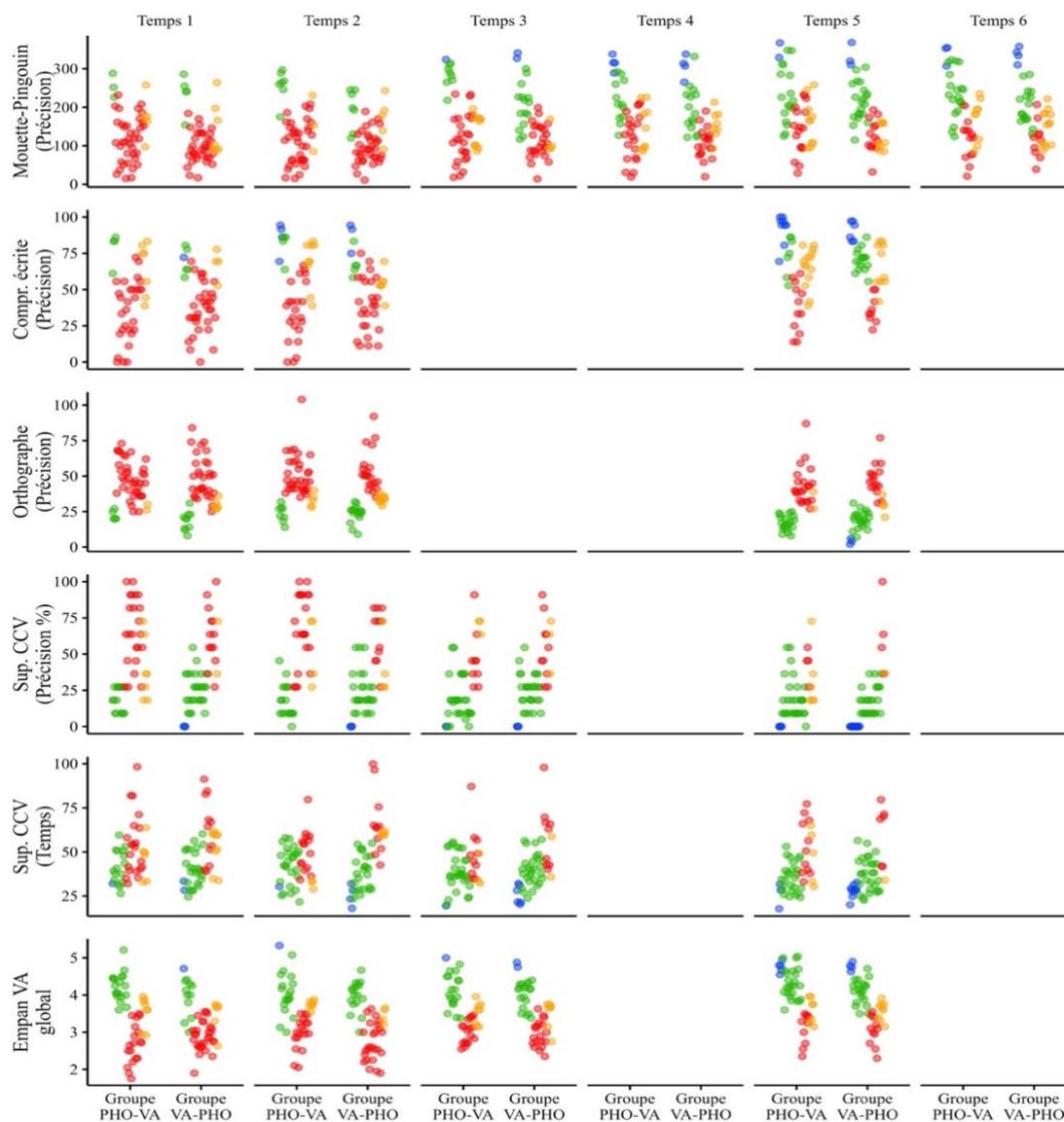
Note. Les points représentent les données individuelles. La ligne noire correspond à la pente de corrélation. La zone grisée indique l'intervalle de confiance. r est le coefficient de corrélation de Spearman, p indique le seuil de significativité de la corrélation : $p = .005$. La ligne en pointillé gris indique les scores qui se situent entre les centiles 21 à 38. Au-dessus de cette ligne les scores correspondent aux moyennes attendues pour l'âge.

Afin d'illustrer l'amélioration des troubles de la lecture et des DCSJ, nous avons analysé leur évolution longitudinale au travers des Temps de l'intervention, sur la base des scores standardisés pour chaque participant (calculés à partir des données normatives de chaque test pour chaque participant). La Figure 6.10 illustre l'amélioration de l'efficacité en lecture, de la compréhension écrite, de l'orthographe, de la suppression de phonèmes et de l'empan visuo-attentionnel global, selon un continuum de niveau de compétences : compétences altérées (rouge), fragiles (jaune), normales (vert) et fortes (bleu). La diminution progressive des points

rouges et l'augmentation des points verts et bleus indique l'amélioration des processus cognitifs altérés et l'amélioration des compétences en lecture et en orthographe, pour chaque participant.

Figure 6.10

Évolution des performances pour chaque groupe et à chaque Temps.



Note. Pour chaque variable, l'axe des ordonnées représente les scores bruts tandis que la couleur des points représente le niveau de performances des participants sur la base des scores standardisés. Pour les épreuves de lecture (*Mouette-Pingouin*), les participants ayant des scores supérieurs au centile 81 sont représentés en bleu, des scores compris entre le centile 21 et 80 en vert, des scores compris entre le centile 7 et 20 en orange et des scores inférieurs au centile 7 en rouge. Pour l'épreuve de *compréhension écrite*, les points rouges correspondent au quartile 4, les points orange au quartile 3, les points verts au quartile 2, et les points bleus au quartile 1. Pour les épreuves d'*orthographe*, de *suppression de phonème dans les syllabes complexes* et d'*empan visuo-attentionnel global*, les points rouges correspondent aux participants dont les scores standardisés sont inférieurs à $-1,5$ écarts-types, les points orange à ceux dont les scores sont compris entre -1 et $-1,5$ écarts-types, les points verts à ceux dont les scores sont compris entre -1 et $+1$ écarts-types et les points bleus à ceux dont les scores sont supérieurs à $+1$ écart-type.

Ici, il faut souligner un fait très intéressant : l'analyse individuelle des scores standardisés par rapport aux données normatives, (cf. Annexe 25) montre que 51 participants sur 98 (52%) ont normalisé leur score en lecture au test *Mouette-Pingouin* (lecture d'un texte signifiant) à l'issue de l'intervention au Temps 6 ; 19 participants (19%) conservent un trouble modéré de la lecture ; 28 participants (28,5%) présentent encore un trouble sévère de la lecture par rapport aux données normatives bien qu'ils aient augmenté leur efficacité en lecture par rapport aux scores bruts (nombre de mots correctement lus en 2 minutes).

Au Temps 5, parmi les 98 participants qui ont normalisé leurs scores en lecture, 28 participants ne présentent plus aucun DCSJ. Parmi 27 participants qui présentent encore un seul DCSJ, 17 ont normalisé leur score en lecture au test *Mouette-Pingouin*. En revanche, parmi les 22 participants qui présentent encore 2 DCSJ, seulement 3 ont normalisé leur score en lecture au test *Mouette-Pingouin*. Enfin, parmi les 17 participants qui présentent encore 3 DCSJ, seulement 5 n'ont plus de trouble de la lecture et parmi 5 participants qui présentent 4 DCSJ, un seul ne présente plus de trouble de la lecture.

Nous clôturons cette section par un focus particulier sur l'évolution longitudinale de *l'âge de lecture* des participants tout au long ce protocole de remédiation multimodale et multi-composante. Cette analyse est motivée par le fait que *l'âge de lecture* est une mesure clinique très pertinente qui indique au thérapeute, au participant et aux parents, l'ampleur du décalage entre le niveau de lecture et l'âge réel. Par conséquent, il s'agit d'une mesure simple pour apprécier l'amélioration du trouble de la lecture et pour motiver le participant à poursuivre les entraînements lorsque l'écart entre l'âge réel et l'âge de lecture se réduit. La Figure 6.11 illustre l'évolution de l'âge de lecture de 93 participants, mesuré par le test de *L'Alouette* des Temps 1 à 6.

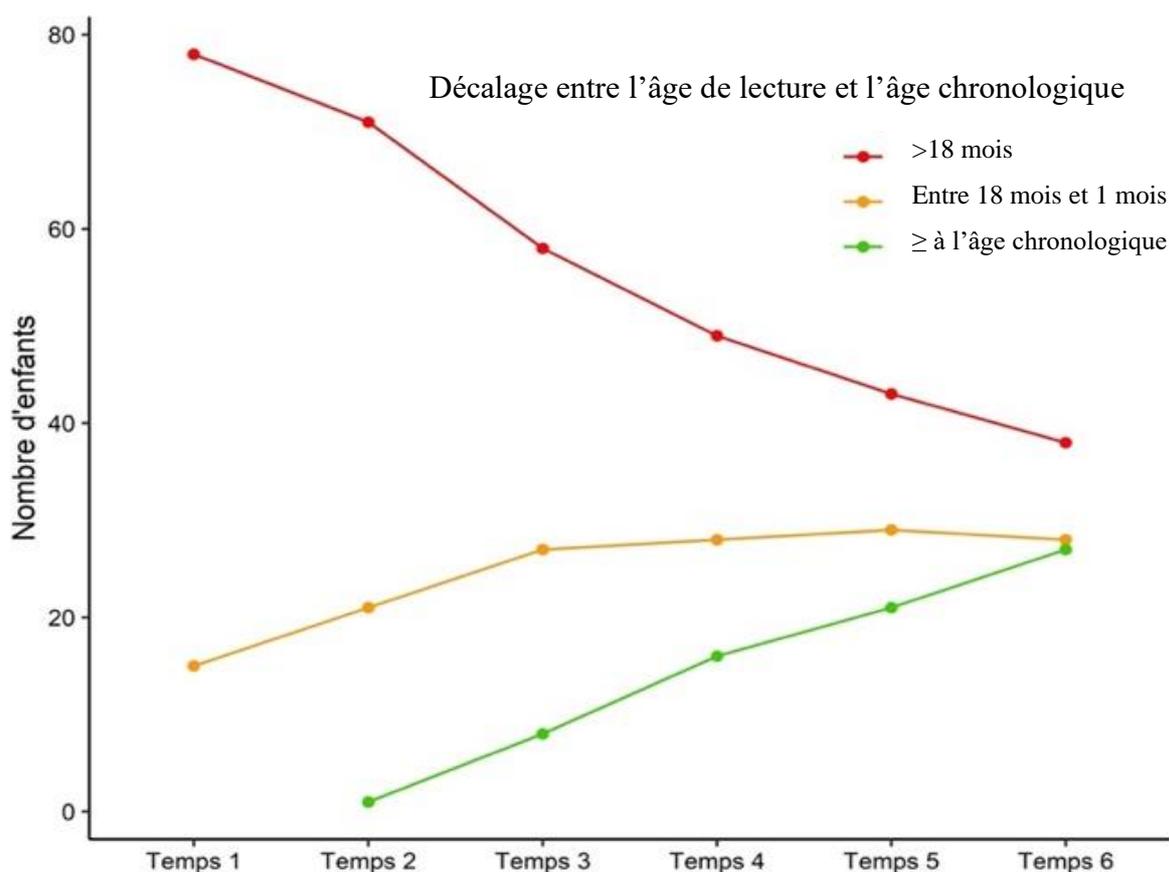
Les résultats individuels sont présentés en Annexe 25 pour tous les participants. Au Temps 1, la différence négative entre *l'âge de lecture* et l'âge chronologique est supérieure à

18 mois pour 90% des participants. Au Temps 6, seulement 42% des participants présentent encore une telle différence pathologique. Soulignons qu'en même temps 43% des participants ne présentent plus aucun déficit en lecture ou plus précisément, 42 enfants sur 97 présentent un écart entre l'âge de lecture au test *L'Alouette* et l'âge chronologique inférieur ou égal à 6 mois (pour le détail des scores individuels, voir l'Annexe 25). Les autres participants présentent soit un déficit modéré (14%) avec un écart compris entre 7 mois et 17 mois, soit un déficit sévère (42%), avec un écart supérieur à 18 mois.

Les pourcentages de participants présentant une lecture efficiente ou encore altérée au Temps 6 sont indiqués dans le Tableau 6.3. Ces pourcentages ont été calculés à partir du tableau présenté en Annexe 25. Même si certains participants présentent toujours une efficacité en lecture altérée, les participants ont majoritairement amélioré leur efficacité en lecture au cours de l'intervention. Néanmoins, nous avons relevé six participants *Non Répondants* pour lesquels l'évolution positive de l'âge de lecture entre le Temps 1 et le Temps 6 est inférieure ou égale à 4 mois (cf. Annexe 25, participants indiqués en rouge).

Figures 6.11

Évolution de l'âge de lecture des participants



Note. Le décalage entre l'âge de lecture et l'âge chronologique est exprimé en mois. L'âge de lecture est calculé en fonction du nombre d'erreurs et de la vitesse de lecture du test *L'Alouette* (étalonnage de Lefavrais, 1967). Les points rouges indiquent un âge de lecture inférieur à l'âge chronologique, d'au moins 18 mois. Les points orange indiquent une différence entre l'âge de lecture et l'âge chronologique, comprise entre 18 mois et 1 mois. Les points verts indiquent un âge de lecture supérieur ou égal à l'âge chronologique.

Tableau 6.3

Efficiences en lecture de texte signifiant (*Mouette-Pingouin*) et de texte non signifiant (*L'Alouette*) au Temps 6

	Lecture efficiente	Déficit modéré	Lecture déficitaire
<i>Mouette-Pingouin</i>	52 %	19 %	28 %
<i>L'Alouette</i>	43 %	14 %	42 %

Note. Ce tableau est une synthèse des résultats présentés en Annexe 25. Les pourcentages ont été calculés par rapport aux données normatives de chaque test. Tous les participants ont amélioré leur efficacité en lecture sauf six participants *Non Répondants*.

3.4. Synthèse

Comme attendu, avant le protocole de remédiation multimodale et multi-composante, l'examen individuel des DCSJ met en évidence une constellation de combinaisons de déficits, très variables d'un participant à l'autre. Fait intéressant, plus un participant présente un nombre élevé de DCSJ, plus l'efficacité en lecture initiale est altérée.

À l'issue de l'intervention, l'examen longitudinal de l'évolution des profils individuels montre une diminution de ces DCSJ et 30% des participants ne présentent plus aucun DCSJ phonologique et visuo-attentionnel. L'observation des scores standardisés en fonction des données normatives indique que les performances de lecture, de compréhension écrite, d'orthographe, de segmentation phonémique et d'empan visuo-attentionnel en report global s'améliorent progressivement tout au long de l'intervention.

En ce qui concerne l'efficacité en lecture d'un texte signifiant, 71% des participants ne présentent plus de déficit pathologique à l'issue de l'intervention et cette évolution est en lien avec une diminution du nombre de DCSJ au Temps 5. Soulignons qu'à l'issue de l'intervention, 52% des participants ont une lecture efficace.

Ces résultats suggèrent que d'une part, les manifestations de la dyslexie développementale constituent un tableau clinique complexe et hétérogène impliquant des DCSJ très variables, au-delà des troubles de la lecture et de l'orthographe. D'autre part, l'identification de ces DCSJ permet d'adapter individuellement la remédiation afin de les cibler et ainsi optimiser l'augmentation de l'efficacité en lecture. De fait, bien que les troubles de la lecture et de l'orthographe soient les symptômes les plus visibles conduisant le plus souvent au diagnostic clinique de dyslexie développementale, selon les critères du DSM-5, il n'en reste pas moins vrai que plusieurs DCSJ peuvent être altérés et par conséquent être entraînés de façon

active dans la remédiation de la dyslexie développementale, comme nous l'avons fait dans notre étude.

4. *Clusters* de profils cognitifs

4.1. Objectifs et hypothèses

L'idée d'explorer l'éventualité d'un regroupement des profils cognitifs en *clusters* a été motivée par la grande hétérogénéité des DCSJ illustrée par la multitude de combinaisons de déficits phonologiques et visuo-attentionnels mis en évidence précédemment. Nous voulions élargir la notion de profils cognitifs que nous avons définie sur la base d'un seuil pathologique conventionnel recommandé par le DSM-5. Cette notion de déficit était restrictive dans la mesure où elle était basée sur un seuil pathologique prédéfini et par conséquent n'intégrait pas les compétences moins altérées telles que rapportées dans les modèles à multiples déficits. Ainsi, nous voulions explorer la possibilité de regrouper les différents profils cognitifs de façon plus homogène en tenant compte de la nature mais aussi de l'ampleur des déficits phonologiques et visuo-attentionnels sur un continuum de compétences plutôt que par rapport à un seuil pathologique. Nous nous attendions à des regroupements selon la nature et l'intensité des DCSJ.

4.2. Analyses statistiques

Les données manquantes ($n = 4$ pour l'interférence issue du local et $n = 4$ pour l'interférence issue du global) ont été imputées grâce au package R *Mice* (Van Buuren et al.,

2019). L'identification des profils cognitifs de manière exploratoire s'est effectuée en trois étapes.

La première étape nous a permis d'identifier les dimensions cognitives (i.e., regroupement de mesures) avec une analyse en composantes principales (ACP) dans le but de résumer la relation entre les scores des variables phonologiques et visuo-attentionnelles et d'extraire des scores composites. Pour définir le nombre de dimensions cognitives, nous avons eu recours à l'analyse parallèle de Horn, (1965).

La deuxième étape nous a permis d'identifier des *clusters* parmi les participants selon les dimensions cognitives définies lors de la première étape. Afin d'identifier des profils cognitifs susceptibles d'être regroupés, nous avons utilisé la méthode de *clustering* non supervisée des *K-means*¹⁷. L'utilisation de l'algorithme des *K-means* impose le choix a priori d'un nombre de clusters optimal (i.e., le nombre de *clusters* qui permettra le meilleur ajustement aux données). Sur les 23 méthodes permettant de déterminer le nombre de cluster optimal (package *NbClust* ; Charrad et al., 2014), neuf proposent un nombre optimal de trois *clusters*. Les analyses de *clusters* ont été réalisées pour les données au Temps 1 sur quatre variables phonologiques (efficacité en segmentation de phonèmes et de syllabes, efficacité en mémoire à court terme phonologique, efficacité en dénomination rapide de couleurs) et quatre variables visuo-attentionnelles (asymétrie de l'interférence globale et locale, empan VA global, empan VA partiel).

Enfin, la troisième étape consiste à comparer chaque moyenne de scores composites dans chaque cluster par des analyses univariées (ANOVA), dans le but de déterminer les différents profils cognitifs identifiés via l'analyse de *clusters*. Une grande partie des

¹⁷ Une des limites de l'algorithme des K-means repose sur la première étape. Durant l'étape d'initialisation, des observations sont choisies au hasard pour servir de centres des *clusters*. Ce type d'initialisation a tendance à biaiser l'attribution des observations au sein des *clusters*. Pour pallier ce biais il est possible de conduire l'algorithme de multiples fois et d'observer les résultats d'assignation de chaque observation comme une probabilité (Fränti & Sieranoja, 2019). Par exemple, dans un k-means à deux *clusters* conduits 1000 fois, l'observation A peut-être assignée 200 fois au cluster 1 et 800 fois au cluster 2. Dans ce cas, l'observation A peut être attribuée au cluster 2, représentant 80% des assignations.

distributions des scores n'étant pas normales, les données ont été soumises à la transformation para-normale (Liu et al., 2009). L'effet de l'âge a été contrôlé grâce à une résidualisation (méthode reposant sur des modèles de régression linéaire simple). Toutes les distributions peuvent être considérées comme normales et ont été testées avec le test de Shapiro.

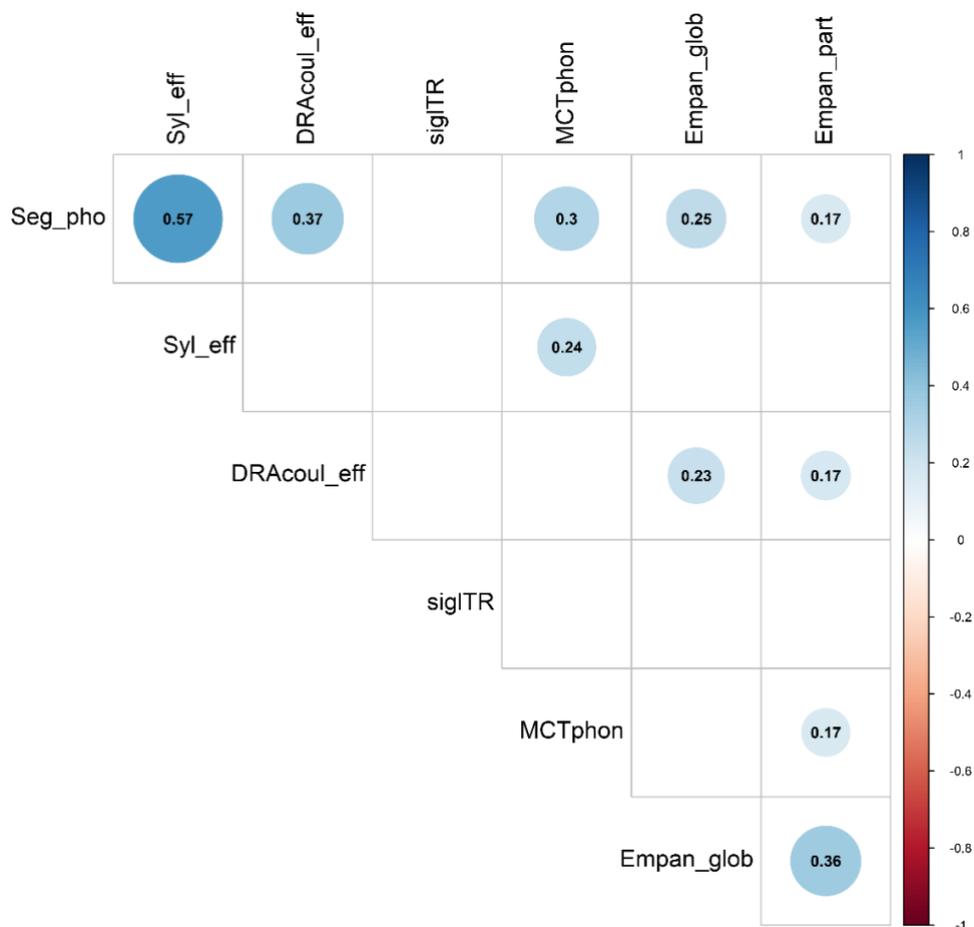
4.3. Résultats

Étape 1 : Analyse en composantes principales

Les variables analysées sont l'efficacité en segmentation de syllabes et de phonèmes, l'efficacité en dénomination rapide automatisée de couleurs, la mémoire à court terme phonologique, les temps de réponse dans l'interférence issue du global et du local et l'empan visuo-attentionnel en report global et partiel. Ces VD correspondent aux mesures des processus phonologiques et visuo-attentionnels effectuées au Temps 1. La matrice de corrélations, après corrections de Bonferroni, montre des corrélations positives et significatives entre les variables phonologiques et visuo-attentionnelles à l'exception des temps de réponse dans l'interférence issue du global et du local qui n'est corrélée avec aucune variable (cf. Figure 6.11).

Figure 6.11

Matrice de corrélations



Note. Les nombres représentent le coefficient de corrélation r dont la valeur de p est significative ($<.05$) et la taille du cercle bleu est proportionnelle à la valeur du coefficient de corrélation. *Syl eff* : efficacité en segmentation de syllabes ; *Seg pho* : efficacité en segmentation de phonèmes ; *DRA coul eff* : efficacité en dénomination rapide automatisée de couleurs, *MCT phon* : mémoire à court terme phonologique, *Sigl TR* : les temps de réponse dans l'interférence issue du global et du local ; *Empan glob* : empan visuo-attentionnel en report global ; *Empan part* : empan visuo-attentionnel en report partiel.

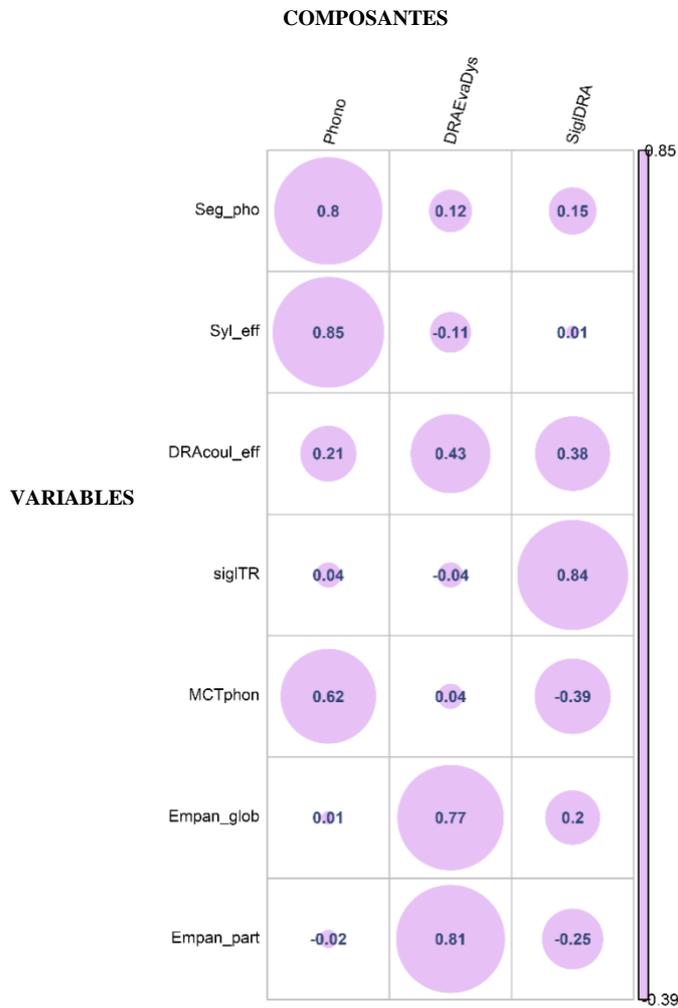
L'analyse parallèle de Horn, (1965) met en évidence trois facteurs à conserver qui peuvent être considérés comme des dimensions cognitives. L'ensemble des trois facteurs détectés explique 62.7% de la variance totale après rotation *oblmin*. Au sein de chaque facteur, les variables montrant un *poids* supérieur à 0.30 sont considérées comme ayant un poids significatif dans les composantes et dans les scores qui en découlent (Kline, 2002). Le nom donné à chaque composante est lié à l'interprétation des *poids*. Ainsi, la première composante

regroupe les variables de la dimension phonologique (segmentation de phonèmes et de syllabes, mémoire phonologique à court terme), dont la proportion de variance expliquée est de 25.6% (valeur propre = 1.79) : nous l'avons nommée « Phono ». La deuxième composante regroupe les variables de la dimension visuo-attentionnelle et de la DRA (dénomination rapide de couleur, empan visuo-attentionnel en report global, empan visuo-attentionnel en report partiel), dont la proportion de variance expliquée est de 20.9% (valeur propre = 1,46) : nous l'avons nommée « *DRAEvadys* ». La troisième composante regroupe les variables mesurant l'interférence issue du global et du local et la dénomination rapide automatisée, dont la proportion de variance expliquée est de 16 % (valeur propre = 1.13) : nous l'avons nommée « *SiglDRA* » (cf. Figure 6.12).

Les résultats des corrélations entre les trois composantes après rotation *oblimin*, sont présentés dans le Tableau 6.3 et relèvent une corrélation entre les composantes « Phono » et « *DRAEvadys* ». La variable DRA est présente dans les trois composantes mais son poids n'est pas significatif dans la composante « Phono », alors qu'il est significatif dans les deux autres composantes.

Figure 6.12

Résultats de l'analyse en composantes principales



Note. Les nombres représentent les *loadings* de chaque variable et la taille des cercles mauves est proportionnelle à leur valeur. *Syl eff* : efficacité en segmentation de syllabes ; *Seg pho* : efficacité en segmentation de phonèmes ; *DRA coul eff* : efficacité en dénomination rapide automatisée de couleurs, *MCT phon* : mémoire à court terme phonologique, *Sigl TR* : les temps de réponse dans l'interférence issue du global et du local ; *Empan glob* : empan visuo-attentionnel en report global ; *Empan part* : empan visuo-attentionnel en report partiel.

Tableau 6.3

Résultats des corrélations entre les composantes de la PCA avec rotation oblimin

	Phono	DRAEvaDys	SigIDRA
Phono	1	0.23 **	0.10 n.s.
DRAEvaDys		1	0.002 n.s.
SigIDRA			1

Note. ** : $p < .01$; n.s. : non significatif.

Étape 2 : Analyse exploratoire de clusters

Une implémentation multiple ($n = 1000$) de l'algorithme des *K-means* avec un nombre optimal de trois *clusters* est menée sur l'échantillon de 144 lecteurs dyslexiques au Temps 1 et repose sur les trois dimensions cognitives identifiées lors de la première étape avec l'ACP. La Figure 6.13 représente les trois *clusters*.

Figure 6.13

Résultats du clustering par l'algorithme des *K-means* au Temps 1

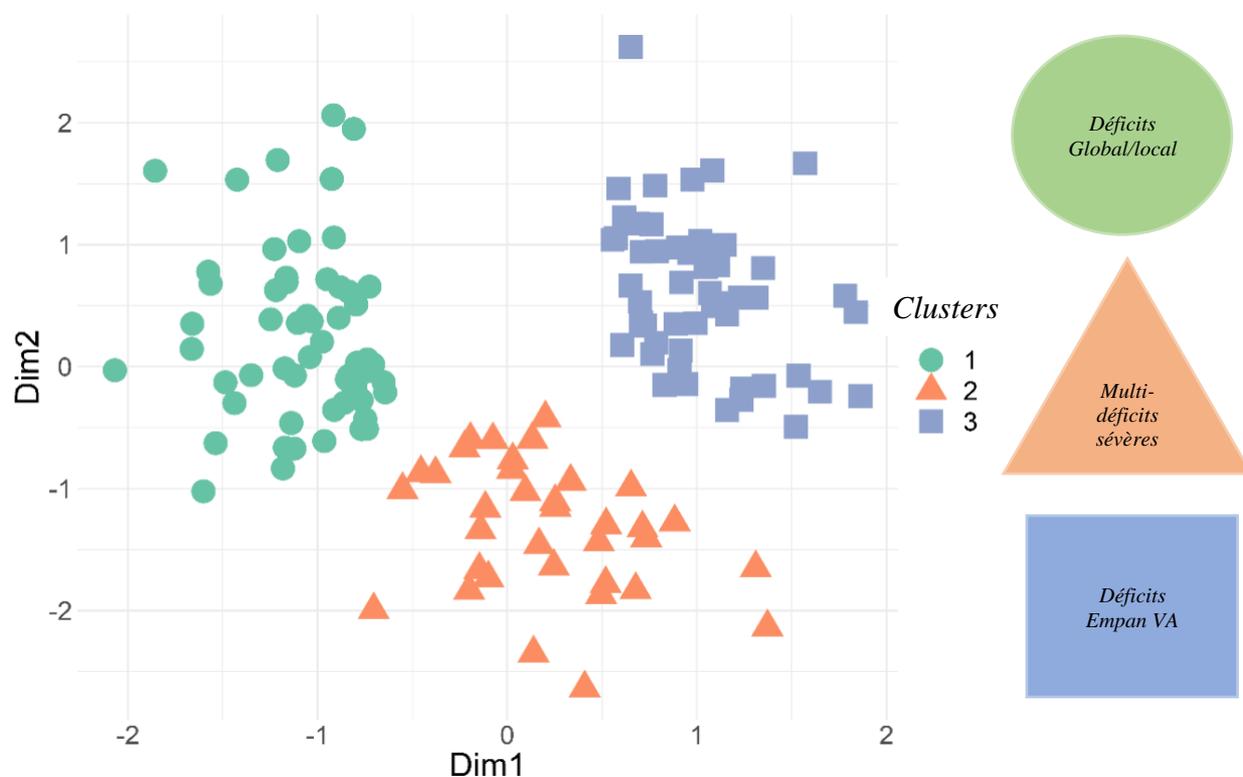
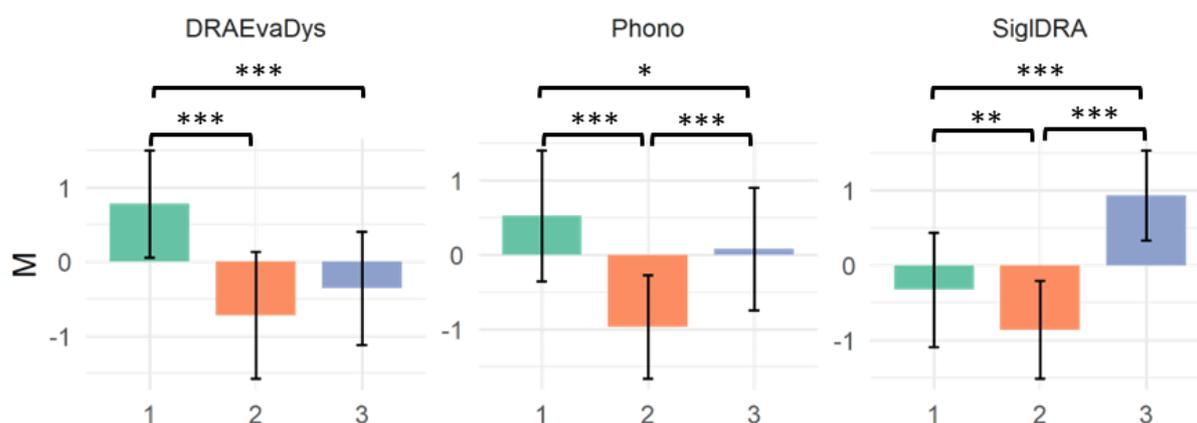


Tableau 6.4*Moyennes et écarts-types par composante et par cluster au Temps 1*

<i>Clusters</i>	Phono	DRAEvadys	SiglDRA	Effectif
Vert : <i>Déficits Global/local</i>	0,53 (0,88)	0,78 (0,72)	-0,33 (0,76)	56
Orange : <i>Multi-déficits sévères</i>	-0,97 (0,70)	-0,72 (0,85)	-0,86 (0,65)	35
Bleu : <i>Déficits Empan VA</i>	0,08 (0,82)	-0,36 (0,76)	0,93 (0,60)	52

Note. Les moyennes sont calculées par rapport à une moyenne standardisée égale à 0 et les écarts-types par rapport à +1 et -1 écarts-types.

Figure 6.14*Histogrammes par composantes et par clusters, après correction de Bonferroni*

Note. Les scores sont standardisés (m = 0 ; écart-type = 1) ; *** : p < .001

Nous avons interprété les trois *clusters*, représentés sur la Figure 6.13, à partir des scores obtenus par les participants pour chaque composante de l'ACP définies dans l'étape 1 (i.e., « *Phono* », « *DRAEvadys* » et « *SiglDRA* »). Le Tableau 6.4 indique les moyennes et les écarts-types de chaque *cluster* par rapport à une moyenne standardisée égale à 0. La Figure 6.14 représente le niveau de compétences moyen des lecteurs dyslexiques pour chaque composante et pour chaque *cluster*.

Le *cluster* 1 (vert) regroupe les participants dont la moyenne des scores est supérieure à 0 pour les composantes « *Phono* » et « *DRAEvadys* » et une moyenne inférieure à 0 pour la

composante « *SiglDRA* ». Ce *cluster* regroupe les lecteurs dyslexiques ayant des déficits dans les tâches qui mesurent la focalisation attentionnelle globale/locale, relativement plus sévères que dans les tâches phonologiques et de l'empan visuo-attentionnel. Nous le nommons *Déficits Global/local* (n = 56).

Le *cluster* 2 (orange) regroupe les participants ayant des moyennes inférieures à 0 pour les trois composantes « *Phono* », « *DRAEvadys* » et « *SiglDRA* ». Ce *cluster* regroupe des lecteurs dyslexiques ayant des déficits dans toutes les tâches phonologiques, visuo-attentionnelles et de dénomination rapide automatisée. Soulignons que dans ce *cluster*, les déficits sont plus marqués car les moyennes sont plus proches de -1 écart-type que dans les deux autres *clusters*. Nous le nommons *Multi-déficits sévères* (n = 35).

Le *cluster* 3 (bleu) regroupe les participants ayant des moyennes supérieures à 0 pour les composantes « *Phono* » et « *SiglDRA* » et une moyenne inférieure à 0 pour la composante « *DRAEvadys* ». Ce *cluster* se différencie bien des précédents et regroupe des lecteurs dyslexiques ayant des déficits relativement plus altérés dans les tâches évaluant l'empan visuo-attentionnel et la dénomination rapide automatisée que dans les tâches évaluant les processus phonologiques et la focalisation attentionnelle global/local. Nous le nommons *Déficits Empan VA* (n = 52). Il est intéressant de relever que les trois *clusters* présentent des déficits en DRA.

Étape 3 : Analyses univariées pour comparer les *clusters*

Afin d'examiner les potentielles différences entre les 3 *clusters*, nous avons ensuite réalisé des ANOVAs pour chacune des trois composantes principales séparément. Les résultats révèlent un effet principal de *cluster* pour chacune des 3 composantes principales issues de l'ACP : « *DRAEvadys* » ($F(2, 140) = 49.59, p < .001, \eta^2 = 0.41$), pour la composante « *Phono* » ($F(2, 140) = 36.39, p < .001, \eta^2 = 0.34$) et pour la composante « *SiglDRA* » ($F(2, 140) = 83.23, p < .001, \eta^2 = 0.54$).

Les résultats des tests post-hoc, après correction de *Bonferroni* pour comparaisons multiples, sont présentés sur les histogrammes de la Figure 6.14. Les comparaisons post-hoc montrent que le cluster *Multi-déficits sévères* est significativement plus altéré que le cluster *Déficits Empan VA* dans les composantes (« *Phono* » : $t(85) = -5,87, p < .001$) et « *SiglDRA* » ($t(85) = -12,05, p < .001$) mais pas pour la composante « *DRAEvadys* » ($t(85) = -2,18, p = 0,09$). Le cluster *Multi-déficits sévères* montre également des scores significativement plus altérés que le cluster *Déficits Global/local*, et ce pour l'ensemble des composantes (« *Phono* » : $t(89) = 8,48, p < .001$; « *DRAEvaDys* » : $t(89) = 9,05, p < .001$; « *SiglDRA* » : $t(89) = 3,65, p < .01$).

4.4. Synthèse

L'objectif de cette dernière analyse était d'explorer la possibilité de regrouper les LD selon leurs compétences phonologiques et visuo-attentionnelles définies le long d'un continuum plutôt que par rapport à un seuil pathologique. Nous pensons qu'élargir la notion de profils cognitifs fondés uniquement sur des déficits pourrait réduire leur hétérogénéité, ce qui s'est confirmé par la mise en évidence de trois *clusters*. Un cluster *Multi-déficits sévères* regroupant les LD dont les DCSJ sont sévères dans toutes les tâches phonologiques, visuo-attentionnelles et de dénomination rapide automatisée. Un cluster *Déficits Empan VA* regroupant les LD dont les DCSJ sont plus marqués dans les tâches d'empan visuo-attentionnel et de dénomination rapide alors que les processus phonologiques et de focalisation attentionnelle sont moins altérés. Le dernier cluster *Déficits Global/local* regroupant les LD dont les DCSJ sont plus marqués dans les tâches de focalisation attentionnelle globale/locale et de dénomination rapide, alors que les tâches d'empan visuo-attentionnel et phonologiques sont moins altérées.

Fait intéressant, le déficit commun aux trois *clusters* est la DRA, ce qui souligne son rôle important dans l'activité de lecture et son pouvoir de prédiction dans les difficultés de lecture. Ces données vont dans le sens des résultats de l'ACP qui indiquent un *poids* de la DRA réparti dans les trois dimensions soit avec les processus phonologiques, soit avec les processus d'empan visuo-attentionnel, soit avec les processus de focalisation attentionnelle globale/locale. De plus les prévalences mises en évidence au début de ce chapitre indiquent que le déficit de DRA est associé aux DCSJ phonologiques et visuo-attentionnels pour 98 % des participants de notre échantillon.

Nos hypothèses ouvrent des perspectives intéressantes. Notamment, comparer les compétences en lecture et en orthographe de chaque cluster. L'hypothèse à éprouver serait de vérifier par exemple, si les LD du *cluster Multi-déficits sévères* ont des compétences plus altérées. De même, il serait intéressant d'effectuer des analyses avec des modèles linéaires à effets mixtes pour évaluer les effets de l'intervention multimodale et multi-componentielle sur les compétences en lecture et en orthographe des LD de chaque cluster. Nous pourrions ainsi nous attendre à ce que les LD du *cluster Multi-déficits sévères* améliorent moins leurs compétences en lecture que les LD des deux autres *clusters* dont les déficits sont moins sévères.

5. Discussion

Afin de rendre compte de l'hétérogénéité des profils sémiologiques individuels et de leurs évolutions, cette étude de cas multiples montre que notre échantillon se caractérise par (1) des *Déficits* et des *Forces*, (2) une hétérogénéité inter et intra-compétences des déficits cognitifs sous-jacents (DCSJ), (3) une diminution des DCSJ à l'issue du protocole d'intervention, et (4) trois *clusters* de profils cognitifs identifiés, selon une approche dimensionnelle.

Puisque nous avons élaboré ce protocole de remédiation en adaptant les entraînements au profil sémiologique (i.e., profil cognitif et profil comportemental) de chaque participant, il nous a paru nécessaire d'analyser de façon exhaustive ces différents profils en fonction de leur nature et de leur degré de sévérité. Concernant le profil comportemental, il est admis que les procédures de lecture lexicale et sublexicale sont altérées simultanément chez la majorité des LD (Sprenger-Charolles et al., 2011; Zoubrinetzky et al., 2014). Même si l'altération respective de ces procédures est variable d'un participant à l'autre, des études ont montré que les deux procédures de lecture étaient altérées chez les LD, indépendamment de la nature des DCSJ phonologiques ou visuo-attentionnels (pour une revue voir Ziegler et al., 2019). Par conséquent, nous n'avons pas analysé la variabilité des profils comportementaux. Cette étude de cas multiples analyse les différents profils cognitifs et plus particulièrement les DCSJ phonologiques et visuo-attentionnels, d'autant plus que les entraînements proposés ciblent ces processus.

5.1. Prévalence des Déficits et des Forces

Comme attendu chez les LD, les *Déficits* relevés (scores standardisés ≤ -1.5 écarts-types) concernent la lecture et l'orthographe, la conscience phonologique, la dénomination rapide automatisée, l'empan visuo-attentionnel global, le vocabulaire actif, la conscience syllabique et la mémoire verbale à court terme. Les *Forces* ($\geq +1.5$ écarts-types) relevées chez certains LD concernent le vocabulaire passif et l'intelligence non verbale. L'interférence issue du local, l'empan visuo-spatial endroit, l'empan visuo-attentionnel partiel et l'interférence issue du global peuvent être soit des *Déficits* soit des *Forces*, selon les LD. Entre ces deux seuils extrêmes qui caractérisent les *Déficits* et les *Forces*, les mesures varient le long d'un continuum allant de + 1.5 écarts-types à - 1.5 écarts-types.

En accord avec le consensus d'un trouble phonologique caractérisant la dyslexie développementale (e.g., Hulme et al., 2012; Ramus, 2003; Saksida et al., 2016; Snowling et al., 2020), nous avons relevé un déficit phonologique pour 88% des LD dont 80% présentent un déficit de l'analyse phonémique et syllabique, 54%, un déficit de la dénomination rapide automatisée et 30 %, un déficit de la mémoire phonologique à court terme.

En accord avec l'hypothèse d'un trouble visuo-attentionnel dans la dyslexie développementale (Franceschini, Bertoni, et al., 2017; Perry & Long, 2022; Valdois et al., 2021; Vidyasagar, 2019; Zoubrinetzky et al., 2014), nous avons observé un déficit visuo-attentionnel pour 70% des LD dont 57% présentaient un trouble de l'empan visuo-attentionnel et 30% présentaient un trouble de la focalisation attentionnelle sur les modes d'analyse globale ou locale.

Enfin, en accord avec les modèles à déficits multiples (Pennington, 2006), nous avons relevé une grande prévalence de DCSJ phonologiques et visuo-attentionnels coexistant avec des compétences en vocabulaire et une intelligence non verbale très efficaces. Cependant, ces *Déficits et Forces* varient individuellement le long d'un continuum de compétences (McGrath et al., 2020; O'Brien & Yeatman, 2021). Des compétences efficaces en vocabulaire peuvent agir comme un facteur de protection qui va compenser le trouble de la lecture. Une perspective intéressante serait alors d'intégrer les facteurs de protection dans les modèles à déficits multiples afin de les nommer « Modèles à facteurs multiples » au lieu de « Modèles à déficits multiples » (McGrath et al., 2020). Ces résultats soulignent l'intérêt d'une approche dimensionnelle plutôt que catégorielle des compétences évaluées, que nous discutons dans la section 5.4 de ce chapitre.

5.2. Hétérogénéité inter et intra-compétences

Comme attendu, l'étude de cas multiples a mis en évidence une constellation de combinaisons différentes de DCSJ phonologiques et visuo-attentionnels. La majorité des profils cognitifs sont hétérogènes dans le sens où les participants présentent 23 combinaisons différentes de DCSJ phonologiques et visuo-attentionnels et que chaque combinaison peut inclure de 5 à 1 DCSJ parmi les processus évalués dans cette étude : conscience syllabique, conscience phonémique, mémoire phonologique, dénomination rapide automatisée, empan visuo-attentionnel en report global et en report partiel, interférence issue du niveau global et du niveau local. Nous avons par ailleurs montré que les profils cognitifs se caractérisent par une hétérogénéité *inter-compétences* entre les différents types de processus phonologiques, visuo-attentionnels et de dénomination rapide et par une hétérogénéité *intra-compétences* au sein d'un même domaine de processus phonologiques ou de processus visuo-attentionnels. En d'autres termes, chez un même individu, au sein d'un domaine de compétences phonologiques ou visuo-attentionnel, certains processus cognitifs apparaissent altérés tandis que d'autres apparaissent préservés. Par exemple, le participant GL15 présente un déficit de la conscience phonologique et de la DRA alors que la mémoire phonologique à court terme n'est pas altérée au sein du domaine de compétences phonologiques.

Au niveau *inter-compétences*, 75% (-1.5 écarts-types) à 95% (-1 écart-type) de LD présentent des profils cognitifs mixtes caractérisés par un ou plusieurs déficits des compétences phonologiques (conscience phonologique, conscience phonémique et mémoire phonologique), des compétences visuo-attentionnelles (empan visuo-attentionnel et focalisation attentionnelle globale/locale) et de la dénomination rapide automatisée. Au seuil de -1.5 écarts-types, 70% des LD présentent un déficit visuo-attentionnel, 80% un déficit phonologique et 54% un déficit de la dénomination rapide automatisée. Ces pourcentages sont plus élevés que ceux de Valdois

et al. (2021) qui rapportent seulement 41.8% de déficits de la conscience phonémique, 37.3% de déficits de l'empan visuo-attentionnel et 31% de déficits de la DRA. Ils sont moins élevés que ceux de Saksida et al. (2016) qui rapportent 92% de déficits de la conscience phonémique et 85 % de déficits de la DRA et plus élevés que ceux de Saksida (2016) qui rapportent 29 % de déficits de l'empan visuo-attentionnel uniquement en report partiel. Les pourcentages de notre étude et de celles de Saksida et al. (2016) et Valdois et al. (2021) sont différents car le type de mesures (e.g., mesures des processus phonologiques en score de précision et/ou de vitesse) et la sélection des variables (e.g., mesures de l'empan visuo-attentionnel en report global et/ou report partiel) diffèrent d'une étude à l'autre. D'ailleurs, en recalculant les pourcentages dans notre échantillon, avec les variables utilisées dans chacune des deux études et avec un seuil de pathologie commun, équivalent à -1.5 écarts-types, nous retrouvons des pourcentages similaires aux leurs.

Au niveau *intra-compétence*, l'hétérogénéité phonologique est représentée par la combinaison de quatre déficits : l'analyse syllabique (46%) et phonémique (72%), la mémoire phonologique à court terme (30%) et/ou la dénomination rapide automatisée (54%). De même, l'hétérogénéité *intra-compétence* visuo-attentionnelle est représentée par la combinaison de quatre déficits : l'empan visuo-attentionnel global (54%), l'empan visuo-attentionnel partiel (12%), l'interférence issue du local (12%) et l'interférence issue du global (25%). À notre connaissance, aucune étude n'a évalué et relevé la prévalence de tous ces déficits dans un même échantillon de LD. Ainsi, nous ne pouvons pas comparer nos résultats à ceux de la littérature.

Associés aux DCSJ phonologiques, d'autres études de cas multiples ont rapporté des déficits concernant d'autres processus comme des traitements attentionnels, exécutifs et visuo-spatiaux (Menghini et al., 2010), des processus sensoriels visuels et des processus non sensoriels d'apprentissage perceptif (O'Brien & Yeatman, 2021), des troubles auditifs, moteurs et visuels (Ramus, 2003; White et al., 2006). Ces différentes analyses montrent que

l'hétérogénéité cognitive peut s'étendre à un vaste panel de processus sensoriels et non sensoriels, linguistiques, attentionnels et exécutifs. De plus, les analyses de déviance utilisées pour calculer la prévalence de ces nombreux déficits dépendent des compétences évaluées, des seuils pathologiques fixés, des caractéristiques de l'échantillon, souvent hétérogènes d'une étude à l'autre.

Pour conclure, cette hétérogénéité *inter et intra-compétences* renforce l'idée de la nécessité d'intervenir sur plusieurs déficits cognitifs sous-jacents plutôt que sur un seul et d'adapter les entraînements aux profils sémiologiques individuels. Ainsi, il est logique que des interventions fondées sur plusieurs DCSJ dont les entraînements seraient adaptés individuellement induisent des tailles d'effet plus élevées que des interventions fondées sur l'entraînement d'un seul processus cognitif, ce que nous avons mis en évidence en présentant les résultats de l'essai clinique randomisé dans le chapitre 5.

5.3. Évolution des profils cognitifs et des compétences en lecture

Nous nous sommes ensuite demandé comment évoluaient les profils cognitifs et les compétences en lecture de chaque LD à l'issue de l'intervention. Comme attendu, le nombre de DCSJ phonologiques et visuo-attentionnels relevés pour chaque participant lors de l'évaluation initiale a diminué à l'issue de l'intervention. Cette diminution du nombre de déficits est liée à une normalisation de certains processus cognitifs qui étaient altérés avant l'intervention. Parallèlement à cette amélioration des processus cognitifs sous-jacents, nous relevons une amélioration de l'efficacité en lecture à l'issue de l'intervention. En résumé, le nombre de DCSJ diminue alors que les compétences en lecture s'améliorent.

Il faut souligner que les évaluations ne mettent plus en évidence de DCSJ pour 30% des participants, ni de troubles de la lecture pour 52% des participants, à l'issue du protocole de

remédiation. Par ailleurs, les évaluations mettent toujours en évidence un trouble modéré de l'efficacité en lecture pour 19% des participants et un trouble sévère de l'efficacité en lecture pour 28% des participants. Ces résultats rejoignent l'amélioration des DCSJ phonologiques et visuo-attentionnels, mis en évidence dans l'étude de groupe (cf. Essai clinique randomisé, chapitre 5). Pour rappel, les analyses avaient montré l'amélioration des processus phonologiques uniquement en lien avec l'intervention PHO, et celle des processus visuo-attentionnels uniquement en lien avec l'intervention VA.

L'ensemble de ces résultats souligne, encore une fois, la nécessité d'évaluer et de traiter ces multiples DCSJ bien que les troubles de la lecture soient le symptôme le plus visible conduisant le plus souvent au diagnostic de dyslexie développementale (American Psychiatric Association, 2013). Cependant, alors que les modèles à déficits multiples sont de plus en plus cités dans la littérature scientifique, pour expliquer la complexité et l'hétérogénéité de la dyslexie, nous constatons paradoxalement la rareté des interventions ciblant simultanément plusieurs DCSJ via un seul protocole de remédiation. Mis à part les très nombreux programmes de remédiation basés sur la phonologie, d'autres programmes sollicitent soit les fonctions visuelles, soit les fonctions auditives, soit les fonctions visuo-attentionnelles, ou encore les fonctions attentionnelles visuo-spatiales, de manière isolée ou comparative mais pas de manière additive. Ce choix est compréhensible en termes de recherche fondamentale dans la mesure où il découle de la nécessité de démontrer le rôle d'un déficit donné dans l'étiologie de la dyslexie développementale. Néanmoins, la prise en compte d'un seul déficit n'est pas en adéquation avec le terrain en termes de validité écologique et n'est pas en adéquation avec les modèles à déficits multiples, en termes de support théorique.

Toutefois, une récente méta-analyse (Hall et al., 2022) indique que 35 études sur 55 incluses, seraient multi-componentielles. Néanmoins, après examen, il s'agit en fait des *phonics instruction*, c'est-à-dire d'interventions associant la remédiation d'un déficit phonologique avec

un entraînement de la lecture, comme recommandé par Galuschka et al. (2014). Dans la revue systématique de Toffalini et al. (2021), les 40 études sélectionnées incluent d'autres approches de remédiation que les *phonics instruction*, mais là encore, seulement trois interventions sont multi-composantes et combinent des approches de remédiation nommées « approches mixtes ». Ainsi les tailles d'effet limitées ne peuvent être généralisées au vu du nombre réduit d'études.

Cependant, une étude propose trois types d'entraînement différents ciblant différents processus : phonologiques, attentionnels, ou procédures de lecture, tout en adaptant les entraînements aux profils cognitifs des LD (Heim, Pape-neumann, et al., 2015). Ces auteurs ont montré que ces trois types d'entraînements différents, attribués à trois groupes de LD allemands d'âge moyen 9,6 ans ($n = 12$, $n = 7$, $n = 14$), en fonction de leurs déficits initiaux, amélioraient significativement leurs compétences en lecture, en comparaison à un groupe contrôle ($n = 12$). L'intérêt principal de cette étude réside dans la mise en évidence de changement de l'activation de certaines régions cérébrales après l'intervention. Outre l'activation de la VWFA (*View Word Form Area*) à l'issue des trois types d'entraînements par rapport à la ligne de base initiale, une activation cérébrale supplémentaire et spécifique à chaque groupe, et donc à chaque type d'entraînement a été rapportée. L'entraînement des processus phonologiques ou de la lecture a conduit à des effets pariétaux bilatéraux spécifiques, distincts des effets temporaux supérieurs gauches spécifiques à l'attention. Même si la petite taille de l'échantillon limite les analyses statistiques et leurs interprétations, ces résultats montrent, comme ceux de notre étude, que la prise en compte du profil cognitif d'un LD permet d'adapter le programme de remédiation de la dyslexie développementale et d'optimiser l'efficacité de la remédiation (Heim & Grande, 2012).

Il est intéressant de noter que les effets des processus spécifiques de différents entraînements peuvent être mis en évidence au niveau comportemental (e.g., Zoubrinetzky et

al., 2019) mais aussi au niveau cérébral (Heim, Pape-Neumann, et al., 2015). De plus, l'hétérogénéité des profils cognitifs des LD décrite au niveau comportemental (e.g., Heim et al., 2008; Ramus, 2003) est aussi mise en évidence au niveau cérébral par différents schémas d'hyper ou d'hypo-activation (voir la méta-analyse de Richlan et al., 2011) ou plus récemment par des circuits neuronaux distincts correspondant aux déficits phonologiques vs. aux déficits de l'empan visuo-attentionnel (Liu et al., 2022).

Ainsi, diverses études convergent, à différents niveaux, vers l'idée d'une hétérogénéité des profils cognitifs des LD, expliquée par les modèles à déficits multiples. En effet, ces modèles prennent en considération de multiples causes de déficience en postulant que la dyslexie développementale est le résultat de l'altération de plusieurs fonctions et que ces fonctions ne sont pas toujours les mêmes pour chaque LD. Cette approche multidimensionnelle et probabiliste (O'Brien & Yeatman, 2021; Pennington, 2006b) s'oppose à l'approche catégorielle et implique le rôle potentiel de nombreuses fonctions différentes dans les troubles de la lecture.

Par ailleurs, les quatre dimensions génétique, neurobiologique, cognitive et comportementale ont inspiré des lignes de recherche de deux types. D'une part, certaines recherches se focalisent sur les niveaux génétique et environnemental afin d'identifier des facteurs de risque et de protection, susceptibles de moduler l'expression des déficits au niveau cognitif et comportemental (Catts & Petscher, 2022; Verwimp et al., 2021). D'autre part, d'autres recherches se focalisent sur le niveau cognitivo-comportemental afin d'identifier des fonctions altérées vs. non altérées selon une approche catégorielle définie par l'application d'un seuil de pathologie conventionnel, généralement fixé à 1.65 déviations standard (e.g., Menghini et al., 2010; Ramus, 2003; Zoubrinetzky et al., 2014). Cette dernière approche catégorielle n'est pas en accord avec l'approche dimensionnelle des modèles multi-déficits selon laquelle les fonctions contribuent aux manifestations de la dyslexie développementale quel que soit le

niveau de sévérité du déficit. Ainsi, d'autres études ont analysé les différentes fonctions altérées selon l'application de différents seuils arbitraires (Dębska et al., 2022) ou selon l'interaction entre les différentes fonctions neuropsychologiques impliquées dans le processus de lecture à des degrés divers (Lorusso & Toraldo, 2023). De même, Verwimp et al. (2021) préconisent des analyses de réseaux pour examiner une variété de facteurs et identifier les symptômes les plus fréquents, leurs interrelations, leurs associations et les facteurs de risques. Ainsi, la dyslexie développementale apparaît comme un *système de symptômes connectés* (Verwimp et al., 2021)

Dans ce contexte scientifique, l'analyse des DCSJ de notre échantillon présente l'avantage de mettre en évidence l'évolution longitudinale de ces déficits à l'issue d'un protocole d'intervention multimodale et multi-componentielle. De plus, comme Dębska et al. (2022), nous avons évalué les différentes compétences selon l'application de différents seuils arbitraires (-1.5 et -1 écart-type). Même si cette évaluation est limitée aux processus phonologiques et visuo-attentionnels, il est intéressant de constater la diminution des DCSJ à la suite de l'intervention et la corrélation de cette diminution avec l'amélioration de l'efficacité en lecture. Les implications cliniques sont donc évidentes : une intervention ciblant les DCSJ individuels est une option efficace. Cependant, comme nous l'avons exposé aux chapitres 4 et 5, cette option nécessite une grande rigueur méthodologique de la part des cliniciens et une grande motivation de la part des parents et des LD. Par conséquent, une formation des cliniciens et une implication des parents et/ou de l'école (à défaut) sont nécessaires.

5.4. Identification de *clusters*

Comme énoncé précédemment, nous avons montré que, selon l'ampleur de la déviance du score par rapport à la moyenne, la prévalence des déficits et les combinaisons de déficits relevées dans la présente étude, sont différentes. Nous avons prescrit les entraînements en

fonction des déficits relevés à partir de 1.5 écarts-types au-dessous de la moyenne. Or, la probabilité d'apparition d'un trouble de la lecture est continue et quantitative, plutôt que discrète et catégorielle. Autrement dit, la différence entre le normal et le pathologique devrait être envisagée sur un continuum à travers un spectre de différentes atteintes cliniques. Dans ces conditions, la détermination d'un seuil pathologique apparaît comme arbitraire (Pennington, 2006). Pour clore notre étude, nous avons donc exploré la possibilité de regrouper les LD présentant des déficits phonologiques et visuo-attentionnels envisagés le long d'un continuum plutôt que par rapport à un seuil pathologique. De plus, ce type de classification axée sur les données (analyse ascendante) et non sur la théorie (approche descendante) peut faire émerger des profils cognitifs qui ne sont pas prédits par des hypothèses étiologiques de la dyslexie développementale (Heim et al., 2008; King et al., 2007; Morris et al., 1998; Pacheco et al., 2014).

En partant des données de notre échantillon, les analyses ont fait émerger trois *clusters* correspondant à trois types de profils cognitifs distincts. Le cluster *Multi-déficits sévères* regroupe les LD ayant des déficits marqués dans les trois types de tâches (i.e., phonologiques, visuo-attentionnelles et de DRA). Le cluster *Déficits Empan VA* regroupe les LD ayant des performances altérées dans les tâches d'empan visuo-attentionnel et de DRA. Enfin, le cluster *Déficits Global/local* regroupe les LD présentant des déficits dans les tâches de focalisation attentionnelle globale/locale et de DRA.

Fait intéressant, le déficit en DRA est commun aux trois *clusters*. De plus, on retrouve aussi cette association de déficits dans 98% de notre échantillon. En effet, 32% des LD présentent un triple déficit de la DRA, des processus phonologiques et visuo-attentionnels, 6% des LD présentent un déficit de la DRA sans déficit des processus phonologiques mais avec un déficit des processus visuo-attentionnels. Enfin 14% présentent un déficit de la DRA sans déficit visuo-attentionnel mais avec un déficit des processus phonologiques.

Ces résultats sont en accord avec certaines études soulignant le rôle indépendant de la DRA dans l'efficacité en lecture. En effet, la DRA serait un puissant prédicteur de l'efficacité en lecture (e.g., Landerl et al., 2019), indépendamment de la conscience phonologique (Powell et al., 2007). Par ailleurs, l'empan visuo-attentionnel contribuerait à l'efficacité en lecture, indépendamment de la DRA (Chen et al., 2019; M. van den Boer et al., 2015). Connu pour être un processus altéré chez les LD (e.g., Decker et al., 2013; Wolf et al., 2002), le déficit de DRA est décrit comme une altération spécifique de l'accès aux représentations phonologiques (Boets et al., 2013; Ramus, 2014; Ramus & Szenkovits, 2008). Cependant, certains auteurs décrivent la DRA comme un « microcosme de la lecture » qui nécessiterait une intégration multimodale rapide (Georgiou et al., 2016). Ainsi, au-delà de sa composante phonologique, d'autres processus neurologiques et cognitifs comme les mouvements oculaires saccadés, la reconnaissance perceptive, les déplacements de l'attention visuelle, la mémoire de travail, l'accès lexical et la planification articulatoire seraient impliqués dans la DRA (Norton & Wolf, 2012).

D'autres études ont mis en évidence différents *clusters* ou *profils cognitifs* chez les LD, en lien avec différents processus évalués. Heim et al. (2008) identifient trois *clusters* : le premier regroupe des LD avec une altération de la conscience phonologique, des traitements auditifs et magnocellulaires ; le deuxième, une altération de la conscience phonologique isolée ; le troisième, une altération du déplacement attentionnel. Par ailleurs, King et al. (2007) identifient eux aussi trois *clusters* impliquant les processus phonologiques : le premier regroupe des LD avec une altération de la DRA ; le deuxième une altération de la conscience phonologique et le troisième une altération de la DRA et de la conscience phonologique. Plus récemment, des analyses menées sur des mesures neuropsychologiques issues des tâches du WISC-IV, ont mis en évidence deux *clusters* parmi les LD : le premier inclut des LD qui présentent un indice de compréhension verbale supérieur à l'indice de raisonnement perceptif

alors que le deuxième inclut des LD présentant le pattern inverse (Giofrè et al., 2019). Les auteurs interprètent cette double dissociation en termes de traitement phonologique moins altéré que le traitement visuel pour le premier cluster et de traitement visuel moins altéré que le traitement phonologique pour le deuxième cluster. Cependant, les déficits de traitement visuel et phonologique sont présents dans les deux *clusters*. Ces classifications par *clusters* sont très différentes entre elles et diffèrent également de nos résultats. Cependant, elles ne s'opposent pas car les processus cognitifs évalués ne sont pas les mêmes d'une étude à l'autre. Néanmoins, cette recherche incessante de classifications de profils cognitifs semble n'aboutir à rien de précis et multiplie les sous-types de profils cognitifs. Ainsi, même si l'existence de sous-types de profils cognitifs semble incertaine, le principal intérêt de ces classifications serait d'étudier ensuite la réponse à une intervention fondée sur la prise en compte des déficits liés à chaque sous-type (Heim, Pape-Neumann, et al., 2015).

Par conséquent, pour en revenir à nos données, il serait intéressant d'évaluer les effets de notre intervention sur les compétences en lecture des LD de chaque cluster que nous avons mis en évidence. Ces analyses pourraient nous aider à ajuster notre protocole de remédiation afin d'optimiser l'amélioration des compétences en lecture. Par exemple, si les LD du cluster *Multi-déficits sévères* répondent moins bien à l'intervention que les LD des *clusters* dont les déficits sont moins sévères, cela impliquerait la nécessité d'augmenter la durée et l'intensité de leurs entraînements. Inversement, si les LD du cluster *Déficits Empan visuo-attentionnel* répondent moins bien à l'intervention que les LD du cluster *Multi-déficits sévères*, cela suggérerait de diminuer certains entraînements phonologiques pour augmenter les entraînements visuo-attentionnels et de dénomination rapide automatisée. Ces analyses pourraient ainsi nous aider à interpréter la variabilité que nous avons relevée dans la réponse à l'intervention au Temps 5. Alors que certains LD ont un âge de lecture très supérieur à leur âge chronologique, d'autres ont encore un âge de lecture inférieur à leur âge chronologique, à

l'issue de l'intervention. Ainsi, si les *Très bons répondants* sont dans les *clusters* où les déficits sont moins sévères, et si les *Moins bons répondants* sont dans le *cluster* où les déficits sont plus sévères, nos hypothèses seront confirmées.

5.5. Implications cliniques

L'hétérogénéité *inter et intra-compétences* des profils cognitifs et les *clusters* que nous avons mis en évidence illustrent la complexité sémiologique qui peut être appréhendée selon une approche catégorielle ou selon une approche dimensionnelle. Les multiples combinaisons de déficits cognitifs sous-jacents mises en évidence confirment que le diagnostic de dyslexie développementale est un terme générique qui implique différents sous-groupes de profils cognitifs. Par conséquent, nous suggérons que l'évaluation des compétences en lecture et en orthographe ne suffit pas à l'élaboration des programmes de remédiation. Si les évaluations cliniques se résument à une évaluation des compétences en lecture et en orthographe et/ou à l'évaluation d'un seul déficit cognitif sous-jacent, on peut supposer que les interventions seront moins efficaces. En termes d'implications cliniques, nos résultats et ceux de la littérature justifient le développement d'évaluations de plusieurs processus cognitifs en lien avec la dyslexie développementale. De fait, si les évaluations cliniques sont plus exhaustives, les interventions pourront alors être personnalisées et donc plus efficaces (Ozernov-Palchik et al., 2016; Ziegler et al., 2020).

L'amélioration des compétences en lecture à l'issue de ce protocole de remédiation phonologique, visuo-attentionnelle et intermodalitaire, montre que l'évaluation des processus cognitifs sous-jacents aux troubles de la lecture est nécessaire au moins pour les processus audio-phonologiques et visuo-attentionnels. Comme nous l'avons mis en évidence dans le chapitre précédent, les programmes d'intervention définis à partir de ces évaluations se sont

avérés efficaces pour améliorer les déficits phonologiques, visuo-attentionnels et les compétences en lecture (efficacité et compréhension) et en orthographe. Toutefois, d'autres analyses de *clusters* et d'études de cas multiples relevées dans la littérature et citées précédemment soulignent en outre la nécessité d'évaluer les capacités intellectuelles verbales et non verbales, les capacités attentionnelles et exécutives et les fonctions neuro-visuelles afin d'avoir une vision globale des fonctions altérées et des fonctions préservées. Par conséquent, un bilan orthoptique neuro-visuel et un bilan neuropsychologique devraient être plus souvent associés à l'évaluation orthophonique.

5.6. Limites de l'étude

Variabilité de l'expertise clinique

Dans cette étude multicentrique, tous les investigateurs associés sont des orthophonistes volontaires sélectionnées sans critères restrictifs. Ce point est particulièrement important à discuter car il peut être une limite aussi bien qu'une force. Une limite car l'expertise clinique nécessite également l'auto-évaluation de sa pratique et la prise en compte de l'épineux problème des biais de jugement, d'interprétation ou des biais cognitifs tels que les biais de confirmation. Afin de limiter ces biais, nous avons mis en place un forum dédié à toutes les questions méthodologiques, pratiques et thérapeutiques de l'étude pour favoriser une expertise clinique collégiale en maintenant des échanges permanents entre les orthophonistes cliniciennes, l'investigateur principal et l'ingénieure d'étude chargée de coordonner l'essai clinique. De plus, l'association systématique d'un entraînement des processus cognitifs sous-jacents avec un entraînement des processus de lecture, adaptée au profil sémiologique de chaque LD requiert une grande expertise clinique et reste encore difficile à mettre en œuvre pour certains praticiens. Nous avons ainsi tenté via le forum d'optimiser l'interprétation et le

jugement clinique requis pour adapter les entraînements au profil sémiologique (profil cognitif et profil de lecture). Mais ce dispositif n'a pas été suffisant et nous pensons qu'il est nécessaire de former les orthophonistes de façon plus exhaustive pour être plus efficaces car le protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle reste très complexe dans sa mise en œuvre. Notamment, l'application des consignes et l'étalonnage des scores en fonction des données normatives des tests, l'élaboration des *Lignes de bases cliniques*, l'explication du protocole aux parents et aux enfants, l'adaptation des entraînements aux profils sémiologiques des participants, l'interprétation des résultats, la communication des résultats aux parents et aux participants requièrent des compétences qui varient en fonction des cliniciennes. Par conséquent, il serait utile de les uniformiser par une formation adaptée.

Par ailleurs, au cours de l'expérimentation, nous avons constaté qu'il était nécessaire de vérifier très précisément l'application des critères d'inclusion et de non-inclusion lors de l'évaluation pré-intervention afin d'éviter d'inclure des enfants porteurs d'un trouble développemental du langage oral. Ce diagnostic différentiel complexe entre le trouble spécifique du langage écrit et le trouble développemental du langage oral qui semblait parfois confus pour les cliniciennes, a pu être corroboré par une triple expertise clinique, celle de l'investigateur associé, celle de l'ingénieure d'étude qui était orthophoniste et celle de l'orthophoniste investigatrice principale.

En conclusion, la participation d'orthophonistes possédant des connaissances solides et professionnelles sur la dyslexie développementale est indispensable. Ce critère qui n'a pas été évalué, peut introduire une variabilité émanant de l'hétérogénéité des compétences professionnelles.

Limites sur les mesures et les analyses

Plusieurs limites relatives aux mesures effectuées ont été relevées. Alors que nous avons basé cette analyse de cas multiples sur l'évaluation de trois processus phonologiques et de deux processus visuo-attentionnels, nous n'avons pas évalué les processus intermodalitaires. Des tâches d'association entre le pseudomot écrit et entendu auraient été nécessaires pour mesurer l'effet spécifique de l'intervention intermodalitaire : par exemple, une tâche d'identification dans laquelle le participant entend un pseudomot et doit choisir parmi trois propositions présentées (e.g., /nyrɔ̃li/ et /nirɔ̃li/, /nyruli/, /nyrɔ̃lu/) et une tâche de discrimination dans laquelle le participant doit juger si les formes écrites et entendues d'un pseudomot sont congruentes ou non (e.g., /berumi/ et /derumi/).

Par ailleurs, le déroulement de l'étude a été impacté et retardé par différents éléments indépendants de notre volonté. Outre celui de la crise sanitaire liée au COVID-19 et les abandons liés au confinement, les participants, les parents et les orthophonistes nous ont signalé de nombreux dysfonctionnements au cours de l'utilisation des logiciels RapDys, Sigl, Phonopidow et Switchipido. Ces dysfonctionnements ont été source de démotivation puis d'abandons au cours de l'étude. De plus, la récupération des données des utilisateurs n'a pas été possible pour les logiciels Phonopidow et Switchipido. Par exemple, en accédant aux temps d'entraînements pour chaque utilisateur, nous aurions pu explorer les corrélations entre ces données et l'amélioration de l'efficacité en lecture. Concernant le logiciel RapDys, les données ont été récupérées sur la plateforme informatique avec grandes difficultés et certaines ont été effacées. Par conséquent, nous n'avons pas encore inclus les mesures qui évaluent la perception catégorielle dans nos analyses. Concernant le logiciel Sigl, nous avons perdu beaucoup de temps à analyser les données extraites du logiciel Sigl car nous avons dû vérifier puis corriger les formules de calcul de ce programme informatique. Tous ces logiciels sont en cours de ré-écriture pour faciliter leur utilisation, l'extraction des données des utilisateurs et optimiser les

entraînements, lorsque nous répliquerons l'étude. Concernant les données des utilisateurs des logiciels GraphoGame et de Maeva, nous avons pu les extraire et les analyses sont en cours.

Enfin, les mesures relevées lors des *Lignes de bases cliniques* tout au long de l'intervention, après chaque entraînement ont été collectées mais n'ont pas été analysées. Ces analyses permettront d'évaluer l'amélioration des items spécifiques à chaque entraînement, des items pour lesquels une généralisation est attendue et des items non spécifiques ou neutres pour lesquels aucune amélioration n'est attendue. Par exemple, il serait particulièrement intéressant d'analyser ces données en détail pour les 7 enfants qui n'ont pas amélioré leurs compétences en lecture.

Conclusions et perspectives

Une approche clinique individualisée implique une détermination et une planification des axes thérapeutiques différentes en fonction de l'âge du patient, de ses difficultés individuelles, de son milieu environnemental linguistique et socio-économique, et des croyances théoriques du praticien. Ce type d'approche est donc difficilement applicable dans un contexte clinique compte tenu des nombreux déficits présentés par chaque LD. Si cette approche de remédiation clinique n'est pas soutenue par un cadre méthodologique général de remédiation cognitive et par des outils numériques qui utilisent des algorithmes automatisés pour s'adapter aux profils cognitifs individuels, elle risque d'être très coûteuse pour le praticien. Effet délétère, ce coût pourrait engendrer un renoncement dans l'application d'une méthodologie de soin et/ou à des non-sens thérapeutiques.

Or, à notre connaissance, une approche méthodologique scientifique validant la remédiation de plusieurs fonctions dans différentes modalités incluant plusieurs processus cognitifs et dont les entraînements sont adaptés aux profils sémiologiques des LD n'a pas encore été expérimentée. De fait, la majorité des études scientifiques interventionnelles valide la remédiation d'une fonction unique, mais ne tient pas compte de l'hétérogénéité individuelle des déficits (Galuschka et al., 2014).

Afin d'apporter une contribution originale à la remédiation des troubles de la lecture chez les LD, j'ai donc élaboré ce protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle selon une approche clinique adaptée individuellement et une approche méthodologique scientifique. Pour cela, j'ai d'abord intégré trois types d'interventions déjà validées qui sont en lien avec des théories explicatives de la dyslexie développementale. Puis, j'ai adapté les entraînements audio-phonologiques, visuo-attentionnels et intermodalitaires au profil cognitif

et comportemental de chaque participant tout en utilisant des supports numériques afin de systématiser et intensifier ces entraînements individualisés. Enfin, j'ai construit un cadre méthodologique afin d'évaluer l'intervention et d'en faciliter l'application clinique. Ce cadre méthodologique s'appuie sur trois programmes d'entraînement systématiques, intensifs, individualisés et numériques qui sont fondés selon les quatre axes de l'*Evidence Based Practice*, c'est-à-dire les données de la littérature scientifique, l'expertise des orthophonistes, la plainte du patient et le contexte environnemental.

Pour rappel, par rapport à une intervention conventionnelle, des tailles d'effet, cette intervention multimodale et multi-componentielle améliore l'efficacité en lecture ($d = 2.3$), la compréhension en lecture ($d = 0,9$) et l'orthographe ($d = 0,78$), en comparaison à une intervention classique. Chaque intervention, audio-phonologique ($d = 0.63$), visuo-attentionnelle ($d = 0.75$) et intermodalitaire ($d = 0.7$) contribue de façon équivalente à augmenter l'efficacité en lecture. L'intervention phonologique améliore la conscience phonologique indépendamment de l'empan visuo-attentionnel alors que l'intervention visuo-attentionnelle augmente l'empan visuo-attentionnel, indépendamment de la conscience phonologique. Cet effet de spécificité renforce l'hypothèse d'un lien entre chacun de ces processus cognitifs sous-jacents et l'efficacité en lecture, ainsi que l'indépendance entre les deux processus cognitifs phonologique et visuo-attentionnel. À l'issue du protocole de remédiation, 52% des participants n'ont plus de trouble de la lecture, 19% ont un trouble modéré et 28% gardent un trouble sévère. Ces résultats confirment le caractère davantage curatif que compensatoire de ces interventions et soulignent l'efficacité d'une remédiation intensive multimodale et multi-componentielle dans le traitement de la dyslexie développementale.

Plus généralement, je suggère que l'efficacité de ce protocole de remédiation est en lien avec la prise en compte des trois processus de traitement de la lecture impliquant un codage

phonologique, orthographique et sémantique, dans une vision plus intégrative de la lecture (Grainger et al., 2016). Cependant, cette intégration est soumise à la nécessité d'adapter les programmes de remédiation aux déficits cognitifs sous-jacents individuels, dans une vision plus dimensionnelle vs. catégorielle de la lecture (Ziegler et al., 2020). Or, cette adaptation est soumise à l'expertise clinique, dans une vision plus multimodale et multi-componentielle de la remédiation de la dyslexie développementale. Enfin, je suggère que pour les participants qui ont le moins répondu à l'intervention, il est nécessaire d'intégrer d'autres modalités et d'autres composantes que les aspects audio-phonologiques, visuo-attentionnels et intermodalitaires. Selon les déficits individuels observés, l'intégration supplémentaire de la composante des fonctions exécutives (Horowitz-Kraus, Vannest, et al., 2014; Pasqualotto et al., 2022), de la composante des fonctions visuelles (Bellocchi et al., 2018) et visuo-spatiales (Flores-Gallegos et al., 2022) et de la composante des fonctions auditives temporelles (Van Hirtum et al., 2021), pourrait améliorer les effets obtenus via ce protocole.

Enfin, cette étude est en adéquation avec deux objectifs de développement durable. Le premier est d'assurer l'accès de chacun à une éducation de qualité, sur un pied d'égalité, et de promouvoir les potentialités d'apprentissage. Le deuxième est la réduction des inégalités dans la mesure où la dyslexie est un facteur aggravant de mauvaise réussite professionnelle et sociale.

Perspectives

Parmi les nombreuses perspectives pouvant être envisagées, la première serait de répliquer cette étude en incluant un groupe contrôle de participants en attente de traitement pour augmenter la validité externe (effet Hawthorne) et interne (effet développemental) de l'étude. Cette réplification nécessite aussi d'intégrer les nouvelles versions optimisées et corrigées des logiciels *Switchipido*, *RapDys* et *Phonopidow*, ainsi que et la nouvelle version de *Maeva*. Nous intégrerons également dans cette réplification la nouvelle version du logiciel *GraphoGame* (i.e.,

GraphoGameAdapt) actuellement en cours de développement. Ainsi, la progression linéaire de GraphoGame sera remplacée par une approche dimensionnelle qui s'appuie sur le « *multi-deficit model* » proposé par Ziegler et ses collaborateurs (Perry et al., 2019 ; Ziegler et al., 2020). L'objectif est de réorganiser les entraînements actuels en dimensions (lettres, efficacité orthographique, efficacité phonologique) et de créer de nouveaux entraînements pour des dimensions actuellement non représentées (vocabulaire, compréhension orale, compréhension écrite). De plus, la nouvelle version fournira, par un système de compte en ligne et une récupération automatique des données, un retour sur les difficultés présentées par l'enfant aux enseignants, aux parents et aux orthophonistes, ainsi que des alertes et des propositions de parcours individualisés.

Une seconde perspective serait d'associer des mesures de neuro-imagerie aux évaluations comportementales que nous effectuons déjà. Lorsque j'ai élaboré ce protocole de remédiation, un de mes objectifs était de découvrir les potentiels effets de cette intervention sur l'activation des réseaux neuronaux associés à la lecture. Faute de moyens humains et financiers, ce projet a été refusé. Cependant, je n'ai pas abandonné l'idée de répliquer cette étude en y associant ces mesures. Dans cette perspective, l'objectif serait de mettre en lien les résultats comportementaux de chaque intervention avec leurs répercussions sur les schémas différentiels d'activation cérébrale (Heim, Pape-Neumann, et al., 2015) et/ou les changements structurels, c'est à dire en termes d'intégrité des faisceaux de substance blanche spécifiques à chaque entraînement (Liu et al., 2022).

En effet, plusieurs études ont mis en évidence des changements dans la structure et le fonctionnement du cerveau au cours d'interventions de remédiation. Certaines ont montré une *normalisation* de l'activité du réseau de lecture dans les régions occipito-temporo-pariétales postérieures de l'hémisphère gauche en réponse à l'intervention, sans normalisation des réponses comportementales (e.g., Karipidis et al., 2018; Richards & Berninger, 2008; Shaywitz

et al., 2004; Simos et al., 2007). D'autres études ont avancé une *compensation* du trouble de la lecture par l'activation du gyrus frontal inférieur droit (voir la méta-analyse de Barquero et al., 2014) en lien avec des processus cognitifs qui faciliteraient la lecture comme le recodage articulatoire, la mémoire de travail (Hancock, Richlan, et al., 2017) et l'attention (Shaywitz et al., 2002). D'autres encore ont montré des changements dans les zones homologues postérieures droites du réseau de lecture, comme le gyrus temporal supérieur ou le lobe pariétal inférieur droits, associés à des réponses positives à l'intervention (e.g., Partanen et al., 2019; Romeo et al., 2018) ou au contraire à l'absence de réponse à l'intervention (Odegard et al., 2008; Simos, Fletcher, Sarkari, Billingsley-Marshall et al., 2007).

D'après certains auteurs, toutes ces interprétations renverraient à une modification de la connectivité structurelle et fonctionnelle après une intervention améliorant la lecture. Cette modification de la connectivité impliquerait les régions cérébrales occipito-temporo-pariétales gauches engagées dans la lecture et les régions pré-frontales engagées dans une cognition de haut niveau comme l'attention, la mémoire de travail et le fonctionnement exécutif (Horowitz-Kraus et al., 2019; Horowitz-Kraus, Vannest, et al., 2014). Au niveau fonctionnel, l'idée serait qu'une réorganisation de la connectivité cérébrale après une intervention améliorant la lecture est possible et pourrait être soit dans le sens d'une réduction de la connectivité (Richards & Berninger, 2008), soit dans le sens d'une augmentation de la connectivité entre ces zones (Aboud et al., 2018; Horowitz-Kraus, Grainger, et al., 2015). Au niveau structurel, des améliorations de l'intégrité de la substance blanche seraient associées à l'amélioration des compétences en lecture (Huber et al., 2018; Richards et al., 2017).

Enfin, comme nous avons pu identifier des possibles prédicteurs environnementaux comportementaux et cognitifs d'une bonne réponse à l'intervention, nous pourrions aussi tenter d'identifier dans l'avenir des prédicteurs neuronaux comme l'engagement initial de l'hémisphère gauche et/ou de l'hémisphère droit et/ou de la connectivité interhémisphérique

(Aboud et al., 2018; Partanen et al., 2019), ou des changements de l'activité neuronale fonctionnelle allant vers une normalisation pour les *Très bons répondants* et vers une compensation pour les *Moins bons répondants*.

Une troisième perspective serait de comparer nos résultats avec les prédictions d'un modèle multi-déficits. Afin de mieux comprendre l'hétérogénéité des DCSJ associée à la dyslexie développementale, Ziegler et al. (2019, 2020) ont récemment développé un modèle computationnel multi-déficits pour simuler les différences individuelles au sein d'échantillons de normolecteurs et de lecteurs dyslexiques (pour plus de détails, voir chapitre 2, section 2.2.3). Les cinq composants pris en compte par le modèle (*lettres, phonèmes, réseau de décodage grapho-phonologique, lexique phonologique, et lexique orthographique*), peuvent être altérés indépendamment par trois types de déficits spécifiques décrits dans la dyslexie développementale. Les déficits de type visuel (e.g., fixation binoculaire, saccades oculaires) et visuo-attentionnels (encombrement perceptif, empan visuo-attentionnel, attention visuo-spatiale) peuvent altérer le niveau de traitement *des lettres* dans leur identification et le codage de leur position. Les déficits de type auditif (e.g., perception allophonique, traitement temporel auditif) et phonologiques (conscience phonémique, mémoire phonologique, dénomination rapide automatisée) peuvent altérer le traitement *des phonèmes* dans leur discrimination, le codage de leur position et l'accès aux représentations phonologiques dans *le lexique phonologique*. Chacun de ces déficits peut altérer le réseau de décodage grapho-phonologique, tout comme un déficit spécifique dans l'intégration audio-visuelle. Fait intéressant, les trois types de déficits évoqués par Ziegler et al. (2019, 2020) correspondent aux trois types d'interventions du protocole de remédiation élaboré dans le cadre de cette thèse (audio-phonologique, visuo-attentionnelle et intermodalitaire). De plus, les auteurs soulignent qu'en simulant les différences individuelles, le modèle pourrait confirmer la nécessité d'intervenir différemment pour chaque individu sur plusieurs processus altérés en accord avec l'apparition

probabiliste des DCSJ et l'hétérogénéité des profils cognitifs soutenus par le modèle multi-déficits de Pennington (2006). C'est exactement ce que nous avons mis en œuvre dans notre essai clinique. Par ailleurs, les résultats de notre protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle vont dans le sens des prédictions de ce modèle. En effet, d'après Ziegler et al. (2019, 2020), ce modèle de déficits multiples qui affectent les trois processus est plus performant que les modèles alternatifs qui affectent un seul processus (soit phonologique, soit visuel) ou qui affectent tous les processus de façon non-spécifique (bruit global). Il serait donc très informatif de comparer les prédictions de ce modèle avec les résultats du protocole de remédiation à l'issue de chaque intervention phonologique, visuo-attentionnelle, intermodalitaire, ainsi qu'à l'issue des trois interventions.

La dernière perspective serait de faire partager cette méthodologie de soin de la dyslexie développementale au sein de la communauté orthophonique pour en généraliser l'utilisation. L'hétérogénéité des profils cognitifs des LD s'exprime par une variabilité des processus cognitifs sous-jacents qui s'étend des capacités phonologiques (via le traitement sensoriel auditif et visuel), aux capacités visuo-attentionnelles et à l'intégration intermodale, ce que Heim et Grande (2012) appellent « les empreintes digitales de la dyslexie développementale ». Ces empreintes auraient une répercussion sur les « empreintes neurocognitives », c'est-à-dire les différents schémas d'activation spécifiques à chaque mécanisme sous-jacent. Par conséquent, une évaluation pré-intervention est indispensable pour définir un profil cognitif et un profil comportemental afin de favoriser la spécificité des entraînements. C'est là un des points essentiels de l'efficacité d'une remédiation cognitive (Maillart et al., 2014 ; Seron & Van der Linden, 2016).

Ainsi, pour rétablir les procédures de lecture (automatisation du décodage grapho-phonologique et augmentation du lexique orthographique), la remédiation doit simultanément combiner l'entraînement des processus cognitifs sous-jacents (audio-phonologique, visuo-

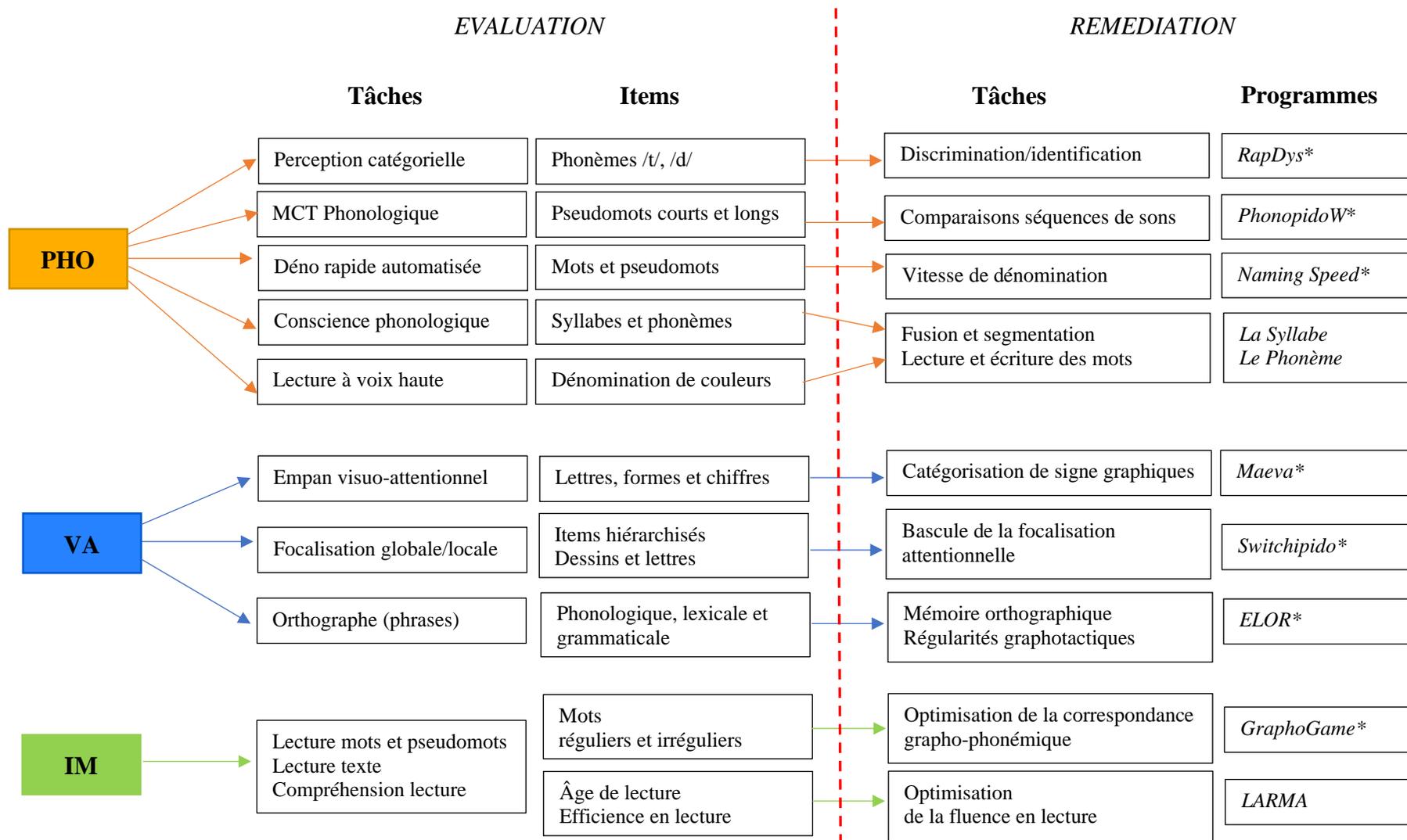
attentionnel ou intermodalitaire) et des procédures de lecture. Par ailleurs, il est tout à fait envisageable d'évaluer les processus audio-phonologiques et visuo-attentionnels précocement avant l'apprentissage de la lecture, puisque les outils d'évaluation ne nécessitent pas de lecture ou d'écriture. Ainsi, combiner des diagnostics précoces à des interventions intensives, numériques et spécifiques aux déficits de chaque LD, pourrait représenter une avancée non négligeable permettant l'amélioration des troubles de la lecture.

Par conséquent, un modèle de méthodologie de soin pourrait encourager les orthophonistes à adopter des stratégies d'évaluation et de remédiation plus efficaces. En France, les orthophonistes sont en demande de cadres méthodologiques pour améliorer leur pratique. Les formations post-universitaires ne sont pas soumises à des validations scientifiques des programmes enseignés. De plus, en termes de remédiation de la dyslexie, certaines orientations proposées et parfois attrayantes pour les praticiens ou les parents non avertis s'avèrent totalement infondées scientifiquement.

En 2023, alors que les avancées scientifiques sont d'une solidité et d'une ampleur incommensurables, des stratégies de remédiation en contradiction avec les théories scientifiques actuelles sont encore appliquées dans la pratique clinique. De plus, certains praticiens ne prescrivent jamais d'entraînements intensifs, pensant que solliciter l'engagement des parents et des enfants reste une tâche difficile. Ce protocole de remédiation multimodale et multi-componentielle semble pourtant montrer le contraire et les 94 orthophonistes investigatrices qui ont participé à cette expérimentation (que je remercie vivement), évoquent un changement radical de leur pratique, un engagement des patients et des parents, et une efficacité probante : « *Une amélioration spectaculaire des résultats scolaires, de l'estime de soi ou de la cohésion familiale* » est évoquée (MLG) ; « *Une révolution de la pratique* » (LL) ; « *un changement radical, une efficacité redoutable, une disparition totale de la réputation ingrate des soins du langage écrit* » (VBH). Cependant, je pense que son application exige

d'accepter une certaine contrainte méthodologique et de pouvoir l'adapter en fonction de son expertise clinique. Dans ce contexte, il me paraît essentiel de proposer une ébauche de méthodologie de soin afin d'en faciliter l'application et surtout de fournir un cadre méthodologique partagé, unitaire et « fondé sur les preuves » (cf. Figure 6.15). J'espère avoir amorcé un travail qui sera poursuivi afin d'améliorer la prise en soin des personnes souffrant de dyslexie développementale.

Figure 6.15. Modèle de méthodologie de soin de la dyslexie développementale selon un protocole d'intervention multimodale et multi-componentielle



Note. Le trait rouge en pointillé indique que le programme de remédiation est effectué si un déficit est mis en évidence par l'évaluation du processus cognitif. * indique que le programme de remédiation est numérique. PHO correspond à l'intervention phonologique. VA correspond à l'intervention visuo-attentionnelle. IM correspond à l'intervention intermodalitaire. Chaque intervention dure 2 mois et chaque entraînement est effectué 5jour/semaine, 15 min/jour. L'évaluation et la remédiation orthophonique doivent être complétées par un bilan neuropsychologique et neuro-visuel.

Références bibliographiques

- Aboud, K. S., Barquero, L. A., & Cutting, L. E. (2018). Prefrontal mediation of the reading network predicts intervention response in dyslexia. *Cortex*, *101*, 96–106. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.01.009>
- Adelman, J. S. (2011). Letters in Time and Retinotopic Space. *Psychological Review*, *118*(4), 570–582.
- Aghababian, V., & Jacobs, A. M. (1998). Les modèles de simulation des dyslexies. [Models of simulation of dyslexia.]. *Canadian Journal of Experimental Psychology / Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, *52*, 128–146. <https://doi.org/10.1037/h0087287>
- Ahissar, M. (2007). Dyslexia and the anchoring-deficit hypothesis. *Trends in Cognitive Sciences*, *11*(11), 458–465. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2007.08.015>
- Ahissar, M., Lubin, Y., Putter-Katz, H., & Banai, K. (2006). Dyslexia and the failure to form a perceptual anchor. *Nature Neuroscience*, *9*(12), Article 12. <https://doi.org/10.1038/nm1800>
- Ahissar, M., Protopapas, A., Reid, M., & Merzenich, M. M. (2000). Auditory processing parallels reading abilities in adults. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *97*(12), 6832–6837. <https://doi.org/10.1073/pnas.97.12.6832>
- Al Otaiba, S., Connor, C. M., Folsom, J. S., Wanzek, J., Greulich, L., Schatschneider, C., & Wagner, R. K. (2014). To Wait in Tier 1 or Intervene Immediately: A Randomized Experiment Examining First Grade Response to Intervention (RTI) in Reading. *Exceptional Children*, *81*(1), 11–27. <https://doi.org/10.1177/0014402914532234>
- Al Otaiba, S., & Fuchs, D. (2002). Characteristics of Children Who Are Unresponsive to Early Literacy Intervention: A Review of the Literature. *Remedial and Special Education*, *23*(5), 300–316. <https://doi.org/10.1177/07419325020230050501>
- Al Otaiba, S., Kosanovich-Grek, M. L., Torgesen, J. K., Hassler, L., & Wahl, M. (2005). Reviewing Core Kindergarten and First-Grade Reading Programs In Light of No Child Left Behind: An Exploratory Study. *Reading & Writing Quarterly*, *21*(4), 377–400. <https://doi.org/10.1080/10573560591002286>
- Al Otaiba, S., McDonald Connor, C., Foorman, B., Schatschneider, C., Greulich, L., & Sidler, J. F. (2009). Identifying and Intervening with Beginning Readers Who Are At-Risk for Dyslexia: Advances in Individualized Classroom Instruction. *Perspectives on Language and Literacy*, *35*(4), 13–19.
- Altman, D. G., Schulz, K. F., Moher, D., Egger, M., Davidoff, F., Elbourne, D., Gøtzsche, P. C., & Lang, T. (2001). The Revised CONSORT Statement for Reporting Randomized Trials: Explanation and Elaboration. *Annals of Internal Medicine*, *134*(8), 663–694.
- American Psychiatric Association. (2013). *American Psychiatric Association. Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders: Neurodevelopmental Disorders: DSM-5* (5th edition). American Psychiatric Publishing.
- Amitay, S., Ahissar, M., & Nelken, I. (2002). Auditory Processing Deficits in Reading Disabled Adults. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, *3*(3), 302–320. <https://doi.org/10.1007/s101620010093>
- Anderson, R. C., Wilson, P. T., & Fielding, L. G. (1988). Growth in Reading and How Children Spend Their Time Outside of School. *Reading Research Quarterly*, *23*(3), 285–303. <https://doi.org/10.1598/RRQ.23.3.2>
- Andrews, S. (1989). Frequency and Neighborhood Effects on Lexical Access: Activation or Search? *Journal of Experimental Psychology*, *15*(5), 802–814.
- Andrews, S. (1992). Frequency and Neighborhood Effects on Lexical Access: Lexical Similarity or

- Orthographic Redundancy? *Journal of Experimental Psychology*, 18(2), 234–254.
- Andrews, S., & Heathcote, A. (2001). Distinguishing common and task-specific processes in word identification: A matter of some moment? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 27, 514–544. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.27.2.514>
- Ans, B., & Carbonnel, S. (1998). A Connectionist Multiple-Trace Memory Model for Polysyllabic Word Reading. *Psychological Review*, 105(4), 678–723.
- Antzaka, A., Lallier, M., Meyer, S., Diard, J., Carreiras, M., & Valdois, S. (2017). Enhancing reading performance through action video games: The role of visual attention span. *Scientific Reports*, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-15119-9>
- Apel, K. (2011). What Is Orthographic Knowledge? *Language, Speech, and Hearing Services in Schools*, 42(4), 592–603. [https://doi.org/10.1044/0161-1461\(2011/10-0085\)](https://doi.org/10.1044/0161-1461(2011/10-0085))
- Apel, K., Wilson-Fowler, E. B., Brimo, D., & Perrin, N. A. (2012). Metalinguistic contributions to reading and spelling in second and third grade students. *Reading and Writing*, 25(6), 1283–1305. <https://doi.org/10.1007/s11145-011-9317-8>
- Araújo, S., Fernandes, T., & Huettig, F. (2019). Learning to read facilitates the retrieval of phonological representations in rapid automatized naming: Evidence from unschooled illiterate, ex-illiterate, and schooled literate adults. *Developmental Science*, 22(4), e12783. <https://doi.org/10.1111/desc.12783>
- Araújo, S., Reis, A., Petersson, K. M., & Faísca, L. (2015). Rapid automatized naming and reading performance: A meta-analysis. *Journal of Educational Psychology*, 107(3), 868–883. <https://doi.org/10.1037/edu0000006>
- Aravena, S., Snellings, P., Tijms, J., & van der Molen, M. W. (2013). A lab-controlled simulation of a letter–speech sound binding deficit in dyslexia. *Journal of Experimental Child Psychology*, 115(4), 691–707. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.03.009>
- Archer, K., Pammer, K., & Vidyasagar, T. R. (2020). A Temporal Sampling Basis for Visual Processing in Developmental Dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 14, 213. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2020.00213>
- Arnal, L. H., Doelling, K. B., & Poeppel, D. (2015). Delta–Beta Coupled Oscillations Underlie Temporal Prediction Accuracy. *Cerebral Cortex*, 25(9), 3077–3085. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhu103>
- Arnbak, E., & Elbro, C. (2000). The Effects of Morphological Awareness Training on the Reading and Spelling Skills of Young Dyslexics. *Scandinavian Journal of Educational Research*, 44(3), 229–251. <https://doi.org/10.1080/00313830050154485>
- Baayen, R. H., Davidson, D. J., & Bates, D. M. (2008). Mixed-effects modeling with crossed random effects for subjects and items. *Journal of Memory and Language*, 59(4), 390–412. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2007.12.005>
- Badian, N. A. (1997). Dyslexia and the double deficit hypothesis. *Annals of Dyslexia*, 47(1), 69–87. <https://doi.org/10.1007/s11881-997-0021-y>
- Bakker, D. J., & Vinke, J. (1985). Effects of Hemisphere-Specific stimulation on brain activity and reading in dyslexics. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 7(5), 505–525. <https://doi.org/10.1080/01688638508401282>
- Baneath, B., Boutard, C., & Alberti, C. (2006). *Chronosdictées: Tools for evaluating orthographic performance, with and without time constraints* (Orthoéditions).
- 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>
- Barker, T. A., Torgesen, J. K., & Wagner, R. K. (1992). The Role of Orthographic Processing Skills on Five Different Reading Tasks. *Reading Research Quarterly*, 27(4), 334.

<https://doi.org/10.2307/747673>

- Barquero, L. A., Davis, N., & Cutting, L. E. (2014). Neuroimaging of Reading Intervention: A Systematic Review and Activation Likelihood Estimate Meta-Analysis. *PLoS ONE*, 9(1), e83668. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0083668>
- Bartels, C., Wegrzyn, M., Wiedl, A., Ackermann, V., & Ehrenreich, H. (2010). Practice effects in healthy adults: A longitudinal study on frequent repetitive cognitive testing. *BMC Neuroscience*, 11(1), 118. <https://doi.org/10.1186/1471-2202-11-118>
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2014). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *ArXiv Preprint ArXiv:1406.5823*.
- Bavelier, D., Green, C. S., & Seidenberg, M. S. (2013). Cognitive Development: Gaming Your Way Out of Dyslexia? *Current Biology*, 23(7), R282–R283. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.02.051>
- Bediou, B., Adams, D. M., Mayer, R. E., Tipton, E., Green, C. S., & Bavelier, D. (2018). Meta-analysis of action video game impact on perceptual, attentional, and cognitive skills. *Psychological Bulletin*, 144(1), 77–110. <https://doi.org/10.1037/bul0000130>
- Bedoin, N. (2017). Rééquilibrer les analyses visuo-attentionnelles globales et locales pour améliorer la lecture chez des enfants dyslexiques de surface. *ANAE*, 29(148), 276–294.
- Bedoin, N. (2018). *DeltaText*.
- Bedoin, N., Kéïta, L., Leculier, L., Rouse, C., Herbillon, V., & Launay, L. (2010). Diagnostic et remédiation d'un déficit d'inhibition des détails dans la dyslexie de surface. In *Le Langage oral: Données actuelles et perspectives en orthophonie*. (pp. 177–210).
- Bedoin, N., & Medina, F. (2013). *Switchipido, training software for alternating between local and global visual treatments, and for the inhibition of details*. GNOSIA.
- Bedoin, N., & Medina, F. (2014). *Sigl: Software for the evaluation of selection and inhibition skills for global and local treatments*. GNOSIA.
- Bellocchi, S., Massendari, D., Grainger, J., & Ducrot, S. (2018). Effects of inter-character spacing on saccade programming in beginning readers and dyslexics. *Child Neuropsychology*.
- Benassi, M., Simonelli, L., Giovagnoli, S., & Bolzani, R. (2010). Coherence motion perception in developmental dyslexia: A meta-analysis of behavioral studies. *Dyslexia*, 16(4), 341–357. <https://doi.org/10.1002/dys.412>
- Ben-Shachar, M., Dougherty, R. F., Deutsch, G. K., & Wandell, B. A. (2007). Contrast responsivity in MT+ correlates with phonological awareness and reading measures in children. *NeuroImage*, 37(4), 1396–1406. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.05.060>
- Berent, I. (2003). Do null phonemic masking effects reflect strategic control of phonology? *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal*, 16, 349–376.
- Bernard, J.-B., & Castet, E. (2019). The optimal use of non-optimal letter information in foveal and parafoveal word recognition. *Vision Research*, 155, 44–61. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2018.12.006>
- Berninger, V. W., & Abbott, R. D. (2013). Differences between Children with Dyslexia Who Are and Are Not Gifted in Verbal Reasoning. *The Gifted Child Quarterly*, 57(4), 10.1177/0016986213500342. <https://doi.org/10.1177/0016986213500342>
- Berninger, V. W., Vaughan, K., Abbott, R. D., Begay, K., Coleman, K. B., Curtin, G., Hawkins, J. M., & Graham, S. (2002). Teaching spelling and composition alone and together: Implications for the simple view of writing. *Journal of Educational Psychology*, 94(2), 291–304. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.94.2.291>
- Berthelot, J.-M. (2016). Méconnaissance des effets placebo et Hawthorne: Nécessaire ?: Unawareness of placebo and Hawthorne effects: necessary? *Hegel*, N° 2(2), 98.

<https://doi.org/10.4267/2042/60005>

- Bertoni, S., Franceschini, S., Ronconi, L., Gori, S., & Facoetti, A. (2019). Is excessive visual crowding causally linked to developmental dyslexia? *Neuropsychologia*, *130*, 107–117. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.04.018>
- Bhide, A., Power, A., & Goswami, U. (2013). A Rhythmic Musical Intervention for Poor Readers: A Comparison of Efficacy With a Letter-Based Intervention: Musical Intervention for Poor Readers. *Mind, Brain, and Education*, *7*(2), 113–123. <https://doi.org/10.1111/mbe.12016>
- Bhide, A., Shah, P. S., & Acharya, G. (2018). A simplified guide to randomized controlled trials. *Acta Obstetrica et Gynecologica Scandinavica*, *97*(4), 380–387. <https://doi.org/10.1111/aogs.13309>
- Bianco, M. (2019). Vers un enseignement de la compréhension des textes. In A. Bentolila & B. Germain (Eds.), *L'apprentissage de la lecture* (pp. 47–63). Nathan.
- Billard, C., Fluss, J., Ducot, B., Warszawski, J., Ecalle, J., Magnan, A., Richard, G., & Ziegler, J. (2008). Étude des facteurs liés aux difficultés d'apprentissage de la lecture. À partir d'un échantillon de 1062 enfants de seconde année d'école élémentaire. *Archives de Pédiatrie*, *15*(6), 1058–1067. <https://doi.org/10.1016/j.arcped.2008.02.020>
- Biscaldi, M., Gezeck, S., & Stuhr, V. (1998). Poor saccadic control correlates with dyslexia. *Neuropsychologia*, *36*(11), 1189–1202. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(97\)00170-X](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(97)00170-X)
- Bishop, D. v. m. (2009). Genes, Cognition, and Communication. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1156*(1), 1–18. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.04419.x>
- Bishop, D. V. M., & Snowling, M. J. (2004). Developmental Dyslexia and Specific Language Impairment: Same or Different? *Psychological Bulletin*, *130*, 858–886. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.130.6.858>
- Bishop, D. V. M., Snowling, M. J., Thompson, P. A., Greenhalgh, T., & Consortium, C. (2016). CATALISE: A Multinational and Multidisciplinary Delphi Consensus Study. Identifying Language Impairments in Children. *PLOS ONE*, *11*(7), e0158753. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158753>
- Blachman, B. A. (1997). Blachman, B. A. (1997). Early intervention and phonological awareness: A cautionary tale. In *Foundations of reading acquisition and dyslexia: Implications for early intervention* (Routledge, pp. 409–430).
- Blau, V., Reithler, J., van Atteveldt, N., Seitz, J., Gerretsen, P., Goebel, R., & Blomert, L. (2010). Deviant processing of letters and speech sounds as proximate cause of reading failure: A functional magnetic resonance imaging study of dyslexic children. *Brain*, *133*(3), 868–879. <https://doi.org/10.1093/brain/awp308>
- Blau, V., van Atteveldt, N., Ekkebus, M., Goebel, R., & Blomert, L. (2009). Reduced Neural Integration of Letters and Speech Sounds Links Phonological and Reading Deficits in Adult Dyslexia. *Current Biology*, *19*(6), 503–508. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.01.065>
- Blomert, L. (2011). The neural signature of orthographic–phonological binding in successful and failing reading development. *NeuroImage*, *57*(3), 695–703. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.11.003>
- Blomert, L., & Froyen, D. (2010). Multi-sensory learning and learning to read. *International Journal of Psychophysiology*, *77*(3), 195–204. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2010.06.025>
- Blomert, L., & Mitterer, H. (2004). The fragile nature of the speech-perception deficit in dyslexia: Natural vs. synthetic speech. *Brain and Language*, *89*(1), 21–26. [https://doi.org/10.1016/S0093-934X\(03\)00305-5](https://doi.org/10.1016/S0093-934X(03)00305-5)
- Blomert, L., & Willems, G. (2010). Is there a causal link from a phonological awareness deficit to reading failure in children at familial risk for dyslexia? *Dyslexia*, *16*(4), 300–317. <https://doi.org/10.1002/dys.405>

- Boden, C., & Giaschi, D. (2007). M-stream deficits and reading-related visual processes in developmental dyslexia. *Psychological Bulletin*, *133*(2), 346–366. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.133.2.346>
- Boder, E. (1973). Developmental Dyslexia: A Diagnostic Approach Based on Three Atypical Reading-spelling Patterns. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *15*(5), 663–687. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1973.tb05180.x>
- Boets, B., Op de Beeck, H. P., Vandermosten, M., Scott, S. K., Gillebert, C. R., Mantini, D., Bulthe, J., Sunaert, S., Wouters, J., & Ghesquiere, P. (2013). Intact But Less Accessible Phonetic Representations in Adults with Dyslexia. *Science*, *342*(6163), 1251–1254. <https://doi.org/10.1126/science.1244333>
- Boets, B., Wouters, J., van Wieringen, A., De Smedt, B., & Ghesquière, P. (2008). Modelling relations between sensory processing, speech perception, orthographic and phonological ability, and literacy achievement. *Brain and Language*, *106*(1), 29–40. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2007.12.004>
- Boets, B., Wouters, J., van Wieringen, A., & Ghesquière, P. (2006). Coherent motion detection in preschool children at family risk for dyslexia. *Vision Research*, *46*(4), 527–535. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2005.08.023>
- Boets, B., Wouters, J., van Wieringen, A., & Ghesquière, P. (2007). Auditory processing, speech perception and phonological ability in pre-school children at high-risk for dyslexia: A longitudinal study of the auditory temporal processing theory. *Neuropsychologia*, *45*(8), 1608–1620. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2007.01.009>
- 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>
- Bogliotti, C., Serniclaes, W., Messaoud-Galusi, S., & Sprenger-Charolles, L. (2008). Discrimination of speech sounds by children with dyslexia: Comparisons with chronological age and reading level controls. *Journal of Experimental Child Psychology*, *101*(2), 137–155. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.03.006>
- Bolger, D., Coull, J. T., & Schön, D. (2014). Metrical Rhythm Implicitly Orients Attention in Time as Indexed by Improved Target Detection and Left Inferior Parietal Activation. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *26*(3), 593–605. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00511
- Bonacina, S., Cancer, A., Lanzi, P. L., Lorusso, M. L., & Antonietti, A. (2015). Improving reading skills in students with dyslexia: The efficacy of a sublexical training with rhythmic background. *Frontiers in Psychology*, *6*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01510>
- Bonin, P., Peereman, R., Malardier, N., Méot, A., & Chalard, M. (2003). A new set of 299 pictures for psycholinguistic studies: French norms for name agreement, image agreement, conceptual familiarity, visual complexity, image variability, age of acquisition, and naming latencies. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, *35*(1), 158–167. <https://doi.org/10.3758/BF03195507>
- Bornstein, M. H., Hahn, C.-S., Suwalsky, J. T. D., & Haynes, O. M. (2003). Socioeconomic status, parenting, and child development: The Hollingshead Four-Factor Index of Social Status and The Socioeconomic Index of Occupations. In *Socioeconomic status, parenting, and child development* (pp. 29–82). Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Borokhovski, E., Bernard, R. M., Segalowitz, N., & Sokolovskaya, A. (2018). Systematically Mapping Connection between Rapid Automatized Naming Task and Reading Performance: A Meta-analysis of Correlational Data. *Российский Психологический Журнал*, *15*(1), 46–76. <https://doi.org/10.21702/rpj.2018.1.3>
- Bosse, M.-L., & Valdois, S. (2009). Influence of the visual attention span on child reading performance: A cross-sectional study. *Journal of Research in Reading*, *32*(2), 230–253. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9817.2008.01387.x>

- Bowers, J. S. (2000). In defense of abstractionist theories of repetition priming and word identification. *Psychonomic Bulletin & Review*, 7(1), 83–99. <https://doi.org/10.3758/BF03210726>
- Bowers, J. S., & Turner, E. L. (2003). In Search of Perceptual Priming in a Semantic Classification Task. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 29, 1248–1255. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.29.6.1248>
- Bowers, P. N., Kirby, J. R., & Deacon, S. H. (2010). The Effects of Morphological Instruction on Literacy Skills: A Systematic Review of the Literature. *Review of Educational Research*, 80(2), 144–179. <https://doi.org/10.3102/0034654309359353>
- Bradley, L., & Bryant, P. E. (1978). Difficulties in auditory organisation as a possible cause of reading backwardness. *Nature*, 271(5647), 746–747. <https://doi.org/10.1038/271746a0>
- Bradley, L., & Bryant, P. E. (1983). Categorizing sounds and learning to read—A causal connection. *Nature*, 301(5899), 419–421. <https://doi.org/10.1038/301419a0>
- Bradlow, A. R., Kraus, N., & Hayes, E. (2003). Speaking Clearly for Children With Learning Disabilities: Sentence Perception in Noise. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 46(1), 80–97. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2003/007\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2003/007))
- Brady, S., Shankweiler, D., & Mann, V. (1983). Speech perception and memory coding in relation to reading ability. *Journal of Experimental Child Psychology*, 35(2), 345–367. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(83\)90087-5](https://doi.org/10.1016/0022-0965(83)90087-5)
- Brandt, J., & Rosen, J. J. (1980). Auditory phonemic perception in dyslexia: Categorical identification and discrimination of stop consonants. *Brain and Language*, 9(2), 324–337. [https://doi.org/10.1016/0093-934X\(80\)90152-2](https://doi.org/10.1016/0093-934X(80)90152-2)
- Breznitz, Z. (1997a). Enhancing the Reading of Dyslexic Children by Reading Acceleration and Auditory Masking. *Journal of Educational Psychology*, 89(1), 103–113.
- Breznitz, Z. (1997b). Enhancing the Reading of Dyslexic Children by Reading Acceleration and Auditory Masking. *Journal of Educational Psychology*, 89(1), 103–113.
- Breznitz, Z. (2006). *Fluency in reading: Synchronization of processes*.
- Breznitz, Z., & Share, D. L. (1992). Effects of accelerated reading rate on memory for text. *Journal of Educational Psychology*, 84, 193–199. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.84.2.193>
- Breznitz, Z., Shaul, S., Horowitz-Kraus, T., Sela, I., Nevat, M., & Karni, A. (2013). Enhanced reading by training with imposed time constraint in typical and dyslexic adults. *Nature Communications*, 4(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/ncomms2488>
- Brossard, M. (2004). *Vygotski: Lectures et perspectives de recherches en éducation*. (Presses universitaires du Septentrion).
- Brossette, B., Grainger, J., Lété, B., & Dufau, S. (2022). On the relations between letter, word, and sentence-level processing during reading. *Scientific Reports*, 12(1), 17735. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-22587-1>
- Brysaert, M. (2001). Prelexical phonological coding of visual words in Dutch: Automatic after all. *Memory & Cognition*, 29(5), 765–773. <https://doi.org/10.3758/BF03200479>
- Brysaert, M. (2022). Word recognition II: Orthography-phonology. In *The Science of Reading: A Handbook* (2nd edition, pp. 79–101). Wiley-Blackwell.
- Bucci, M. P., Brémond-Gignac, D., & Kapoula, Z. (2008). Poor binocular coordination of saccades in dyslexic children. *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 246(3), 417–428. <https://doi.org/10.1007/s00417-007-0723-1>
- Bucci, M. P., Carzola, B., Fiucci, G., Potente, C., Caruso, L., & Mp, B. (2018). *Computer Based Oculomotor Training Improves Reading Abilities in Dyslexic Children: Results from A Pilot Study*. 2018(01), 6.

- Bus, A. G., & van IJzendoorn, M. H. (1999). Phonological awareness and early reading: A meta-analysis of experimental training studies. *Journal of Educational Psychology, 91*(3), 403–414. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.91.3.403>
- Calcus, A., Deltenre, P., Colin, C., & Kolinsky, R. (2018). Peripheral and central contribution to the difficulty of speech in noise perception in dyslexic children. *Developmental Science, 21*(3), e12558. <https://doi.org/10.1111/desc.12558>
- Caldani, S., Gerard, C.-L., Peyre, H., & Bucci, M. P. (2020). Visual Attentional Training Improves Reading Capabilities in Children with Dyslexia: An Eye Tracker Study During a Reading Task. *Brain Sciences, 10*(8), 558. <https://doi.org/10.3390/brainsci10080558>
- Campbell, R. (1983). Writing nonwords to dictation. *Brain and Language, 19*(1), 153–178. [https://doi.org/10.1016/0093-934X\(83\)90061-5](https://doi.org/10.1016/0093-934X(83)90061-5)
- Cancer, A., Bonacina, S., Antonietti, A., Salandi, A., Molteni, M., & Lorusso, M. L. (2020). The Effectiveness of Interventions for Developmental Dyslexia: Rhythmic Reading Training Compared With Hemisphere-Specific Stimulation and Action Video Games. *Frontiers in Psychology, 11*, 1158. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01158>
- Capin, P., Cho, E., Miciak, J., Roberts, G., & Vaughn, S. (2021). Examining the Reading and Cognitive Profiles of Students With Significant Reading Comprehension Difficulties. *Learning Disability Quarterly, 44*(3), 183–196. <https://doi.org/10.1177/0731948721989973>
- Caramazza, A. (1991). Some Aspects of Language Processing Revealed Through the Analysis of Acquired Aphasia: The Lexical System. In A. Caramazza (Ed.), *Issues in Reading, Writing and Speaking: A Neuropsychological Perspective* (pp. 15–44). Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-011-3740-9_1
- Caramazza, A., Laudanna, A., & Romani, C. (1988). Lexical access and inflectional morphology. *Cognition, 28*(3), 297–332. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(88\)90017-0](https://doi.org/10.1016/0010-0277(88)90017-0)
- Carlisle, J. F. (2010). Effects of Instruction in Morphological Awareness on Literacy Achievement: An Integrative Review. *Reading Research Quarterly, 45*(4), 464–487. <https://doi.org/10.1598/RRQ.45.4.5>
- Carrasco, M. (2011). Visual attention: The past 25 years. *Vision Research, 51*(13), 1484–1525. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2011.04.012>
- Carrion-Castillo, A., Franke, B., & Fisher, S. E. (2013). Molecular Genetics of Dyslexia: An Overview: Molecular Genetics of Dyslexia: An Overview. *Dyslexia, 19*(4), 214–240. <https://doi.org/10.1002/dys.1464>
- Carroll, J. M., Maughan, B., Goodman, R., & Meltzer, H. (2005). Literacy difficulties and psychiatric disorders: Evidence for comorbidity. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, 46*(5), 524–532. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2004.00366.x>
- Casalis, S., & Colé, P. (2018). Le morphème, une unité de traitement dans l’acquisition de la littéracie. *Langue française, 199*(3), 69–81. <https://doi.org/10.3917/lf.199.0069>
- Casalis, S., Leloup, G., & Bois-Parriaud, F. (2019). *Casalis, S., Leloup, G. & Bois-Parriaud, F. (2019). Prise en charge des troubles du langage écrit chez l’enfant. Elsevier-Masson.* (Elsevier-Masson).
- Casalis, S., & Louis-Alexandre, M.-F. (2000). Morphological analysis, phonological analysis and learning to read French: A longitudinal study. *Reading and Writing: An Interdisciplinary Journal, 12*, 303–335.
- Casalis, S., Pacton, S., Lefevre, F., & Fayol, M. (2018). Morphological training in spelling: Immediate and long-term effects of an interventional study in French third graders. *Learning and Instruction, 53*, 89–98. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2017.07.009>
- Casini, L., Pech-Georgel, C., & Ziegler, J. C. (2018). It’s about time: Revisiting temporal processing deficits in dyslexia. *Developmental Science, 21*(2), e12530. <https://doi.org/10.1111/desc.12530>

- Castles, A., & Coltheart, M. (1993). Varieties of developmental dyslexia. *Cognition*, *47*(2), 149–180. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(93\)90003-E](https://doi.org/10.1016/0010-0277(93)90003-E)
- 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))
- Catts, H. W., Compton, D., Tomblin, J. B., & Bridges, M. S. (2012). Prevalence and nature of late-emerging poor readers. *Journal of Educational Psychology*, *104*, 166–181. <https://doi.org/10.1037/a0025323>
- Catts, H. W., McIlraith, A., Bridges, M. S., & Nielsen, D. C. (2017). Viewing a phonological deficit within a multifactorial model of dyslexia. *Reading and Writing*, *30*(3), 613–629. <https://doi.org/10.1007/s11145-016-9692-2>
- Catts, H. W., & Petscher, Y. (2022). A Cumulative Risk and Resilience Model of Dyslexia. *Journal of Learning Disabilities*, *55*(3), 171–184. <https://doi.org/10.1177/00222194211037062>
- Cavalli, E., Colé, P., Brèthes, H., Lefevre, E., Lascombe, S., & Velay, J.-L. (2019). E-book reading hinders aspects of long-text comprehension for adults with dyslexia. *Annals of Dyslexia*, *69*(2), 243–259. <https://doi.org/10.1007/s11881-019-00182-w>
- Cavalli, E., Colé, P., Leloup, G., Poracchia-George, F., Sprenger-Charolles, L., & El Ahmadi, A. (2018). Screening for Dyslexia in French-Speaking University Students: An Evaluation of the Detection Accuracy of the *Alouette* Test. *Journal of Learning Disabilities*, *51*(3), 268–282. <https://doi.org/10.1177/0022219417704637>
- Cavalli, E., Duncan, L. G., Elbro, C., El Ahmadi, A., & Colé, P. (2017). Phonemic—Morphemic dissociation in university students with dyslexia: An index of reading compensation? *Annals of Dyslexia*, *67*(1), 63–84. <https://doi.org/10.1007/s11881-016-0138-y>
- Cestnick, L., & Coltheart, M. (1999). The relationship between language-processing and visual-processing deficits in developmental dyslexia. *Cognition*, *71*(3), 231–255.
- Charrad, M., Ghazzali, N., Boiteau, V., & Niknafs, A. (2014). NbClust: An R Package for Determining the Relevant Number of Clusters in a Data Set. *Journal of Statistical Software*, *61*, 1–36. <https://doi.org/10.18637/jss.v061.i06>
- Chase, C. (2003). Visual magnocellular deficits in dyslexia. *Brain*, *126*(9), 2E – 2. <https://doi.org/10.1093/brain/awg217>
- Chen, N. T., Zheng, M., & Ho, C. S.-H. (2019). Examining the visual attention span deficit hypothesis in Chinese developmental dyslexia. *Reading and Writing*, *32*(3), 639–662. <https://doi.org/10.1007/s11145-018-9882-1>
- Chetail, F. (2017). What do we do with what we learn? Statistical learning of orthographic regularities impacts written word processing. *Cognition*, *163*, 103–120. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2017.02.015>
- Cheung, A. C. K., & Slavin, R. E. (2012). How features of educational technology applications affect student reading outcomes: A meta-analysis. *Educational Research Review*, *7*(3), 198–215. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2012.05.002>
- Chouake, T., Levy, T., Javitt, D. C., & Lavidor, M. (2012). Magnocellular training improves visual word recognition. *Frontiers in Human Neuroscience*, *6*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2012.00014>
- Cogo-Moreira, H., de Ávila, C. R. B., Ploubidis, G. B., & Mari, J. de J. (2013). Effectiveness of Music Education for the Improvement of Reading Skills and Academic Achievement in Young Poor Readers: A Pragmatic Cluster-Randomized, Controlled Clinical Trial. *PLoS ONE*, *8*(3), e59984. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0059984>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Edition 2. Hillsdale. Erlbaum.
- Cohen, L., Dehaene, S., Naccache, L., Lehéricy, S., Dehaene-Lambertz, G., Hénaff, M.-A., & Michel,

- F. (2000). The visual word form area: Spatial and temporal characterization of an initial stage of reading in normal subjects and posterior split-brain patients. *Brain*, *123*(2), 291–307.
- Colé, P., Bouton, S., Leuwers, C., Casalis, S., & Sprenger-Charolles, L. (2012). Stem and derivational-suffix processing during reading by French second and third graders. *Applied Psycholinguistics*, *33*(1), 97–120. <https://doi.org/10.1017/S0142716411000282>
- Colé, P., Cavalli, E., Duncan, L. G., Theurel, A., Gentaz, E., Sprenger-Charolles, L., & El-Ahmadi, A. (2018). What Is the Influence of Morphological Knowledge in the Early Stages of Reading Acquisition Among Low SES Children? A Graphical Modeling Approach. *Frontiers in Psychology*, *9*. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2018.00547>
- Colé, P., Duncan, L. G., & Cavalli, E. (2020). Les compensations de l'adulte dyslexique de niveau universitaire. In *La dyslexie à l'âge adulte: Approche neuropsychologique* (De Boeck Supérieur, pp. 287–324).
- Collet, G., Colin, C., & Sernicales, W. (2017). *RapDys: Software to modify allophonic perception*. GNOSIA. <http://www.gnosia.fr/fr/phonologie/45-rapdys.html>
- Collet, G., Colin, C., & Serniclaes, W. (2017). *Remédiation audiophonologique de la dyslexie: (RapDys©), un logiciel visant à réorganiser la perception allophonique des sons de la parole en perception phonémique*. 8.
- Collet, G., Colin, C., Serniclaes, W., Hoonhorst, I., Markessis, E., Deltenre, P., & Leybaert, J. (2012). Effect of phonological training in French children with SLI: Perspectives on voicing identification, discrimination and categorical perception. *Research in Developmental Disabilities*, *33*(6), 1805–1818. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2012.05.003>
- Collins, G. S., Reitsma, J. B., Altman, D. G., & Moons, K. G. M. (n.d.). *Transparent Reporting of a Multivariable Prediction Model for Individual Prognosis or Diagnosis (TRIPOD)*.
- Coltheart, M. (1981). *Disorders of Reading and Their Implications for Models of Normal Reading*. *15*(3), 245. <https://www.proquest.com/openview/b46ed8a5f6e10c401f0fb5859e20ac7a/1?cbl=1821103&pq-origsite=gscholar&parentSessionId=kO%2F8IWAsj0M%2FBZMRF8imAvyz%2F8%2BV%2FV2hsu4R5Eqf4EI%3D>
- Coltheart, M., Besner, D., Jonasson, J. T., & Davelaar, E. (1979). Phonological Encoding in the Lexical Decision Task. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *31*(3), 489–507. <https://doi.org/10.1080/14640747908400741>
- Coltheart, M., Davelaar, E., Jonasson, J. T., & Besner, D. (1977). Access to the internal lexicon. In *Attention and performance VI* (pp. 535–555). Routledge. In *Attention and performance VI* (pp. 535–555).
- 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>
- Coltheart, V., Patterson, K., & Leahy, J. (1994). When a ROWS is a ROSE: Phonological effects in written word comprehension. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *47*(4), 917–955. <https://doi.org/10.1080/14640749408401102>
- Connors, F. A., Loveall, S. J., Moore, M. S., Hume, L. E., & Maddox, C. D. (2011). An individual differences analysis of the self-teaching hypothesis. *Journal of Experimental Child Psychology*, *108*(2), 402–410. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.09.009>
- Connors, F. A., & Olson, R. K. (2012). Reading comprehension in dyslexic and normal readers: A component-skills analysis. In *Comprehension processes in reading* (pp. 579–602). Routledge.
- Connor, C. M., Morrison, F. J., Fishman, B., Crowe, E. C., Al Otaiba, S., & Schatschneider, C. (2013). A Longitudinal Cluster-Randomized Controlled Study on the Accumulating Effects of Individualized Literacy Instruction on Students' Reading From First Through Third Grade.

- Psychological Science*, 24(8), 1408–1419. <https://doi.org/10.1177/0956797612472204>
- Conrad, N. J., Harris, N., & Williams, J. (2013). Individual differences in children's literacy development: The contribution of orthographic knowledge. *Reading and Writing*, 26(8), 1223–1239. <https://doi.org/10.1007/s11145-012-9415-2>
- Cornelissen, P. L., Hansen, P. C., Hutton, J. L., Evangelinou, V., & Stein, J. F. (1998). Magnocellular visual function and children's single word reading. *Vision Research*, 38(3), 471–482. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(97\)00199-5](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(97)00199-5)
- Cunningham, A. E., & Stanovich, K. E. (1997). Early reading acquisition and its relation to reading experience and ability 10 years later. *Developmental Psychology*, 33(6), 934–945. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.33.6.934>
- Daigle, D., Berthiaume, R., Costerg, A., Plisson, A., Ruberto, N., & Varin, J. (2020). Do all roads really lead to Rome? The case of spelling acquisition. *Reading and Writing*, 33(2), 313–328. <https://doi.org/10.1007/s11145-019-09965-4>
- Daigle, D., Costerg, A., Plisson, A., Ruberto, N., & Varin, J. (2016). Spelling Errors in French-speaking Children with Dyslexia: Phonology May Not Provide the Best Evidence. *Dyslexia*, 22(2), 137–157. <https://doi.org/10.1002/dys.1524>
- Dandache, S., Wouters, J., & Ghesquière, P. (2014). Development of reading and phonological skills of children at family risk for dyslexia: A longitudinal analysis from kindergarten to sixth grade. *Dyslexia*, 20(4), 305–329.
- Danon-Boileau, L., & Barbier, D. (2002). *Danon-Boileau, L., & Barbier, D. (2002). Play-On: Un logiciel d'entraînement à la lecture. Paris: Audivimédia. Audivimédia.*
- Darrot, G., Gros, A., Manera, V., Corveleyn, X., & Harrar-Eskinazi, K. L. (2022). Effects of a developmental dyslexia remediation protocol based on training audio-phonological cognitive processes in gifted children with dyslexia: Study protocol of a multiple baseline single case experimental design. *Article Submitted for Publication BMC Pediatrics*.
- Davis, C. J. (2010). The spatial coding model of visual word identification. *Psychological Review*, 117(3), 713–758. <https://doi.org/10.1037/a0019738>
- Davis, C. J., & Bowers, J. S. (2006). Contrasting five different theories of letter position coding: Evidence from orthographic similarity effects. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 32(3), 535–557. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.32.3.535>
- Dawes, P., & Bishop, D. (2009). Auditory processing disorder in relation to developmental disorders of language, communication and attention: A review and critique: Research Report. *International Journal of Language & Communication Disorders*, 44(4), 440–465. <https://doi.org/10.1080/13682820902929073>
- de Boer, H., Donker, A. S., & van der Werf, M. P. C. (2014). Effects of the Attributes of Educational Interventions on Students' Academic Performance: A Meta-Analysis. *Review of Educational Research*, 84(4), 509–545. <https://www.jstor.org/stable/24434248>
- De Cara, B., & Plaza, M. (2010). Les outils informatisés d'aide à la lecture: Un bilan des recherches. *ANAE - Approche Neuropsychologique des Apprentissages Chez L'enfant*, 108(107), 184–190.
- de Jong, P. F., & Vrieling, L. O. (2004). Rapid automatic naming: Easy to measure, hard to improve (quickly). *Annals of Dyslexia*, 54(1), 65–88. <https://doi.org/10.1007/s11881-004-0004-1>
- de Schotten, M. T., Urbanski, M., Valabregue, R., Bayle, D. J., & Volle, E. (2014). Subdivision of the occipital lobes: An anatomical and functional MRI connectivity study. *Cortex*, 56, 121–137.
- Dębska, A., Łuniewska, M., Zubek, J., Chyl, K., Dynak, A., Dzięgiel-Fivet, G., Plewko, J., Jednoróg, K., & Grabowska, A. (2022). The cognitive basis of dyslexia in school-aged children: A multiple case study in a transparent orthography. *Developmental Science*, 25(2). <https://doi.org/10.1111/desc.13173>

- Decker, S. L., Roberts, A. M., & Englund, J. A. (2013). Cognitive predictors of rapid picture naming. *Learning and Individual Differences*, 25, 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2013.03.009>
- Deforge, H. (2011). Prise en charge des troubles attentionnels et exécutifs chez l'enfant. La remédiation cognitive: Pratiques et perspectives: *Développements*, n° 8(2), 5–20. <https://doi.org/10.3917/devel.008.0005>
- Dehaene, S. (2010). *The massive impact of literacy on the brain and its consequences for education*. Human neuroplasticity and education, 117, 19–32., Vatican City.
- Dehaene, S. (2013). Les quatre piliers de l'apprentissage, ou ce que nous disent les neurosciences. *Paris Tech Review*.
- Dehaene, S., & Cohen, L. (2011). The unique role of the visual word form area in reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(6), 254–262. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.04.003>
- Dehaene, S., Cohen, L., Morais, J., & Kolinsky, R. (2015a). Illiterate to literate: Behavioural and cerebral changes induced by reading acquisition. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(4), 234–244. <https://doi.org/10.1038/nrn3924>
- Dehaene, S., Cohen, L., Morais, J., & Kolinsky, R. (2015b). Illiterate to literate: Behavioural and cerebral changes induced by reading acquisition. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(4), Article 4. <https://doi.org/10.1038/nrn3924>
- Dehaene-Lambertz, G., Monzalvo, K., & Dehaene, S. (2018). The emergence of the visual word form: Longitudinal evolution of category-specific ventral visual areas during reading acquisition. *PLOS Biology*, 16(3), e2004103. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.2004103>
- Demb, J. B., Boynton, G. M., & Heeger, D. J. (1998). Functional Magnetic Resonance Imaging of Early Visual Pathways in Dyslexia. *The Journal of Neuroscience*, 18(17), 6939–6951. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.18-17-06939.1998>
- Démonet, J. F., Taylor, M. J., & Chaix, Y. (2004). Developmental dyslexia Jean-François Démonet, Margot J Taylor, Yves Chaix. *The Lancet*, 363, 1451–1460.
- Démonet, J.-F., Chollet, F., Ramsay, S., Cardebat, D., Nespoulous, J.-L., Wise, R., Rascol, A., & Frackowiak, R. (1992). The anatomy of phonological and semantic processing in normal subjects. *Brain*, 115(6), 1753–1768. <https://doi.org/10.1093/brain/115.6.1753>
- Denckla, M. B., & Rudel, R. G. (1976). Rapid 'automatized' naming (R.A.N.): Dyslexia differentiated from other learning disabilities. *Neuropsychologia*, 14(4), 471–479. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(76\)90075-0](https://doi.org/10.1016/0028-3932(76)90075-0)
- Deutsch, A., Frost, R., & Forster, K. I. (1998). Verbs and nouns are organized and accessed differently in the mental lexicon: Evidence from Hebrew. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 24, 1238–1255. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.24.5.1238>
- Devlin, J. T., Jamison, H. L., Matthews, P. M., & Gonnerman, L. M. (2004). Morphology and the internal structure of words. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 101(41), 14984–14988. <https://doi.org/10.1073/pnas.0403766101>
- Di Filippo, G., Brizzolara, D., Chilosi, A., De Luca, M., Judica, A., Pecini, C., Spinelli, D., & Zoccolotti, P. (2006). Naming Speed and Visual Search Deficits in Readers With Disabilities: Evidence From an Orthographically Regular Language (Italian). *Developmental Neuropsychology*, 30(3), 885–904. https://doi.org/10.1207/s15326942dn3003_7
- Di Folco, C., Guez, A., Peyre, H., & Ramus, F. (2022). Epidemiology of reading disability: A comparison of DSM-5 and ICD-11 criteria. *Scientific Studies of Reading*, 26(4), 337–355. <https://doi.org/10.1080/10888438.2021.1998067>
- Do Carmo Blanco, N., Meyer, J., Hoen, M., & Meunier, F. (2018). Phoneme Resistance and Phoneme Confusion in Noise: Impact of Dyslexia. *Interspeech 2018*, 2290–2294. <https://doi.org/10.21437/Interspeech.2018-1271>

- Donegan, R. E., & Wanzek, J. (2021). Effects of reading interventions implemented for upper elementary struggling readers: A look at recent research. *Reading and Writing, 34*(8), 1943–1977. <https://doi.org/10.1007/s11145-021-10123-y>
- Dubois, M., Kyllingsbæk, S., Prado, C., Musca, S. C., Peiffer, E., Lassus-Sangosse, D., & Valdois, S. (2010). Fractionating the multi-character processing deficit in developmental dyslexia: Evidence from two case studies. *Cortex, 46*(6), 717–738. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2009.11.002>
- Ducrot, S., Lété, B., Sprenger-Charolles, L., Pynte, J., & Billard, C. (2003). The Optimal Viewing Position Effect in Beginning and Dyslexic Readers. *Current Psychology Letters, 10*, Vol. 1, 2003. <https://doi.org/10.4000/cpl.99>
- Ebrahimi, L., Pouretamad, H., Khatibi, A., & Stein, J. (2019). Magnocellular Based Visual Motion Training Improves Reading in Persian. *Scientific Reports, 9*(1), 1142. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-37753-7>
- Eden, G. F., Stein, J. F., Wood, H. M., & Wood, F. B. (1994). Differences in eye movements and reading problems in dyslexic and normal children. *Vision Research, 34*(10), 1345–1358. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(94\)90209-7](https://doi.org/10.1016/0042-6989(94)90209-7)
- Eden, G. F., VanMeter, J. W., Rumsey, J. M., Maisog, J. Ma., Woods, R. P., & Zeffiro, T. A. (1996). Abnormal processing of visual motion in dyslexia revealed by functional brain imaging. *Nature, 382*(6586), 66–69. <https://doi.org/10.1038/382066a0>
- Ehri, L. C. (2000). Learning To Read and Learning To Spell: Two Sides of a Coin. *Topics in Language Disorders, 20*(3), 19. https://journals.lww.com/topicsinlanguagedisorders/Citation/2000/20030/Learning_To_Read_and_Learning_To_Spell_Two_Sides.5.aspx
- Ehri, L. C. (2005). Learning to Read Words: Theory, Findings, and Issues. *Scientific Studies of Reading, 9*(2), 167–188. https://doi.org/10.1207/s1532799xssr0902_4
- Ehri, L. C., Nunes, S. R., Willows, D. M., Schuster, B. V., Yaghoub-Zadeh, Z., & Shanahan, T. (2001). Phonemic Awareness Instruction Helps Children Learn to Read: Evidence From the National Reading Panel's Meta-Analysis. *Reading Research Quarterly, 36*(3), 250–287. <https://doi.org/10.1598/RRQ.36.3.2>
- Ehri, L. C., & Saltmarsh, J. (1995). Beginning readers outperform older disabled readers in learning to read words by sight. *Reading and Writing, 7*(3), 295–326. <https://doi.org/10.1007/BF03162082>
- Elliott, J. G. (2020). It's Time to Be Scientific About Dyslexia. *Reading Research Quarterly, 55*(S1). <https://doi.org/10.1002/rrq.333>
- Elliott, J. G., & Gibbs, S. (2008). Does Dyslexia Exist? *Journal of Philosophy of Education, 42*, 475–491.
- Elliott, J. G., & Grigorenko, E. L. (2014). *The dyslexia debate*. Cambridge University Press.
- Elwyn, G., Frosch, D., Thomson, R., Joseph-Williams, N., Lloyd, A., Kinnersley, P., Cording, E., Tomson, D., Dodd, C., Rollnick, S., Edwards, A., & Barry, M. (2012). Shared Decision Making: A Model for Clinical Practice. *Journal of General Internal Medicine, 27*(10), 1361–1367. <https://doi.org/10.1007/s11606-012-2077-6>
- Engbert, R., Nuthmann, A., Richter, E. M., & Kliegl, R. (2005). SWIFT: A Dynamical Model of Saccade Generation During Reading. *Psychological Review, 112*(4), 777–813. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.112.4.777>
- Esser, G., Wyschkon, A., & Schmidt, M. H. (2002). Was wird aus Achtjährigen mit einer Lese- und Rechtschreibstörung. *Zeitschrift Für Klinische Psychologie Und Psychotherapie, 31*(4), 235–242. <https://doi.org/10.1026/0084-5345.31.4.235>
- Evans, B. J. W., & Allen, P. M. (2016). A systematic review of controlled trials on visual stress using Intuitive Overlays or the Intuitive Colorimeter. *Journal of Optometry, 9*(4), 205–218.

<https://doi.org/10.1016/j.optom.2016.04.002>

- Fabre, D. (2006). *Organisation du lexique mental: Rôle des mots polymorphémiques* [These de doctorat, Lyon 2]. <https://www.theses.fr/2006LYO20062>
- Facoetti, A., Lorusso, M. L., Paganoni, P., Umiltà, C., & Gastone Mascetti, G. (2003). The role of visuospatial attention in developmental dyslexia: Evidence from a rehabilitation study. *Cognitive Brain Research*, *15*(2), 154–164. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(02\)00148-9](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(02)00148-9)
- Facoetti, A., & Molteni, M. (2001). The gradient of visual attention in developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, *39*(4), 352–357. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(00\)00138-X](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(00)00138-X)
- 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>
- Facoetti, A., Zorzi, M., Cestnick, L., Lorusso, M. L., Molteni, M., Paganoni, P., Umiltà, C., & Mascetti, G. G. (2006). The relationship between visuo-spatial attention and nonword reading in developmental dyslexia. *Cognitive Neuropsychology*, *23*(6), 841–855. <https://doi.org/10.1080/02643290500483090>
- Fawcett, A. J., & Nicolson, R. I. (1995). Persistent Deficits in Motor Skill of Children with Dyslexia. *Journal of Motor Behavior*, *27*(3), 235–240. <https://doi.org/10.1080/00222895.1995.9941713>
- Feng, G. (2006). Eye movements as time-series random variables: A stochastic model of eye movement control in reading. *Cognitive Systems Research*, *7*(1), 70–95. <https://doi.org/10.1016/j.cogsys.2005.07.004>
- Ferrand, L. (2007). *Psychologie cognitive de la lecture. Reconnaissance des mots écrits chez l'adulte* (De Boeck Université).
- Ferrand, L., & Grainger, J. (1994). Effects of Orthography are Independent of Phonology in Masked form Priming. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *47*(2), 365–382. <https://doi.org/10.1080/14640749408401116>
- Flaugnacco, E., Lopez, L., Terribili, C., Montico, M., Zoia, S., & Schön, D. (2015). Music Training Increases Phonological Awareness and Reading Skills in Developmental Dyslexia: A Randomized Control Trial. *PLOS ONE*, *10*(9), e0138715. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138715>
- Flint, S., & Pammer, K. (2011). Coherent Motion Detection in Illiterate, Literate and Dyslexic Readers in Papua New Guinea. *I-Perception*, *2*(4), 268–268. <https://doi.org/10.1068/ic268>
- Flores-Gallegos, R., Rodríguez-Leis, P., & Fernández, T. (2022). Effects of a virtual reality training program on visual attention and motor performance in children with reading learning disability. *International Journal of Child-Computer Interaction*, *32*, 100394. <https://doi.org/10.1016/j.ijcci.2021.100394>
- Fluss, J., Bertrand, D., Ziegler, J., & Billard, C. (2009). *Troubles d'apprentissage de la lecture: Rôle des facteurs cognitifs, comportementaux et socio-économiques*.
- Förster, J., & Dannenberg, L. (2010). GLOMO^{sys}: A Systems Account of Global Versus Local Processing. *Psychological Inquiry*, *21*(3), 175–197. <https://doi.org/10.1080/1047840X.2010.487849>
- Fournier, M., & Albaret, J.-M. (2013). Étalonnage des blocs de Corsi sur une population d'enfants scolarisés du CP à la 6e. *Développements*, *16–17*(3), 76. <https://doi.org/10.3917/devel.016.0076>
- Fraga González, G., Van der Molen, M. J. W., Žarić, G., Bonte, M., Tijms, J., Blomert, L., Stam, C. J., & Van der Molen, M. W. (2016). Graph analysis of EEG resting state functional networks in dyslexic readers. *Clinical Neurophysiology*, *127*(9), 3165–3175. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2016.06.023>
- Franceschini, S., & Bertoni, S. (2019). Improving action video games abilities increases the

- phonological decoding speed and phonological short-term memory in children with developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, *130*, 100–106. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.10.023>
- Franceschini, S., Bertoni, S., Gianesini, T., Gori, S., & Facoetti, A. (2017). A different vision of dyslexia: Local precedence on global perception. *Scientific Reports*, *7*(1), 1–10. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-17626-1>
- Franceschini, S., Bertoni, S., Puccio, G., Gori, S., Termine, C., & Facoetti, A. (2022). Visuo-spatial attention deficit in children with reading difficulties. *Scientific Reports*, *12*(1), 13930. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16646-w>
- Franceschini, S., Gori, S., Ruffino, M., Pedrolli, K., & Facoetti, A. (2012). A Causal Link between Visual Spatial Attention and Reading Acquisition. *Current Biology*, *22*(9), 814–819. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2012.03.013>
- Franceschini, S., Gori, S., Ruffino, M., Viola, S., Molteni, M., & Facoetti, A. (2013). Action Video Games Make Dyslexic Children Read Better. *Current Biology*, *23*(6), 462–466. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2013.01.044>
- Franceschini, S., Trevisan, P., Ronconi, L., Bertoni, S., Colmar, S., Double, K., Facoetti, A., & Gori, S. (2017). Action video games improve reading abilities and visual-to-auditory attentional shifting in English-speaking children with dyslexia. *Scientific Reports*, *7*(1), 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05826-8>
- Frazier, L., & Clifton, C. (1997). Construal: Overview, Motivation, and Some New Evidence. *Journal of Psycholinguistic Research*, *26*(3), 277–295. <https://doi.org/10.1023/A:1025024524133>
- Frazier, L., & Rayner, K. (1982). Making and correcting errors during sentence comprehension: Eye movements in the analysis of structurally ambiguous sentences. *Cognitive Psychology*, *14*(2), 178–210.
- Frijters, J. C., Lovett, M. W., Steinbach, K. A., Wolf, M., Sevcik, R. A., & Morris, R. D. (2011). Neurocognitive Predictors of Reading Outcomes for Children With Reading Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, *44*(2), 150–166. <https://doi.org/10.1177/0022219410391185>
- Frith, U. (1985). The usefulness of the concept of unexpected reading failure: Comments on “Reading retardation revisited.” *British Journal of Developmental Psychology*, *3*, 15–17. <https://doi.org/10.1111/j.2044-835X.1985.tb00949.x>
- Gabay, Y., Thiessen, E. D., & Holt, L. L. (2015). Impaired Statistical Learning in Developmental Dyslexia. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research: JSLHR*, *58*(3), 934–945. https://doi.org/10.1044/2015_JSLHR-L-14-0324
- Gabler, N. B., Duan, N., Vohra, S., & Kravitz, R. L. (2011). N-of-1 Trials in the Medical Literature: A Systematic Review. *Medical Care*, *49*(8), 761–768. <https://doi.org/10.1097/MLR.0b013e318215d90d>
- Gabrieli, J. D. E. (2009). Dyslexia: A New Synergy Between Education and Cognitive Neuroscience. *Science*, *325*(5938), 280–283. <https://doi.org/10.1126/science.1171999>
- Galaburda, A. M., Sherman, G. F., Rosen, G. D., Aboitiz, F., & Geschwind, N. (1985). Developmental dyslexia: Four consecutive patients with cortical anomalies. *Annals of Neurology*, *18*(2), 222–233. <https://doi.org/10.1002/ana.410180210>
- Galaburda, A., Menard, M., & Rosen, G. (1994). Evidence for aberrant auditory anatomy in developmental dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *91*(17), 8010–8013. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.17.8010>
- Gallagher, A., Frith, U., & Snowling, M. J. (2000). Precursors of Literacy Delay among Children at Genetic Risk of Dyslexia. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *41*(2), 203–213. <https://doi.org/10.1111/1469-7610.00601>

- Galuschka, K., Görden, R., Kalmar, J., Haberstroh, S., Schmalz, X., & Schulte-Körne, G. (2020). Effectiveness of spelling interventions for learners with dyslexia: A meta-analysis and systematic review. *Educational Psychologist*, *55*(1), 1–20. <https://doi.org/10.1080/00461520.2019.1659794>
- Galuschka, K., Ise, E., Krick, K., & Schulte-Körne, G. (2014). Effectiveness of Treatment Approaches for Children and Adolescents with Reading Disabilities: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *PLoS ONE*, *9*(2), e89900. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089900>
- Gao, C. (2023). *GgVennDiagram: A “ggplot2” Implement of Venn Diagram. R package version 1.2.2.*. <https://github.com/gaospecial/ggVennDiagram>
- Gavrîl, L., Roşan, A., & Szamosközi, Ştefan. (2021). The role of visual-spatial attention in reading development: A meta-analysis. *Cognitive Neuropsychology*, *38*(6), 387–407. <https://doi.org/10.1080/02643294.2022.2043839>
- Gayán, J., Willcutt, E. G., Fisher, S. E., Francks, C., Cardon, L. R., Olson, R. K., Pennington, B. F., Smith, S. D., Monaco, A. P., & DeFries, J. C. (2005). Bivariate linkage scan for reading disability and attention-deficit/hyperactivity disorder localizes pleiotropic loci. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *46*(10), 1045–1056.
- Geiger, G., Cattaneo, C., Galli, R., Pozzoli, U., Lorusso, M. L., Facoetti, A., & Molteni, M. (2008). Wide and Diffuse Perceptual Modes Characterize Dyslexics in Vision and Audition. *Perception*, *37*(11), 1745–1764. <https://doi.org/10.1068/p6036>
- Geiger, G., & Lettvin, J. Y. (2000). Developmental Dyslexia: A Different Perceptual Strategy and How to Learn a New Strategy for Reading. *Child Development & Disabilities*, *26*, 73–89.
- Georgiou, G. K., Aro, M., Liao, C.-H., & Parrila, R. (2016). Modeling the relationship between rapid automatized naming and literacy skills across languages varying in orthographic consistency. *Journal of Experimental Child Psychology*, *143*, 48–64. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.10.017>
- Georgiou, G. K., Martinez, D., Vieira, A. P. A., & Guo, K. (2021). Is orthographic knowledge a strength or a weakness in individuals with dyslexia? Evidence from a meta-analysis. *Annals of Dyslexia*, *71*(1), 5–27. <https://doi.org/10.1007/s11881-021-00220-6>
- Georgiou, G. K., Parrila, R., & Papadopoulos, T. C. (2008). Predictors of word decoding and reading fluency across languages varying in orthographic consistency. *Journal of Educational Psychology*, *100*(3), 566–580. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.100.3.566>
- Gerrits, E. (2003). Speech Perception of Young Children at Risk for Dyslexia and Children with Specific Language Impairment. In *Proceedings of the 15th International Conference on Phonetic Sciences* (pp. 2357–2360).
- Gersten, R., Haymond, K., Newman-Gonchar, R., Dimino, J., & Jayanthi, M. (2020). Meta-Analysis of the Impact of Reading Interventions for Students in the Primary Grades. *Journal of Research on Educational Effectiveness*, *13*(2), 401–427. <https://doi.org/10.1080/19345747.2019.1689591>
- Gibbon, J., Church, R. M., & Meck, W. H. (1984). Timing and time perception. In *Scalar timing in memory* (New York: Academy of Sciences, Vol. 423, pp. 52–77).
- Ginestet, E., Phénix, T., Diard, J., & Valdois, S. (2019). Modeling the length effect for words in lexical decision: The role of visual attention. *Vision Research*, *159*, 10–20. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2019.03.003>
- Ginestet, E., Valdois, S., & Diard, J. (2022). Probabilistic modeling of orthographic learning based on visuo-attentional dynamics. *Psychonomic Bulletin & Review*, *29*(5), 1649–1672. <https://doi.org/10.3758/s13423-021-02042-4>
- Giofrè, D., Toffalini, E., Provazza, S., Calcagni, A., Altoè, G., & Roberts, D. J. (2019). Are children with developmental dyslexia all the same? A cluster analysis with more than 300 cases. *Dyslexia*, *25*(3), 284–295. <https://doi.org/10.1002/dys.1629>
- Giraldo-Chica, M., Hegarty, J. P., & Schneider, K. A. (2015). Morphological differences in the lateral

- geniculate nucleus associated with dyslexia. *NeuroImage: Clinical*, 7, 830–836. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2015.03.011>
- Giraud, A.-L., & Poeppel, D. (2012). Cortical oscillations and speech processing: Emerging computational principles and operations. *Nature Neuroscience*, 15(4), Article 4. <https://doi.org/10.1038/nn.3063>
- Giraud, A.-L., & Ramus, F. (2013). Neurogenetics and auditory processing in developmental dyslexia. *Current Opinion in Neurobiology*, 23(1), 37–42. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2012.09.003>
- Giraud, H., & Grainger, J. (2000). Effects of prime word frequency and cumulative root frequency in masked morphological priming. *Language and Cognitive Processes*, 15(4–5), 421–444. <https://doi.org/10.1080/01690960050119652>
- Giraud, H., & Grainger, J. (2003). A Supralelexical Model for French Derivational Morphology. In E. M. H. Assink & D. Sandra (Eds.), *Reading Complex Words: Cross-Language Studies* (pp. 139–157). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3720-2_7
- Goldstein-Marcusohn, Y., Goldfarb, L., & Shany, M. (2020). Global and Local Visual Processing in Rate/Accuracy Subtypes of Dyslexia. *Frontiers in Psychology*, 11, 828. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00828>
- Goldston, D. B., Walsh, A., Mayfield arnold, E., Reboussin, B., Sergent daniel, S., Erkanli, A., Nutter, D., Hickman, E., Palmes, G., Snider, E., & Wood, F. B. (2007). Reading Problems, Psychiatric Disorders, and Functional Impairment from Mid- to Late Adolescence. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry*, 46(1), 25–32. <https://doi.org/10.1097/01.chi.0000242241.77302.f4>
- Gomez, P., Ratcliff, R., & Perea, M. (2008). The overlap model: A model of letter position coding. *Psychological Review*, 115(3), 577–600. <https://doi.org/10.1037/a0012667>
- Gonnerman, L. M., Seidenberg, M. S., & Andersen, E. S. (2007). Graded semantic and phonological similarity effects in priming: Evidence for a distributed connectionist approach to morphology. *Journal of Experimental Psychology: General*, 136, 323–345. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.136.2.323>
- González, G. F., Žarić, G., Tijms, J., Bonte, M., Blomert, L., & Molen, M. W. van der. (2015a). A Randomized Controlled Trial on The Beneficial Effects of Training Letter-Speech Sound Integration on Reading Fluency in Children with Dyslexia. *PLOS ONE*, 10(12), e0143914. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143914>
- González, G. F., Žarić, G., Tijms, J., Bonte, M., Blomert, L., & Molen, M. W. van der. (2015b). A Randomized Controlled Trial on The Beneficial Effects of Training Letter-Speech Sound Integration on Reading Fluency in Children with Dyslexia. *PLOS ONE*, 10(12), e0143914. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0143914>
- Gonzalez, M. del R. O., Garcia Espinel, A. I., & Guzman Rosquete, R. (2002). Remedial Interventions for Children with Reading Disabilities: Speech Perception—An Effective Component in Phonological Training? *Journal of Learning Disabilities*, 35(4), 334–342. <https://doi.org/10.1177/00222194020350040401>
- Goodwin, A. P., & Ahn, S. (2010). A meta-analysis of morphological interventions: Effects on literacy achievement of children with literacy difficulties. *Annals of Dyslexia*, 60(2), 183–208. <https://doi.org/10.1007/s11881-010-0041-x>
- Goodwin, A. P., Gilbert, J. K., & Cho, S.-J. (2013). Morphological Contributions to Adolescent Word Reading: An Item Response Approach. *Reading Research Quarterly*, 48(1), 39–60. <https://doi.org/10.1002/rrq.037>
- Gori, S., Cecchini, P., Bigoni, A., Molteni, M., & Facoetti, A. (2014). Magnocellular-dorsal pathway and sub-lexical route in developmental dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00460>

- Gori, S., Seitz, A. R., Ronconi, L., Franceschini, S., & Facoetti, A. (2016). Multiple Causal Links Between Magnocellular–Dorsal Pathway Deficit and Developmental Dyslexia. *Cerebral Cortex*, 26(11), 4356–4369. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhv206>
- Gori, S., Seitz, A., Ronconi, L., Franceschini, S., & Facoetti, A. (2015). The causal link between magnocellular-dorsal pathway functioning and dyslexia. In *Journal of vision* (Vol. 15). <https://doi.org/10.1167/15.12.195>
- Goswami, U. (2011). Temporal sampling framework for developmental dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, 15, 3–10. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.10.001>
- Goswami, U. (2015). Sensory theories of developmental dyslexia: Three challenges for research. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(1), 43–54. <https://doi.org/10.1038/nrn3836>
- Goswami, U. (2019). A neural oscillations perspective on phonological development and phonological processing in developmental dyslexia. *Language and Linguistics Compass*, 13(5), e12328. <https://doi.org/10.1111/lnc3.12328>
- Goswami, U., Gerson, D., & Astruc, L. (2010). Amplitude envelope perception, phonology and prosodic sensitivity in children with developmental dyslexia. *Reading and Writing*, 23(8), 995–1019. <https://doi.org/10.1007/s11145-009-9186-6>
- Goswami, U., Huss, M., Mead, N., Fosker, T., & Verney, J. P. (2013). Perception of patterns of musical beat distribution in phonological developmental dyslexia: Significant longitudinal relations with word reading and reading comprehension. *Cortex*, 14.
- Gottfried, A. W. (1985). Measures of Socioeconomic Status in Child Development Research: Data and Recommendations. *Merrill-Palmer Quarterly*, 31(1), 85–92. <https://www.jstor.org/stable/23086136>
- Gough, P. B., & Tunmer, W. E. (1986). Decoding, Reading, and Reading Disability. *Remedial and Special Education*, 7(1), 6–10. <https://doi.org/10.1177/074193258600700104>
- Graham, S., & Harris, K. R. (2005). Improving the Writing Performance of Young Struggling Writers: Theoretical and Programmatic Research From the Center on Accelerating Student Learning. *The Journal of Special Education*, 39(1), 19–33. <https://doi.org/10.1177/00224669050390010301>
- Grainger, J., Dufau, S., & Ziegler, J. C. (2016). A Vision of Reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 20(3), 171–179. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.12.008>
- Grainger, J., & Holcomb, P. J. (2007). Contraintes neurales pour une architecture fonctionnelle de la reconnaissance des mots. *L'Année psychologique*, 107(04), 623. <https://doi.org/10.4074/S0003503307004058>
- Grainger, J., & Jacobs, A. M. (1996). Orthographic processing in visual word recognition: A multiple read-out model. *Psychological Review*, 103(3), 518–565. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.103.3.518>
- Grainger, J., Kiyonaga, K., & Holcomb, P. J. (2006). The Time Course of Orthographic and Phonological Code Activation. *Psychological Science*, 17(12), 1021–1026. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01821.x>
- Grainger, J., Muneaux, M., Farioli, F., & Ziegler, J. C. (2005). Effects of Phonological and Orthographic Neighbourhood Density Interact in Visual Word Recognition. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, 58(6), 981–998. <https://doi.org/10.1080/02724980443000386>
- Grainger, J., & Van Heuven, W. J. B. (2003). Modeling letter position coding in printed word perception. In *Mental Lexicon: Some Words to Talk about Words* (pp. 1–23). Nova Publishers.
- Gray, S. H., Ehri, L. C., & Locke, J. L. (2018). Morpho-phonemic analysis boosts word reading for adult struggling readers. *Reading and Writing*, 31(1), 75–98. <https://doi.org/10.1007/s11145-017-9774-9>
- Gross, J., Hoogenboom, N., Thut, G., Schyns, P., Panzeri, S., Belin, P., & Garrod, S. (2013). Speech

- Rhythms and Multiplexed Oscillatory Sensory Coding in the Human Brain. *PLOS Biology*, *11*(12), e1001752. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001752>
- Gu, C., & Bi, H.-Y. (2020). Auditory processing deficit in individuals with dyslexia: A meta-analysis of mismatch negativity. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *116*, 396–405. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.06.032>
- Gustafson, S., Fälth, L., Svensson, I., Tjus, T., & Heimann, M. (2011). Effects of Three Interventions on the Reading Skills of Children With Reading Disabilities in Grade 2. *Journal of Learning Disabilities*, *44*(2), 123–135. <https://doi.org/10.1177/0022219410391187>
- 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>
- Haft, S. L., Myers, C. A., & Hoeft, F. (2016). Socio-emotional and cognitive resilience in children with reading disabilities. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *10*, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.06.005>
- Hahn, N., Foxe, J. J., & Molholm, S. (2014). Impairments of multisensory integration and cross-sensory learning as pathways to dyslexia. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *47*, 384–392. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.09.007>
- Hall, C., Dahl-Leonard, K., Cho, E., Solari, E. J., Capin, P., Conner, C. L., Henry, A. R., Cook, L., Hayes, L., Vargas, I., Richmond, C. L., & Kehoe, K. F. (2022). Forty Years of Reading Intervention Research for Elementary Students with or at Risk for Dyslexia: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Reading Research Quarterly*, *n/a*(*n/a*). <https://doi.org/10.1002/rrq.477>
- Hall, R., Ray, N., Harries, P., & Stein, J. (2013). A comparison of two-coloured filter systems for treating visual reading difficulties. *Disability and Rehabilitation*, *35*(26), 2221–2226. <https://doi.org/10.3109/09638288.2013.774440>
- Hämäläinen, J. A., Salminen, H. K., & Leppänen, P. H. T. (2012). Basic Auditory Processing Deficits in Dyslexia: Systematic Review of the Behavioral and Event-Related Potential/ Field Evidence. *Journal of Learning Disabilities*, *46*(5), 413–427. <https://doi.org/10.1177/0022219411436213>
- Hancock, R., Pugh, K. R., & Hoeft, F. (2017). Neural Noise Hypothesis of Developmental Dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, *21*(6), 434–448. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2017.03.008>
- Hancock, R., Richlan, F., & Hoeft, F. (2017). Possible roles for fronto-striatal circuits in reading disorder. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *72*, 243–260. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2016.10.025>
- Hari, R., & Renvall, H. (2001). Impaired processing of rapid stimulus sequences in dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, *5*(12), 525–532. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01801-5](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01801-5)
- Harm, M. W., & Seidenberg, M. S. (1999). Phonology, reading acquisition, and dyslexia: Insights from connectionist models. *Psychological Review*, *106*, 491–528. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.106.3.491>
- Harm, M. W., & Seidenberg, M. S. (2004). Computing the Meanings of Words in Reading: Cooperative Division of Labor Between Visual and Phonological Processes. *Psychological Review*, *111*(3), 662–720. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.111.3.662>
- Harrar, V., Tammam, J., Pérez-Bellido, A., Pitt, A., Stein, J., & Spence, C. (2014). Multisensory Integration and Attention in Developmental Dyslexia. *Current Biology*, *24*(5), 531–535. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.01.029>
- Harrar-Eskinazi, K. L., De Cara, B., Leloup, G., Denis-Noël, A., Lefèvre, E., Nothelier, J., Caci, H.,

- Ziegler, J. C., & Faure, S. (2022). Intensive multimodal remediation program for dyslexic readers aged between 8 to 13 years. In F. Bois-Parriaud, S. Joly-Froment, & A. Witko (Eds.), *Actualités du langage écrit: Actes 2022* (Isbergues, pp. 376–405). Ortho Edition.
- Harrar-Eskinazi, K. L., De Cara, B., Leloup, G., & Faure, S. (2019). Apports des technologies numériques dans l'aide à l'apprentissage de la lecture. In A. Bentolila & B. Germain (Eds.), *L'apprentissage de la lecture* (Nathan, pp. 307–315).
- Harrar-Eskinazi, K. L., De Cara, B., Leloup, G., Nothelier, J., Caci, H., Ziegler, J., & Faure, S. (2021). Developmental Dyslexia and Remediation Methods (DDMR): Presentation of a multimodal intervention illustrated by a case study. *Rééducation Orthophonique*, 288, 119–154.
- Harrar-Eskinazi, K. L., De Cara, B., Leloup, G., Nothelier, J., Caci, H., Ziegler, J., & Faure, S. (2022). Developmental dyslexia and methods for remediation (DDMR). Multimodal intervention in French-speaking children aged between 8 and 13 years: Study protocol for a randomized multicenter controlled crossover trial. *BMC Pediatrics*, 22(741). <https://doi.org/10.1186/s12887-022-03701-8>
- Harrar-Eskinazi, K. L., Nothelier, J., & Versio, M. (2020). *Naming Speed*.
- Hatcher, P. J., Hulme, C., & Ellis, A. W. (1994). Ameliorating Early Reading Failure by Integrating the Teaching of Reading and Phonological Skills: The Phonological Linkage Hypothesis. *Child Development*, 65(1), 41. <https://doi.org/10.2307/1131364>
- Hauser, R. M. (1994). Measuring Socioeconomic Status in Studies of Child Development. *Child Development*, 65(6), 1541–1545. <https://doi.org/10.2307/1131279>
- Hausknecht, J. P., Halpert, J. A., Di Paolo, N. T., & Moriarty Gerrard, M. O. (2007). Retesting in selection: A meta-analysis of coaching and practice effects for tests of cognitive ability. *Journal of Applied Psychology*, 92(2), 373.
- Hawelka, S., Gagl, B., & Wimmer, H. (2010). A dual-route perspective on eye movements of dyslexic readers. *Cognition*, 115(3), 367–379. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.11.004>
- Hayes, E. A., Warrier, C. M., Nicol, T. G., Zecker, S. G., & Kraus, N. (2003). Neural plasticity following auditory training in children with learning problems. *Clinical Neurophysiology*, 114(4), 673–684. [https://doi.org/10.1016/S1388-2457\(02\)00414-5](https://doi.org/10.1016/S1388-2457(02)00414-5)
- Hazard, M.-C., De Cara, B., Chanquoy, L., & Negro, I. (2020). Influence des caractéristiques de consistance orthographique et fréquence lexicale sur la nature des « fautes » d'orthographe en français: Profils développementaux du CE1 à la troisième. *Psychologie Française*, 65(3), 225–241. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2019.06.001>
- Hebb, D. O. (1961). Distinctive features of learning in the higher animal. Brain mechanisms and learning. In *Brain mechanisms and learning*, 37, 46. (pp. 37–46).
- Heikkilä, R., Aro, M., Närhi, V., Westerholm, J., & Ahonen, T. (2013). Does Training in Syllable Recognition Improve Reading Speed? A Computer-Based Trial With Poor Readers From Second and Third Grade. *Scientific Studies of Reading*, 17(6), 398–414. <https://doi.org/10.1080/10888438.2012.753452>
- Heim, S., Freeman, R. B., Eulitz, C., & Elbert, T. (2001). Auditory temporal processing deficit in dyslexia is associated with enhanced sensitivity in the visual modality: *Neuroreport*, 12(3), 507–510. <https://doi.org/10.1097/00001756-200103050-00016>
- Heim, S., & Grande, M. (2012). Fingerprints of developmental dyslexia. *Trends in Neuroscience and Education*, 1(1), 10–14. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2012.09.001>
- Heim, S., Pape-neumann, J., van Ermingen-Marbach, M., Brinkhaus, M., & Grande, M. (2015). Shared vs. Specific brain activation changes in dyslexia after training of phonology, attention, or reading. 220(4), 2191–2207. <https://doi.org/10.1007/s00429-014-0784-y>
- Heim, S., Pape-Neumann, J., van Ermingen-Marbach, M., Brinkhaus, M., & Grande, M. (2015). Shared

- vs. Specific brain activation changes in dyslexia after training of phonology, attention, or reading. *Brain Structure and Function*, 220(4), 2191–2207. <https://doi.org/10.1007/s00429-014-0784-y>
- Heim, S., Tschierse, J., Amunts, K., Wilms, M., Vossel, S., Willmes, K., Grabowska, A., & Huber, W. (2008). Cognitive subtypes of dyslexia. *Acta Neurobiologiae Experimentalis*, 68(1), 73.
- Helland, T., & Morken, F. (2016). Neurocognitive Development and Predictors of L1 and L2 Literacy Skills in Dyslexia: A Longitudinal Study of Children 5–11 Years Old. *Dyslexia*, 22(1), 3–26. <https://doi.org/10.1002/dys.1515>
- Helloin, M. (2019). Restitution et analyse au questionnaire: Prise en soin des troubles du langage écrit. *L'Orthophoniste*, 392, 15–23.
- Hemmerechts, K., Agirdag, O., & Kavadias, D. (2016). The relationship between parental literacy involvement, socio-economic status and reading literacy. *Educational Review*, 69. <https://doi.org/10.1080/00131911.2016.1164667>
- Heth, I., & Lavidor, M. (2015). Improved reading measures in adults with dyslexia following transcranial direct current stimulation treatment. *Neuropsychologia*, 70, 107–113. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2015.02.022>
- Hingorani, A. D., Windt, D. A. v. d., Riley, R. D., Abrams, K., Moons, K. G. M., Steyerberg, E. W., Schroter, S., Sauerbrei, W., Altman, D. G., Hemingway, H., & for the PROGRESS Group. (2013). Prognosis research strategy (PROGRESS) 4: Stratified medicine research. *BMJ*, 346(feb05 1), e5793–e5793. <https://doi.org/10.1136/bmj.e5793>
- Hintzman, D. L. (1984). MINERVA 2: A simulation model of human memory. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 16(2), 96–101. <https://doi.org/10.3758/BF03202365>
- Hintzman, D. L. (1988). Judgments of frequency and recognition memory in a multiple-trace memory model. *Psychological Review*, 95, 528–551. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.95.4.528>
- Ho, C. S.-H., Chan, D. W.-O., Tsang, S.-M., & Lee, S.-H. (2002). The cognitive profile and multiple-deficit hypothesis in Chinese developmental dyslexia. *Developmental Psychology*, 38(4), 543–553. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.38.4.543>
- Hoff, E. (2003). The Specificity of Environmental Influence: Socioeconomic Status Affects Early Vocabulary Development Via Maternal Speech. *Child Development*, 74(5), 1368–1378. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00612>
- Hogan, T. P., Parent, N., & Stephenson, R. (2017). *Introduction à la psychométrie* (Chenelière éducation).
- Horn, J. L. (1965). A rationale and test for the number of factors in factor analysis. *Psychometrika*, 30(2), 179–185. <https://doi.org/10.1007/BF02289447>
- Horowitz-Kraus, T. (2016). Improvement of the Error-detection Mechanism in Adults with Dyslexia Following Reading Acceleration Training: Error Detection in Dyslexia. *Dyslexia*, 22(2), 173–189. <https://doi.org/10.1002/dys.1523>
- Horowitz-Kraus, T., & Breznitz, Z. (2013). Compensated Dyslexics Have a More Efficient Error Detection System Than Noncompensated Dyslexics. *Journal of Child Neurology*, 28(10), 1266–1276. <https://doi.org/10.1177/0883073812460917>
- Horowitz-Kraus, T., Cicchino, N., Amiel, M., Holland, S. K., & Breznitz, Z. (2014). Reading improvement in English- and Hebrew-speaking children with reading difficulties after reading acceleration training. *Annals of Dyslexia*, 64(3), 183–201. <https://doi.org/10.1007/s11881-014-0093-4>
- Horowitz-Kraus, T., DiFrancesco, M., Kay, B., Wang, Y., & Holland, S. K. (2015). Increased resting-state functional connectivity of visual- and cognitive-control brain networks after training in children with reading difficulties. *NeuroImage: Clinical*, 8, 619–630. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2015.06.010>

- Horowitz-Kraus, T., Grainger, M., DiFrancesco, M., Vannest, J., Holland, S. K., & CMIND Authorship Consortium. (2015). Right is not always wrong: DTI and fMRI evidence for the reliance of reading comprehension on language-comprehension networks in the right hemisphere. *Brain Imaging and Behavior*, 9(1), 19–31. <https://doi.org/10.1007/s11682-014-9341-9>
- Horowitz-Kraus, T., Hershey, A., Kay, B., & DiFrancesco, M. (2019). Differential effect of reading training on functional connectivity in children with reading difficulties with and without ADHD comorbidity. *Journal of Neurolinguistics*, 49, 93–108. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2018.09.002>
- Horowitz-Kraus, T., Vannest, J. J., Kadis, D., Cicchino, N., Wang, Y. Y., & Holland, S. K. (2014). Reading acceleration training changes brain circuitry in children with reading difficulties. *Brain and Behavior*, 4(6), 886–902. <https://doi.org/10.1002/brb3.281>
- Hothorn, T., Bretz, F., & Westfall, P. (2008). Simultaneous inference in general parametric models. *Biometrical Journal: Journal of Mathematical Methods in Biosciences*, 50(3), 346–363.
- Huber, E., Donnelly, P. M., Rokem, A., & Yeatman, J. D. (2018). Rapid and widespread white matter plasticity during an intensive reading intervention. *Nature Communications*, 9(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04627-5>
- Huguenin, C. (1999). *La Planète de Alphas (The Planet of the Alphas)*.
- Hulme, C., Bowyer-Crane, C., Carroll, J. M., Duff, F. J., & Snowling, M. J. (2012). The Causal Role of Phoneme Awareness and Letter-Sound Knowledge in Learning to Read: Combining Intervention Studies With Mediation Analyses. *Psychological Science*, 23(6), 572–577. <https://www.jstor.org/stable/41489742>
- Hulme, C., & Snowling, M. J. (2013). Learning to Read: What We Know and What We Need to Understand Better. *Child Development Perspectives*, 7(1), 1–5. <https://doi.org/10.1111/cdep.12005>
- Huss, M., Verney, J. P., Fosker, T., Mead, N., & Goswami, U. (2011). Music, rhythm, rise time perception and developmental dyslexia: Perception of musical meter predicts reading and phonology. *Cortex*, 16.
- Hutcheon, B., & Yarom, Y. (2000). Resonance, oscillation and the intrinsic frequency preferences of neurons. *Trends in Neurosciences*, 23(5), 216–222. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(00\)01547-2](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(00)01547-2)
- Hutzler, F., Kronbichler, M., Jacobs, A. M., & Wimmer, H. (2006). Perhaps correlational but not causal: No effect of dyslexic readers' magnocellular system on their eye movements during reading. *Neuropsychologia*, 44(4), 637–648. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2005.06.006>
- Hutzler, F., & Wimmer, H. (2004). Eye movements of dyslexic children when reading in a regular orthography. *Brain and Language*, 89(1), 235–242. [https://doi.org/10.1016/S0093-934X\(03\)00401-2](https://doi.org/10.1016/S0093-934X(03)00401-2)
- Ilaria, B., Marcella, B., Valentina, P., Juri, T., Tony, U., Andrea, Z., & Calabrò, G. (2022). Clustering analysis of factors affecting academic career of university students with dyslexia in Italy. *Scientific Reports*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-12985-w>
- Jacobs, A. M., & Grainger, J. (1992). Testing a semistochastic variant of the interactive activation model in different word recognition experiments. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18(4), 1174–1188. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.18.4.1174>
- Jainta, S., & Kapoula, Z. (2011). Dyslexic Children Are Confronted with Unstable Binocular Fixation while Reading. *PLoS ONE*, 6(4), e18694. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0018694>
- Jared, D., Levy, B. A., & Rayner, K. (1999). The role of phonology in the activation of word meanings during reading: Evidence from proofreading and eye movements. *Journal of Experimental Psychology: General*, 128, 219–264. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.128.3.219>
- Javourey-Drevet, L., Dufau, S., François, T., Gala, N., Ginestié, J., & Ziegler, J. C. (2022).

- Simplification of literary and scientific texts to improve reading fluency and comprehension in beginning readers of French. *Applied Psycholinguistics*, 43(2), 485–512. <https://doi.org/10.1017/S014271642100062X>
- Joanisse, M. F., Manis, F. R., Keating, P., & Seidenberg, M. S. (2000). Language Deficits in Dyslexic Children: Speech Perception, Phonology, and Morphology. *Journal of Experimental Child Psychology*, 77(1), 30–60. <https://doi.org/10.1006/jecp.1999.2553>
- Johnson, M. H. (2001). Functional brain development in humans. *Nature Reviews Neuroscience*, 2(7), Article 7. <https://doi.org/10.1038/35081509>
- Johnston, A., Bruno, A., Watanabe, J., Quansah, B., Patel, N., Dakin, S., & Nishida, S. (2008). Visually-based temporal distortion in dyslexia. *Vision Research*, 48(17), 1852–1858. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2008.04.029>
- Jones, M. R., Moynihan, H., MacKenzie, N., & Puente, J. (2002). Temporal Aspects of Stimulus-Driven Attending in Dynamic Arrays. *PSYCHOLOGICAL SCIENCE*, 13(4).
- Joo, S. J., Donnelly, P. M., & Yeatman, J. D. (2017). The causal relationship between dyslexia and motion perception reconsidered. *Scientific Reports*, 7(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-04471-5>
- Joo, S. J., White, A. L., Strodtman, D. J., & Yeatman, J. D. (2018). Optimizing text for an individual's visual system: The contribution of visual crowding to reading difficulties. *Cortex*, 103, 291–301. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.03.013>
- Jordan, J.-A., & Dyer, K. (2017). Psychological Well-being Trajectories of Individuals with Dyslexia Aged 3–11 Years. *Dyslexia*, 23(2), 161–180. <https://doi.org/10.1002/dys.1555>
- Jordan, M. I., & Mitchell, T. M. (2015). Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. *Science*, 349(6245), 255–260. <https://doi.org/10.1126/science.aaa8415>
- Judge, J., Knox, P. C., & Caravolas, M. (2013). Spatial Orienting of Attention in Dyslexic Adults using Directional and Alphabetic Cues: Spatial Orienting in Dyslexia. *Dyslexia*, 19(2), 55–75. <https://doi.org/10.1002/dys.1452>
- Juel, C. (1988). *Learning to Read and Write: A Longitudinal Study of 54 Children From First Through Fourth Grades*. 80, 437–447.
- Kaplan, E., & Shapley, R. M. (1986). The primate retina contains two types of ganglion cells, with high and low contrast sensitivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 83(8), 2755–2757. <https://doi.org/10.1073/pnas.83.8.2755>
- Kapoula, Z., Bucci, M. P., Jurion, F., Ayoun, J., Afkhami, F., & Brémond-Gignac, D. (2006). Evidence for frequent divergence impairment in French dyslexic children: Deficit of convergence relaxation or of divergence per se? *Graefe's Archive for Clinical and Experimental Ophthalmology*, 245(7), 931–936. <https://doi.org/10.1007/s00417-006-0490-4>
- Kapoula, Z., Ganem, R., Poncet, S., Gintautas, D., Eggert, T., Brémond-Gignac, D., & Bucci, M. P. (2009). Free exploration of painting uncovers particularly loose yoking of saccades in dyslexics. *Dyslexia*, 15(3), 243–259. <https://doi.org/10.1002/dys.377>
- Karipidis, I. I., Pleisch, G., Brandeis, D., Roth, A., Röthlisberger, M., Schneebeli, M., Walitza, S., & Brem, S. (2018). Simulating reading acquisition: The link between reading outcome and multimodal brain signatures of letter–speech sound learning in prereaders. *Scientific Reports*, 8(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24909-8>
- Kassambara, A. (2021). rstatix: Pipe-friendly framework for basic statistical tests. R package version 0.7. 0. *Computer Software J. Htps://CRAN. R-Proje Ct. Org/Packa Ge= Rstatix*.
- Kassambara, A., & Mundt, F. (2021). *Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses, R Package Version 1.0. 7. 2020*.
- Kayser, C., & Logothetis, N. K. (2007). Do early sensory cortices integrate cross-modal information?

- Brain Structure and Function*, 212(2), 121–132. <https://doi.org/10.1007/s00429-007-0154-0>
- 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)
- Kéita, L., & Bedoin, N. (2011). Hemispheric asymmetries in hierarchical stimulus processing are modulated by stimulus categories and their predictability. *Laterality: Asymmetries of Body, Brain and Cognition*, 16(3), 333–355. <https://doi.org/10.1080/13576501003671603>
- Kent, D. M., & Shah, N. D. (2012). Risk Models and Patient-Centered Evidence: Should Physicians Expect One Right Answer? *JAMA*, 307(15), 1585. <https://doi.org/10.1001/jama.2012.469>
- Kermani, M., Verghese, A., & Vidyasagar, T. R. (2018). Attentional asymmetry between visual hemifields is related to habitual direction of reading and its implications for debate on cause and effects of dyslexia. *Dyslexia*, 24(1), 33–43. <https://doi.org/10.1002/dys.1574>
- Kershner, J. R. (2016). Network dynamics in dyslexia: Review and implications for remediation. *Research in Developmental Disabilities*, 59, 24–34. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2016.07.014>
- Keshavarzi, M., Mandke, K., Macfarlane, A., Parvez, L., Gabrielczyk, F., Wilson, A., & Goswami, U. (2022). Atypical delta-band phase consistency and atypical preferred phase in children with dyslexia during neural entrainment to rhythmic audio-visual speech. *NeuroImage: Clinical*, 35, 103054. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2022.103054>
- Kevan, A., & Pammer, K. (2008). Visual deficits in pre-readers at familial risk for dyslexia. *Vision Research*, 48(28), 2835–2839. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2008.09.022>
- Kimel, E., Lieder, I., & Ahissar, M. (2022). Repeated series learning revisited with a novel prediction on the reduced effect of item frequency in dyslexia. *Scientific Reports*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16805-z>
- King, W. M., Giess, S. A., & Lombardino, L. J. (2007). Subtyping of children with developmental dyslexia via bootstrap aggregated clustering and the gap statistic: Comparison with the double-deficit hypothesis. *International Journal of Language & Communication Disorders*, 42(1), 77–95. <https://doi.org/10.1080/13682820600806680>
- Kintsch, W., & Van Dijk, T. A. (1978). Toward a model of text comprehension and production. *Psychological Review*, 85(5), 363.
- Kirby, J. R., Georgiou, G. K., Martinussen, R., Parrila, R., Bowers, P., & Landerl, K. (2010). Naming Speed and Reading: From Prediction to Instruction. *Reading Research Quarterly*, 45(3), 341–362. <https://doi.org/10.1598/RRQ.45.3.4>
- Kirk, C., & Gillon, G. T. (2009). Integrated Morphological Awareness Intervention as a Tool for Improving Literacy. *Language, Speech, and Hearing Services in Schools*, 40(3), 341–351. [https://doi.org/10.1044/0161-1461\(2008/08-0009\)](https://doi.org/10.1044/0161-1461(2008/08-0009))
- Kjeldsen, A.-C., Educ, L., Saarento-Zaprudin, S. K., & Niemi, P. O. (2019). Kindergarten Training in Phonological Awareness: Fluency and Comprehension Gains Are Greatest for Readers at Risk in Grades 1 Through 9. *Journal of Learning Disabilities*, 52(5), 366–382. <https://doi.org/10.1177/0022219419847154>
- Korinth, S. P., Dimigen, O., Sommer, W., & Breznitz, Z. (2016). Reading training by means of disappearing text: Effects on reading performance and eye movements. *Reading and Writing*, 29(6), 1245–1268. <https://doi.org/10.1007/s11145-016-9635-y>
- Korinth, S. P., & Nagler, T. (2021). Improving reading rates and comprehension? Benefits and limitations of the reading acceleration approach. *Language and Linguistics Compass*, 15(3). <https://doi.org/10.1111/lnc3.12408>
- Kraus, N. (2012). Atypical brain oscillations: A biological basis for dyslexia? *Trends in Cognitive Sciences*, 16(1), 12–13. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.12.001>

- Kraus, T. H.-, & Breznitz, Z. (2009). Can the Error Detection Mechanism Benefit from Training the Working Memory? A Comparison between Dyslexics and Controls — An ERP Study. *PLoS ONE*, 4(9), e7141. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0007141>
- Kronshabel, J., Brem, S., Maurer, U., & Brandeis, D. (2014). The level of audiovisual print–speech integration deficits in dyslexia. *Neuropsychologia*, 62, 245–261. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.07.024>
- Kujala, T., Karma, K., Ceponiene, R., Belitz, S., Turkkila, P., Tervaniemi, M., & Naatanen, R. (2001). Plastic neural changes and reading improvement caused by audiovisual training in reading-impaired children. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 98(18), 10509–10514. <https://doi.org/10.1073/pnas.181589198>
- Kulik, J. A., Kulik, C.-L. C., & Bangert, R. L. (1984). Effects of Practice on Aptitude and Achievement Test Scores. *American Educational Research Journal*, 21(2), 435–447. <https://doi.org/10.3102/00028312021002435>
- Lachmann, T., Berti, S., Kujala, T., & Schröger, E. (2005). Diagnostic subgroups of developmental dyslexia have different deficits in neural processing of tones and phonemes. *International Journal of Psychophysiology*, 56(2), 105–120. <https://doi.org/10.1016/j.ijpsycho.2004.11.005>
- Lachmann, T., Schmitt, A., Braet, W., & van Leeuwen, C. (2014). Letters in the forest: Global precedence effect disappears for letters but not for non-letters under reading-like conditions. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00705>
- Lallier, M., Donnadieu, S., & Valdois, S. (2013). 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>
- Lallier, M., Tainturier, M.-J., Dering, B., Donnadieu, S., Valdois, S., & Thierry, G. (2010). Behavioral and ERP evidence for amodal sluggish attentional shifting in developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, 48(14), 4125–4135. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.09.027>
- Landerl, K., Freudenthaler, H. H., Heene, M., De Jong, P. F., Desrochers, A., Manolitsis, G., Parrila, R., & Georgiou, G. K. (2019). Phonological Awareness and Rapid Automatized Naming as Longitudinal Predictors of Reading in Five Alphabetic Orthographies with Varying Degrees of Consistency. *Scientific Studies of Reading*, 23(3), 220–234. <https://doi.org/10.1080/10888438.2018.1510936>
- 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>
- Lang, E., & Villuendas, A. (2011). *Le phonème*. Orthopratic. http://www.orthopratic.com/fr/le-phoneme_r_101.html
- Lassault, J., Sprenger-Charolles, L., Albrand, J.-P., Alavoine, E., Richardson, U., Lyytinen, H., & Ziegler, J. C. (2022). Testing the Effects of GraphoGame Against a Computer-Assisted Math Intervention in Primary School. *Scientific Studies of Reading*, 26(6), 449–468. <https://doi.org/10.1080/10888438.2022.2052884>
- Lassault, J., & Ziegler, J. C. (2018). Les outils numériques d'aide à l'apprentissage de la lecture: *Langue française*, N° 199(3), 111–121. <https://doi.org/10.3917/lf.199.0111>
- Lassus-Sangosse, D., N'guyen-Morel, M.-A., & Valdois, S. (2008). Sequential or simultaneous visual processing deficit in developmental dyslexia? *Vision Research*, 48(8), 979–988. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2008.01.025>
- Launay, L., Maeder, C., Roustit, J., & Touzin, M. (2018). *Evaléo 6-15: Évaluation du langage écrit et*

du langage oral. Orthoéditions.

- Lawton, T. (2000). *Methods and Apparatus For Diagnosing and Remediating Reading Disorders*. (Patent No. 6,045,515, 6,213,956 B1).
- Lawton, T. (2016). Improving Dorsal Stream Function in Dyslexics by Training Figure/Ground Motion Discrimination Improves Attention, Reading Fluency, and Working Memory. *Frontiers in Human Neuroscience*, 10. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00397>
- Lawton, T. (2019). Increasing visual timing by movement discrimination exercises improves reading fluency, attention span, and memory retention in dyslexics. *Neurology and Neurosurgery*, 2(1). <https://doi.org/10.15761/NNS.1000118>
- Laycock, R., & Crewther, S. (2008). Towards an understanding of the role of the ‘magnocellular advantage’ in fluent reading. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 32(8), 1494–1506. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2008.06.002>
- Lê, S., Josse, J., & Husson, F. (2008). FactoMineR: An R package for multivariate analysis. *Journal of Statistical Software*, 25, 1–18.
- Lecocq, P. (1998). *É.co.s.se: A test of syntaxico-semantic comprehension (manual and proofs): Two volumes*. Presses Univ. Septentrion.
- Lefavrais, P. (1967). *Alouette: Reading efficiency test*. Les éditions du centre de psychologie appliquée.
- Lefavrais, P. (2005). *Alouette-R: test d'analyse de la vitesse en lecture à partir d'un texte*. Les éditions du centre de psychologie appliquée.
- Lefèvre, E., Vinceneux, A., Wattelet, C., Lavoine, C., Flahaut, E., & Leloup, G. (2022). Elor: Entraînement du lexique orthographique. *En Cours de Soumission*.
- Lehongre, K., Morillon, B., Giraud, A.-L., & Ramus, F. (2013). Impaired auditory sampling in dyslexia: Further evidence from combined fMRI and EEG. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2013.00454>
- Lehongre, K., Ramus, F., Villiermet, N., Schwartz, D., & Giraud, A.-L. (2011). Altered Low-Gamma Sampling in Auditory Cortex Accounts for the Three Main Facets of Dyslexia. *Neuron*, 72(6), 1080–1090. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2011.11.002>
- Leibnitz, L., Grainger, J., & Muneaux, M. (2017). Processus visuo-attentionnels et lecture: Une synthèse. *année psychologique*, 27.
- Leigh, R., & Zee, D. (2015). *The neurology of eye movements* (Oxford University Press).
- Leloup, G., Anders, R., Charlet, V., Eula-Fantozzi, B., Fossoud, C., & Cavalli, E. (2021a). Improving reading skills in children with dyslexia: Efficacy studies on a newly proposed remedial intervention—repeated reading with vocal music masking (RVM). *Annals of Dyslexia*, 71(1), 60–83. <https://doi.org/10.1007/s11881-021-00222-4>
- Leloup, G., Anders, R., Charlet, V., Eula-Fantozzi, B., Fossoud, C., & Cavalli, E. (2021b). Improving reading skills in children with dyslexia: Efficacy studies on a newly proposed remedial intervention—repeated reading with vocal music masking (RVM). *Annals of Dyslexia*, 71(1), 60–83. <https://doi.org/10.1007/s11881-021-00222-4>
- Leloup, G., Launay, L., & Witco. (2022). *Recommandations de Bonne Pratique d'Évaluation, de Prévention et de Remédiation des troubles du langage écrit chez l'enfant et l'adulte – Méthode « Recommandations par Consensus Formalisé »: Argumentaire scientifique et clinique* (Sous l'égide du Collège Français d'Orthophonie, composé de l'Union Nationale pour le Développement de la recherche et de l'évaluation de l'orthophonie (UNADREO) et de la Fédération Nationale des orthophonistes (FNO)). Collège Français d'Orthophonie. <https://www.college-francais-orthophonie.fr/les-recommandations-de-bonne-pratique/>
- Lenth, R. V. (2021). *emmeans: Estimated Marginal Means, Aka Least-Squares Means. R Package v 1.5. 5-1 (2021)*.

- Lété, B., Peereman, R., & Fayol, M. (2008). Consistency and word-frequency effects on spelling among first- to fifth-grade French children: A regression-based study. *Journal of Memory and Language*, 58(4), 952–977. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2008.01.001>
- Lété, B., Sprenger-Charolles, L., & Colé, P. (2004). MANULEX: A grade-level lexical database from French elementary school readers. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 36(1), 156–166. <https://doi.org/10.3758/BF03195560>
- Li, S., Zheng, J., & Chiang, F.-K. (2022). Examining the effects of digital devices on students' learning performance and motivation in an enhanced one-to-one environment: A longitudinal perspective. *Technology, Pedagogy and Education*, 31(1), 1–13. <https://doi.org/10.1080/1475939X.2021.1942185>
- Lieberman, Alvin. M., Harris, K. S., Hoffman, H. S., & Griffith, B. C. (1957). The discrimination of speech sounds within and across phoneme boundaries. *Journal of Experimental Psychology*, 54(5), 358–368. <https://doi.org/10.1037/h0044417>
- Lieberman, I. Y. (1973). Segmentation of the spoken word and reading acquisition. *Bulletin of the Orton Society*, 23(1), 64–77. <https://doi.org/10.1007/BF02653842>
- Lieder, I., Adam, V., Frenkel, O., Jaffe-Dax, S., Sahani, M., & Ahissar, M. (2019). Perceptual bias reveals slow-updating in autism and fast-forgetting in dyslexia. *Nature Neuroscience*, 22(2), 256–264.
- Lievens, F., Reeve, C. L., & Heggstad, E. D. (2007). An examination of psychometric bias due to retesting on cognitive ability tests in selection settings. *Journal of Applied Psychology*, 92, 1672–1682. <https://doi.org/10.1037/0021-9010.92.6.1672>
- Lin, D., Mo, J., Liu, Y., & Li, H. (2019). Developmental Changes in the Relationship Between Character Reading Ability and Orthographic Awareness in Chinese. *Frontiers in Psychology*, 10, 2397. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02397>
- Lindamood, C. H., & Lindamood, P. C. (1984). *Auditory discrimination in depth*. [PRO-ED].
- Lipkovich, I., Dmitrienko, A., & B., R. (2017). Tutorial in biostatistics: Data-driven subgroup identification and analysis in clinical trials: I. LIPKOVICH, A. DMITRIENKO AND R. B. D'AGOSTINO, SR. *Statistics in Medicine*, 36(1), 136–196. <https://doi.org/10.1002/sim.7064>
- Liu, T., Thiebaut de Schotten, M., Altarelli, I., Ramus, F., & Zhao, J. (2022). Neural dissociation of visual attention span and phonological deficits in developmental dyslexia: A hub-based white matter network analysis. *Human Brain Mapping*, 43(17), 5210–5219. <https://doi.org/10.1002/hbm.25997>
- Livingston, E. M., Siegel, L. S., & Ribary, U. (2018). Developmental dyslexia: Emotional impact and consequences. *Australian Journal of Learning Difficulties*, 23(2), 107–135. <https://doi.org/10.1080/19404158.2018.1479975>
- Livingstone, M. S. (1991). Physiological and anatomical evidence for a magnocellular defect in developmental dyslexia. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 88, 7943–7947.
- Lizarazu, M., Lallier, M., Molinaro, N., Bourguignon, M., Paz-Alonso, P. M., Lerma-Usabiaga, G., & Carreiras, M. (2015). Developmental evaluation of atypical auditory sampling in dyslexia: Functional and structural evidence. *Human Brain Mapping*, 36(12), 4986–5002. <https://doi.org/10.1002/hbm.22986>
- Lizarazu, M., Scotto di Covella, L., van Wassenhove, V., Rivièrè, D., Mizzi, R., Lehongre, K., Hertz-Pannier, L., & Ramus, F. (2021). Neural entrainment to speech and nonspeech in dyslexia: Conceptual replication and extension of previous investigations. *Cortex*, 137, 160–178. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2020.12.024>
- Lobier, M. (2008). *Design of a software program for the rehabilitation of visuo-attentional span disorders*.

- Lobier, M., Zoubrinetzky, R., & Valdois, S. (2011). The visual attention span deficit in dyslexia is visual and not verbal. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, *48*, 768–773. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.09.003>
- Lobier, Muriel. A., Peyrin, C., Le Bas, J.-F., & Valdois, S. (2012). Pre-orthographic character string processing and parietal cortex: A role for visual attention in reading? *Neuropsychologia*, *50*(9), 2195–2204. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.05.023>
- Lobrot, M. (1967). *ORLEC: battery to measure reading and spelling*. bureau d'études et de recherches.
- Lonigan, C. J., Burgess, S. R., & Anthony, J. L. (2000). Development of emergent literacy and early reading skills in preschool children: Evidence from a latent-variable longitudinal study. *Developmental Psychology*, *36*, 596–613. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.36.5.596>
- Loo, J. H. Y., Bamiou, D.-E., Campbell, N., & Luxon, L. M. (2010). Computer-based auditory training (CBAT): Benefits for children with language- and reading-related learning difficulties: Benefits of CBAT in Children with Language- and Reading-Related Learning Difficulties. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *52*(8), 708–717. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2010.03654.x>
- Loo, S. K., Fisher, S. E., Francks, C., Ogdie, M. N., MacPhie, I. L., Yang, M., McCracken, J. T., McGough, J. J., Nelson, S. F., & Monaco, A. P. (2004). Genome-wide scan of reading ability in affected sibling pairs with attention-deficit/hyperactivity disorder: Unique and shared genetic effects. *Molecular Psychiatry*, *9*(5), 485–493.
- Lorusso, M. L., Facoetti, A., & Bakker, D. J. (2011). Neuropsychological Treatment of Dyslexia: Does Type of Treatment Matter? *Journal of Learning Disabilities*, *44*(2), 136–149. <https://doi.org/10.1177/0022219410391186>
- Lorusso, M. L., Facoetti, A., & Molteni, M. (2004). Hemispheric, attentional, and processing speed factors in the treatment of developmental dyslexia. *Brain and Cognition*, *55*(2), 341–348. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2004.02.040>
- Lorusso, M. L., Facoetti, A., Paganoni, P., Pezzani, M., & Molteni, M. (2006). Effects of visual hemisphere-specific stimulation versus reading-focused training in dyslexic children. *Neuropsychological Rehabilitation*, *16*(2), 194–212. <https://doi.org/10.1080/09602010500145620>
- Lorusso, M. L., Facoetti, A., Toraldo, A., & Molteni, M. (2005). Tachistoscopic treatment of dyslexia changes the distribution of visual-spatial attention. *Brain and Cognition*, *57*(2), 135–142. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2004.08.057>
- Lorusso, M. L., & Toraldo, A. (2023). Revisiting Multifactor Models of Dyslexia: Do They Fit Empirical Data and What Are Their Implications for Intervention? *Brain Sciences*, *13*(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/brainsci13020328>
- Lovett, M. W., Borden, S. L., Lacerenza, L., Frijters, J. C., Steinbach, K. A., & De Palma, M. (2000). *Components of Effective Remediation for Developmental Reading Disabilities: Combining Phonological and Strategy-Based Instruction to Improve Outcomes*. *92*(2), 263–283. <https://doi.org/10.1037//O022-0663.92.2.263>
- Lovett, M. W., Frijters, J. C., Wolf, M., Steinbach, K. A., Sevcik, R. A., & Morris, R. D. (2017). Early intervention for children at risk for reading disabilities: The impact of grade at intervention and individual differences on intervention outcomes. *Journal of Educational Psychology*, *109*, 889–914. <https://doi.org/10.1037/edu0000181>
- 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. (1995). Toward a definition of dyslexia. *Annals of Dyslexia*, *45*(1), 1–27. <https://doi.org/10.1007/BF02648210>
- MacArthur, C. A., Ferretti, R. P., Okolo, C. M., & Cavalier, A. R. (2001). Technology Applications for Students with Literacy Problems: A Critical Review. *The Elementary School Journal*, *101*(3), 273–

301. <https://doi.org/10.1086/499669>
- MacDonald, M. C., Pearlmutter, N. J., & Seidenberg, M. S. (1994). The lexical nature of syntactic ambiguity resolution. *Psychological Review*, *101*(4), 676.
- Magnan, A., & Ecalte, J. (2006). Audio-visual training in children with reading disabilities. *Computers & Education*, *46*(4), 407–425. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2004.08.008>
- Majerus, S., & Cowan, N. (2016). The Nature of Verbal Short-Term Impairment in Dyslexia: The Importance of Serial Order. *Frontiers in Psychology*, *7*, 1–8. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01522>
- Majerus, S., Poncelet, M., Van der Linden, M., Albouy, G., Salmon, E., Sterpenich, V., Vandewalle, G., Collette, F., & Maquet, P. (2006). The left intraparietal sulcus and verbal short-term memory: Focus of attention or serial order? *NeuroImage*, *32*(2), 880–891. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.03.048>
- Manis, F. R., Custodio, R., & Szeszulski, P. A. (1993). Development of phonological and orthographic skill: A 2-year longitudinal study of dyslexic children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *56*(1), 64–86. <https://doi.org/10.1006/jecp.1993.1026>
- Manis, F. R., McBride-Chang, C., Seidenberg, M. S., Keating, P., Doi, L. M., Munson, B., & Petersen, A. (1997). Are Speech Perception Deficits Associated with Developmental Dyslexia? *Journal of Experimental Child Psychology*, *66*(2), 211–235. <https://doi.org/10.1006/jecp.1997.2383>
- Mano, Q. R. (2016). Developing Sensitivity to Subword Combinatorial Orthographic Regularity (SCORE): A Two-Process Framework. *Scientific Studies of Reading*, *20*(3), 231–247. <https://doi.org/10.1080/10888438.2016.1141210>
- Marchesotti, S., Nicolle, J., Merlet, I., Arnal, L. H., Donoghue, J. P., & Giraud, A.-L. (2020). Selective enhancement of low-gamma activity by tACS improves phonemic processing and reading accuracy in dyslexia. *PLOS Biology*, *18*(9), e3000833. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.3000833>
- Marinelli, C. V., Iaia, M., Burani, C., & Angelelli, P. (2021). Sensitivity to distributional properties of the orthography in the spelling of Italian children with dyslexia. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *74*(6), 1007–1020. <https://doi.org/10.1177/1747021821998925>
- Marinus, E., de Jong, P., & van der Leij, A. (2012). Increasing Word-Reading Speed in Poor Readers: No Additional Benefits of Explicit Letter-Cluster Training. *Scientific Studies of Reading*, *16*(2), 166–185. <https://doi.org/10.1080/10888438.2011.554471>
- Marshall, J. C., & Newcombe, F. (1973). Patterns of paralexia: A psycholinguistic approach. *Journal of Psycholinguistic Research*, *2*(3), 175–199. <https://doi.org/10.1007/BF01067101>
- Martelli, M., Di Filippo, G., Spinelli, D., & Zoccolotti, P. (2009). Crowding, reading, and developmental dyslexia. *Journal of Vision*, *9*(4), 14–14. <https://doi.org/10.1167/9.4.14>
- 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., 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>
- Masten, A. S. (2011). Resilience in children threatened by extreme adversity: Frameworks for research, practice, and translational synergy. *Development and Psychopathology*, *23*(2), 493–506. <https://doi.org/10.1017/S0954579411000198>
- Masutto, C., Bravar, L., & Fabbro, F. (1994). Neurolinguistic Differentiation of Children with Subtypes of Dyslexia. *Journal of Learning Disabilities*, *27*(8), 520–526. <https://doi.org/10.1177/002221949402700807>
- Mathes, P. G., Denton, C. A., Fletcher, J. M., Anthony, J. L., Francis, D. J., & Schatschneider, C. (2005).

- The effects of theoretically different instruction and student characteristics on the skills of struggling readers. *Reading Research Quarterly*, 40(2), 148–182. <https://doi.org/10.1598/RRQ.40.2.2>
- Matthews, A. J., & Martin, F. H. (2009). Electrophysiological indices of spatial attention during global/local processing in good and poor phonological decoders. *Brain and Language*, 111(3), 152–160. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2009.09.002>
- Mattis, S., French, J. H., & Rapin, I. (1975). Dyslexia in Children and Young Adults: Three Independent Neuropsychological Syndromes. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 17(2), 150–163. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1975.tb03467.x>
- Mazur-Palandre, A. (2018). La dyslexie à l'âge adulte: La persistance des difficultés orthographiques. *Congrès Mondial de Linguistique Française*, 46. <https://doi.org/10.1051/shsconf/20184610003>
- McArthur, G., Kohnen, S., Jones, K., Eve, P., Banales, E., Larsen, L., & Castles, A. (2015). Replicability of sight word training and phonics training in poor readers: A randomised controlled trial. *PeerJ*, 3, e922. <https://doi.org/10.7717/peerj.922>
- McArthur, G. M. (2007). Test–retest effects in treatment studies of reading disability: The devil is in the detail. *Dyslexia*, 13(4), 240–252. <https://doi.org/10.1002/dys.355>
- McArthur, G. M., & Bishop, D. V. M. (2001). Auditory perceptual processing in people with reading and oral language impairments: Current issues and recommendations. *Dyslexia*, 7(3), 150–170. <https://doi.org/10.1002/dys.200>
- McArthur, G. M., Castles, A., Kohnen, S., Larsen, L., Jones, K., Anandakumar, T., & Banales, E. (2015). Sight Word and Phonics Training in Children With Dyslexia. *Journal of Learning Disabilities*, 48(4), 391–407. <https://doi.org/10.1177/0022219413504996>
- McArthur, G. M., Ellis, D., Atkinson, C. M., & Coltheart, M. (2008). Auditory processing deficits in children with reading and language impairments: Can they (and should they) be treated? *Cognition*, 107(3), 946–977. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.12.005>
- McArthur, G. M., Filardi, N., Francis, D. A., Boyes, M. E., & Badcock, N. A. (2020). Self-concept in poor readers: A systematic review and meta-analysis. *PeerJ*, 8, e8772. <https://doi.org/10.7717/peerj.8772>
- McArthur, G. M., Sheehan, Y., Badcock, N. A., Francis, D. A., Wang, H.-C., Kohnen, S., Banales, E., Anandakumar, T., Marinus, E., & Castles, A. (2018). Phonics training for English-speaking poor readers. *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 2018(11). <https://doi.org/10.1002/14651858.CD009115.pub3>
- McBride-Chang, C. (1995). What Is Phonological Awareness? *Journal of Educational Psychology*, 87(2), 179–192.
- McClelland, J. L., & Rumelhart, D. E. (1981). An interactive activation model of context effects in letter perception: I. An account of basic findings. *Psychological Review*, 88, 375–407. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.88.5.375>
- McDonald, S. A., Carpenter, R. H. S., & Shillcock, R. C. (2005). An Anatomically Constrained, Stochastic Model of Eye Movement Control in Reading. *Psychological Review*, 112, 814–840. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.112.4.814>
- McGee, R., Prior, M., Williams, S., Smart, D., & Sanson, A. (2002). The long-term significance of teacher-rated hyperactivity and reading ability in childhood: Findings from two longitudinal studies. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 43(8), 1004–1017. <https://doi.org/10.1111/1469-7610.00228>
- McGee, R., Williams, S., Share, D. L., Anderson, J., & Silva, P. A. (1986). The Relationship Between Specific Reading Retardation, General Reading Backwardness and Behavioural Problems in a Large Sample of Dunedin Boys: A Longitudinal Study from Five to Eleven Years. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 27(5), 597–610. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1986.tb00185.x>

- McGrath, L. M., Pennington, B. F., Shanahan, M. A., Santerre-Lemmon, L. E., Barnard, H. D., Willcutt, E. G., DeFries, J. C., & Olson, R. K. (2011). A multiple deficit model of Reading Disability and Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder: Searching for shared cognitive deficits. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 52(5), 547–557. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2010.02346.x>
- McGrath, L. M., Peterson, R. L., & Pennington, B. F. (2020). The Multiple Deficit Model: Progress, Problems, and Prospects. *Scientific Studies of Reading*, 24(1), 7–13. <https://doi.org/10.1080/10888438.2019.1706180>
- McLaughlin, M. J., Speirs, K. E., & Shenassa, E. D. (2014). Reading Disability and Adult Attained Education and Income: Evidence From a 30-Year Longitudinal Study of a Population-Based Sample. *Journal of Learning Disabilities*, 47(4), 374–386. <https://doi.org/10.1177/0022219412458323>
- McLelland, D., Lavergne, L., & VanRullen, R. (2016). The phase of ongoing EEG oscillations predicts the amplitude of peri-saccadic mislocalization. *Scientific Reports*, 6(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/srep29335>
- McRae, K., Spivey-Knowlton, M. J., & Tanenhaus, M. K. (1998). Modeling the Influence of Thematic Fit (and Other Constraints) in On-line Sentence Comprehension. *Journal of Memory and Language*, 38(3), 283–312. <https://doi.org/10.1006/jmla.1997.2543>
- McTigue, E. M., Solheim, O. J., Zimmer, W. K., & Uppstad, P. H. (2020). Critically Reviewing GraphoGame Across the World: Recommendations and Cautions for Research and Implementation of Computer-Assisted Instruction for Word-Reading Acquisition. *Reading Research Quarterly*, 55(1), 45–73. <https://doi.org/10.1002/rrq.256>
- Medina, F. (2010). *PhonopidoW: training software for phonological components and phonological buffer in working memory*. GNOSIA.
- Meeter, M., Marzouki, Y., Avramiea, A. E., Snell, J., & Grainger, J. (2020). The Role of Attention in Word Recognition: Results from OB1-Reader. *Cognitive Science*, 44(7), e12846. <https://doi.org/10.1111/cogs.12846>
- Mehlhase, H., Bakos, S., Landerl, K., Schulte-Körne, G., & Moll, K. (2019). Orthographic learning in children with isolated and combined reading and spelling deficits. *Child Neuropsychology*, 25(3), 370–393. <https://doi.org/10.1080/09297049.2018.1470611>
- 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., & Lervåg, A. (2012). Oral language skills moderate nonword repetition skills in children with dyslexia: A meta-analysis of the role of nonword repetition skills in dyslexia. *Scientific Studies of Reading*, 16(1), 1–34.
- Melby-Lervåg, M., Lyster, S.-A. H., & Hulme, C. (2012). Phonological skills and their role in learning to read: A meta-analytic review. *Psychological Bulletin*, 138(2), 322–352. <https://doi.org/10.1037/a0026744>
- Menell, P., McAnally, Ken. I., & Stein, F. J. (1999). Psychophysical sensitivity and physiological response to amplitude modulation in adult dyslexic listeners. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 42(4), 797.
- Menghini, D., Finzi, A., Benassi, M., Bolzani, R., Facoetti, A., Giovagnoli, S., Ruffino, M., & Vicari, S. (2010). Different underlying neurocognitive deficits in developmental dyslexia: A comparative study. *Neuropsychologia*, 48(4), 863–872. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.11.003>
- Meteyard, L., & Davies, R. A. I. (2020). Best practice guidance for linear mixed-effects models in psychological science. *Journal of Memory and Language*, 112, 104092. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2020.104092>
- Métral, E. (2011). *Evaluation du Phonème*. OrthoPratic.

- Meulemans, T. U. de L.-Ul. > D. des sciences cognitives > N., Desgranges, B., Adam, S. U. de L.-Ul. > D. des sciences cognitives > D. des sciences cognitives, & Eustache, F. (2003). *Evaluation et prise en charge des troubles mnésiques*. Solal, Marseille, France. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/26029>
- Meyler, A., & Breznitz, Z. (2005). Visual, auditory and cross-modal processing of linguistic and nonlinguistic temporal patterns among adult dyslexic readers. *Dyslexia*, *11*(2), 93–115. <https://doi.org/10.1002/dys.294>
- Millard, S. P., & EnvStats-An, R. (2013). *An R package for environmental statistics*. Springer.
- Molinaro, N., Lizarazu, M., Lallier, M., Bourguignon, M., & Carreiras, M. (2016). Out-of-synchrony speech entrainment in developmental dyslexia. *Human Brain Mapping*, *37*(8), 2767–2783. <https://doi.org/10.1002/hbm.23206>
- Moll, K., & Jones, M. (2013). Naming Fluency in Dyslexic and Nondyslexic Readers: Differential Effects of Visual Crowding in Foveal, Parafoveal, and Peripheral Vision. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *66*(11), 2085–2091. <https://doi.org/10.1080/17470218.2013.840852>
- Monsel, S. (1985). Repetition and lexicon. *Progress of Psychology of Language*, *2*, 147–195.
- Moore, D. R., Rosenberg, J. F., & Coleman, J. S. (2005). Discrimination training of phonemic contrasts enhances phonological processing in mainstream school children☆. *Brain and Language*, *94*(1), 72–85. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2004.11.009>
- Morken, F., Jones, L. Ø., & Helland, W. A. (2021). Disorders of Language and Literacy in the Prison Population: A Scoping Review. *Education Sciences*, *11*(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/educsci11020077>
- Morris, D., Trathen, W., Lomax, R. G., Perney, J., Kucan, L., Frye, E. M., Bloodgood, J. W., Ward, D., & Schlagal, R. (2012). Modeling aspects of print-processing skill: Implications for reading assessment. *Reading and Writing*, *25*(1), 189–215. <https://doi.org/10.1007/s11145-010-9253-z>
- Morris, R. D., Stuebing, K. K., Fletcher, J. M., Shaywitz, S. E., Lyon, G. R., Shankweiler, D. P., Katz, L., Francis, D. J., & Shaywitz, B. A. (1998). Subtypes of reading disability: Variability around a phonological core. *Journal of Educational Psychology*, *90*, 347–373. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.90.3.347>
- Morton, J. (1969). Interaction of information in word recognition. *Psychological Review*, *76*(2), 165–178. <https://doi.org/10.1037/h0027366>
- Morton, J., & Frith, U. (1995). *Causal modeling: A structural approach to developmental psychopathology*.
- Mozer, M. C. (1987). Early parallel processing in reading: A connectionist approach. In *Attention and performance 12: The psychology of reading* (pp. 83–104). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Mozer, M. C., & Behrmann, M. (1990). On the Interaction of Selective Attention and Lexical Knowledge: A Connectionist Account of Neglect Dyslexia. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *2*(2), 96–123. <https://doi.org/10.1162/jocn.1990.2.2.96>
- Muneaux, M., & Ducrot, S. (2014). *Capacités oculomotrices, visuo- attentionnelles et lecture: Un autre regard sur la dyslexie*. 11.
- Murad, M. H., Asi, N., Alsawas, M., & Alahdab, F. (2016). New evidence pyramid. *Evidence Based Medicine*, *21*(4), 125–127. <https://doi.org/10.1136/ebmed-2016-110401>
- Myklebust, H. (1965). *Picture Story Language Test: The Development and Disorders of Written Language*, Vol. 1. New York: Grune & Stratton.
- Nagy, W. E., & Anderson, R. C. (1984). How Many Words Are There in Printed School English? *Reading Research Quarterly*, *19*(3), 304–330. <https://doi.org/10.2307/747823>
- Navon, D. (1977). Forest before trees: The precedence of global features in visual perception. *Cognitive*

- Psychology*, 9(3), 353–383. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(77\)90012-3](https://doi.org/10.1016/0010-0285(77)90012-3)
- Navon, D. (1981). The forest revisited: More on global precedence. *Psychological Research*, 43(1), 1–32. <https://doi.org/10.1007/BF00309635>
- Neely, J. H., & Kahan, T. A. (2001). Is semantic activation automatic? A critical re-evaluation. In *The nature of remembering: Essays in honor of Robert G. Crowder* (pp. 69–93). American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/10394-005>
- Neely, James. H. (1991). Semantic priming effects in visual word recognition: A selective review of current findings and theories. In D. Besner & G. W. Humphreys (Eds.), *Basic processes in reading: Visual word recognition* (pp. 264–336). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Neitzel, A. J., Lake, C., Pellegrini, M., & Slavin, R. E. (2022). A Synthesis of Quantitative Research on Programs for Struggling Readers in Elementary Schools. *Reading Research Quarterly*, 57(1), 149–179. <https://doi.org/10.1002/rrq.379>
- Neural dissociation of phonological and visual attention span disorders in developmental dyslexia: fMRI evidence from two case reports. (2012). *Brain and Language*, 120(3), 381–394. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2011.12.015>
- Newby, R. F., Recht, D., & Caldwell, J. A. (1993). Validation of a clinical method for the diagnosis of two subtypes of dyslexia. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 11, 72–83.
- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (1994). Comparison of deficits in cognitive and motor skills among children with dyslexia. *Annals of Dyslexia*, 44(1), 147–164. <https://doi.org/10.1007/BF02648159>
- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2006). Do cerebellar deficits underlie phonological problems in dyslexia? *Developmental Science*, 9(3), 259–262.
- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2007). Procedural learning difficulties: Reuniting the developmental disorders? *Trends in Neurosciences*, 30(4), 135–141. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2007.02.003>
- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2018). Procedural learning, dyslexia and delayed neural commitment. *Reading and Dyslexia: From Basic Functions to Higher Order Cognition*, 235–269.
- Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., & Dean, P. (2001). Developmental dyslexia: The cerebellar deficit hypothesis. *Trends in Neurosciences*, 24(9), 508–511. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(00\)01896-8](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(00)01896-8)
- Noble, K. G., Wolmetz, M. E., Ochs, L. G., Farah, M. J., & McCandliss, B. D. (2006). Brain–behavior relationships in reading acquisition are modulated by socioeconomic factors. *Developmental Science*, 9(6), 642–654. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2006.00542.x>
- Noordenbos, M. W., Segers, E., Serniclaes, W., Mitterer, H., & Verhoeven, L. (2012). Neural evidence of allophonic perception in children at risk for dyslexia. *Neuropsychologia*, 50(8), 2010–2017. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.04.026>
- Noordenbos, M. W., Segers, E., Serniclaes, W., & Verhoeven, L. (2013). Neural evidence of the allophonic mode of speech perception in adults with dyslexia. *Clinical Neurophysiology*, 124(6), 1151–1162. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2012.12.044>
- Noordenbos, M. W., & Serniclaes, W. (2015). The Categorical Perception Deficit in Dyslexia: A Meta-Analysis. *Scientific Studies of Reading*, 19(5), 340–359. <https://doi.org/10.1080/10888438.2015.1052455>
- Norris, D. (2006). The Bayesian reader: Explaining word recognition as an optimal Bayesian decision process. *Psychological Review*, 113(2), 327–357. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.113.2.327>
- Norris, D., & Kinoshita, S. (2012). Reading through a noisy channel: Why there’s nothing special about the perception of orthography. *Psychological Review*, 119(3), 517–545. <https://doi.org/10.1037/a0028450>
- Norton, E. S., & Wolf, M. (2012). Rapid Automatized Naming (RAN) and Reading Fluency:

- Implications for Understanding and Treatment of Reading Disabilities. *Annual Review of Psychology*, 63(1), 427–452. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120710-100431>
- Nukari, J. M., Laasonen, M. R., Arkkila, E. P., Haapanen, M.-L., Lipsanen, J. O., & Poutiainen, E. T. (2022). Neuropsychological intervention of dyslexia has a positive effect on aspects of psychological well-being in young adults – a randomized controlled study. *Dyslexia*, 28(2), 166–184. <https://doi.org/10.1002/dys.1697>
- O’Brien, G., & Yeatman, J. D. (2021). Bridging sensory and language theories of dyslexia: Toward a multifactorial model. *Developmental Science*, 24(3). <https://doi.org/10.1111/desc.13039>
- OCDE. (2019). *Résultats du PISA 2018 (Volume 1): Savoirs et savoir-faire des élèves*. OECD. <https://doi.org/10.1787/ec30bc50-fr>
- ODD 4. (2023). *Objectif 4. Assurer l'accès de tous à une éducation de qualité, sur un pied d'égalité, et promouvoir les possibilités d'apprentissage tout au long de la vie*. Développement durable. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/fr/education/>
- Odegard, T. N., Ring, J., Smith, S., Biggan, J., & Black, J. (2008). Differentiating the neural response to intervention in children with developmental dyslexia. *Annals of Dyslexia*, 58(1), 1–14. <https://doi.org/10.1007/s11881-008-0014-5>
- O'Regan, J. K., & Jacobs, A. M. (1992). Optimal Viewing Position Effect in Word Recognition: A Challenge to Current Theory. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 18, 185–197.
- Organisation Mondiale de la Santé. (2022). *CIM-11: Classification Internationale des Maladies*. <https://icd.who.int/browse11/l-m/en>
- Ozernov-Palchik, O., Yu, X., Wang, Y., & Gaab, N. (2016). Lessons to be learned: How a comprehensive neurobiological framework of atypical reading development can inform educational practice. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 10, 45–58. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.05.006>
- Pacheco, A., Reis, A., Araújo, S., Inácio, F., Petersson, K. M., & Faísca, L. (2014). Dyslexia heterogeneity: Cognitive profiling of Portuguese children with dyslexia. *Reading and Writing*, 27(9), 1529–1545. <https://doi.org/10.1007/s11145-014-9504-5>
- Pacton, S., Fayol, M., Nys, M., & Peereman, R. (2019). *Implicit Statistical Learning of Graphotactic Knowledge and Lexical Orthographic Acquisition* (pp. 41–66). Brill. https://doi.org/10.1163/9789004394988_004
- Pammer, K. (2014). Temporal sampling in vision and the implications for dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2013.00933>
- Pammer, K., & Wheatley, C. (2001). Isolating the M(y)-cell response in dyslexia using the spatial frequency doubling illusion. *Vision Research*, 41(16), 2139–2147. [https://doi.org/10.1016/S0042-6989\(01\)00092-X](https://doi.org/10.1016/S0042-6989(01)00092-X)
- Papadopoulos, T. C., Spanoudis, G. C., & Georgiou, G. K. (2016). How Is RAN Related to Reading Fluency? A Comprehensive Examination of the Prominent Theoretical Accounts. *Frontiers in Psychology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01217>
- Parrila, R., Kirby, J. R., & McQuarrie, L. (2004). Articulation rate, naming speed, verbal short-term memory, and phonological awareness: Longitudinal predictors of early reading development? *Scientific Studies of Reading*, 8(1), 3–26.
- Partanen, M., Siegel, L. S., & Giaschi, D. E. (2019). Effect of reading intervention and task difficulty on orthographic and phonological reading systems in the brain. *Neuropsychologia*, 130, 13–25. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.07.018>
- Pasqualotto, A., Altarelli, I., De Angeli, A., Menestrina, Z., Bavelier, D., & Venuti, P. (2022). Enhancing reading skills through a video game mixing action mechanics and cognitive training. *Nature Human*

- Behaviour*, 6(4), Article 4. <https://doi.org/10.1038/s41562-021-01254-x>
- Paulesu, E., Danelli, L., & Berlinger, M. (2014). Reading the dyslexic brain: Multiple dysfunctional routes revealed by a new meta-analysis of PET and fMRI activation studies. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8(1–20). <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00830>
- Pecini, C., Spoglianti, S., Bonetti, S., Di Lieto, M. C., Guaran, F., Martinelli, A., Gasperini, F., Cristofani, P., Casalini, C., Mazzotti, S., Salvadorini, R., Bargagna, S., Palladino, P., Cismondo, D., Verga, A., Zorzi, C., Brizzolara, D., Vio, C., & Chilosi, A. M. (2019). Training RAN or reading? A telerehabilitation study on developmental dyslexia. *Dyslexia*, 25(3), 318–331. <https://doi.org/10.1002/dys.1619>
- Peereman, R., & Sprenger-Charolles, L. (2018). Manulex-MorphO, une base de données sur l'orthographe du français intégrant les morpho-phonogrammes: *Langue française*, N° 199(3), 99–109. <https://doi.org/10.3917/lf.199.0099>
- Pelli, D. G., Burns, C. W., Farell, B., & Moore-Page, D. C. (2006). Feature detection and letter identification. *Vision Research*, 46(28), 4646–4674. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2006.04.023>
- Pelli, D. G., Tillman, K. A., Freeman, J., Su, M., Berger, T. D., & Majaj, N. J. (2007). Crowding and eccentricity determine reading rate. *Journal of Vision*, 7(2), 20. <https://doi.org/10.1167/7.2.20>
- Pennington, B. (2006). From single to multiple deficit models of developmental disorders. *Cognition*, 101(2), 385–413. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.04.008>
- Pennington, B. F. (2006). From single to multiple deficit models of developmental disorders. *Cognition*, 101(2), 385–413. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.04.008>
- Pennington, B. F., Cardoso-Martins, C., Green, P. A., & Lefly, D. L. (2001). *Comparing the phonological and double deficit hypotheses for developmental dyslexia*. 14, 707–755.
- 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>
- Perea, M., Panadero, V., Moret-Tatay, C., & Gómez, P. (2012). The effects of inter-letter spacing in visual-word recognition: Evidence with young normal readers and developmental dyslexics. *Learning and Instruction*, 22(6), 420–430. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2012.04.001>
- Peressotti, F., & Grainger, J. (1999). The role of letter identity and letter position in orthographic priming. *Perception & Psychophysics*, 61(4), 691–706. <https://doi.org/10.3758/BF03205539>
- Perfetti, C. A., Zhang, S., & Berent, I. (1992). Chapter 13 Reading in English and Chinese: Evidence for a “Universal” Phonological Principle. In *Advances in Psychology* (Vol. 94, pp. 227–248). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)62798-3](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)62798-3)
- Pernet, C., Valdois, S., Celsis, P., & Démonet, J.-F. (2006). Lateral masking, levels of processing and stimulus category: A comparative study between normal and dyslexic readers. *Neuropsychologia*, 44(12), 2374–2385. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.05.003>
- 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>
- Perry, C., Ziegler, J. C., & Zorzi, M. (2007). Nested incremental modeling in the development of computational theories: The CDP+ model of reading aloud. *Psychological Review*, 114(2), 273–315. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.114.2.273>
- Perry, C., Ziegler, J. C., & Zorzi, M. (2010). Beyond single syllables: Large-scale modeling of reading aloud with the Connectionist Dual Process (CDP++) model. *Cognitive Psychology*, 61(2), 106–151. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2010.04.001>
- Perry, C., Ziegler, J. C., & Zorzi, M. (2014a). When silent letters say more than a thousand words: An

- implementation and evaluation of CDP++ in French. *Journal of Memory and Language*, 72, 98–115. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2014.01.003>
- Perry, C., Ziegler, J. C., & Zorzi, M. (2014b). CDP++-Italian: Modelling Sublexical and Supralexical Inconsistency in a Shallow Orthography. *PLoS ONE*, 9(4), e94291. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094291>
- Perry, C., Zorzi, M., & Ziegler, J. C. (2019). Understanding Dyslexia Through Personalized Large-Scale Computational Models. *Psychological Science*, 30(3), 386–395. <https://doi.org/10.1177/0956797618823540>
- Peterson, R. L., Arnett, A. B., Pennington, B. F., Byrne, B., Samuelsson, S., & Olson, R. K. (2018). Literacy acquisition influences children's rapid automatized naming. *Developmental Science*, 21(3). <https://doi.org/10.1111/desc.12589>
- Peterson, R. L., Boada, R., McGrath, L. M., Willcutt, E. G., Olson, R. K., & Pennington, B. F. (2017). Cognitive Prediction of Reading, Math, and Attention: Shared and Unique Influences. *Journal of Learning Disabilities*, 50(4), 408–421. <https://doi.org/10.1177/0022219415618500>
- 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>
- Peterson, R. L., Pennington, B. F., & Olson, R. K. (2013). Subtypes of developmental dyslexia: Testing the predictions of the dual-route and connectionist frameworks. *Cognition*, 126(1), 20–38. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.08.007>
- Peterson-Karlan, G. R. (2011). *Technology to Support Writing by Students with Learning and Academic Disabilities: Recent Research Trends and Findings*. 7(1).
- Peyrin, C., Démonet, J. F., N'Guyen-Morel, M. A., Le Bas, J. F., & Valdois, S. (2011). Superior parietal lobule dysfunction in a homogeneous group of dyslexic children with a visual attention span disorder. *Brain and Language*, 118(3), 128–138. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2010.06.005>
- Peyroux, E., & Seguin, C. (2018). Critères cliniques et objectifs rééducatifs. In *Rééducation cognitive chez l'enfant* (Deboeck supérieur, pp. 147–180).
- Phénix, T., Diard, J., & Valdois, S. (2016). Les modèles computationnels de lecture. In *Traité de Neurolinguistique* (M. Sato & S. Pinto, pp. 167–182).
- Piérart, B., & Grégoire, J. (2004). *Decode and understand: The reading closure test revisited. Belgian calibration of Lobrot's L3*. 39(2), 87–100.
- Piquard-Kipffer, A., & Sprenger-Charolles, L. (2013). Early predictors of future reading skills: A follow-up of French-speaking children from the beginning of kindergarten to the end of the second grade (age 5 to 8). *Année Psychologique*, 113, 491–521.
- Plaut, D. C., & Booth, J. R. (2000). Individual and developmental differences in semantic priming: Empirical and computational support for a single-mechanism account of lexical processing. *Psychological Review*, 107, 786–823. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.107.4.786>
- Plaut, D. C., & Booth, J. R. (2006). More modeling but still no stages: Reply to Borowsky and Besner. *Psychological Review*, 113, 196–200. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.113.1.196>
- Plaut, D. C., McClelland, J. L., Seidenberg, M. S., & Patterson, K. (1996). Understanding Normal and Impaired Word Reading: Computational Principles in Quasi-Regular Domains. *Psychological Review*, 103(1), 56–115.
- Pomey, M.-P., Flora, L., Karazivan, P., Dumez, V., Lebel, P., Vanier, M.-C., Débarges, B., Clavel, N., & Jouet, E. (2015). Le « Montreal model »: Enjeux du partenariat relationnel entre patients et professionnels de la santé. *Santé Publique*, 51(HS), 41–50. <https://doi.org/10.3917/spub.150.0041>

- Posner, M. I. (1980). Orienting of Attention. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 32(1), 3–25. <https://doi.org/10.1080/00335558008248231>
- Powell, D., Stainthorp, R., Stuart, M., Garwood, H., & Quinlan, P. (2007). An experimental comparison between rival theories of rapid automatized naming performance and its relationship to reading. *Journal of Experimental Child Psychology*, 98(1), 46–68. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2007.04.003>
- Power, A., Colling, L. J., Mead, N., Barnes, L., & Goswami, U. (2016). Neural encoding of the speech envelope by children with developmental dyslexia. *Brain and Language*, 160, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2016.06.006>
- Power, A., Mead, N., Barnes, L., & Goswami, U. (2013). Neural entrainment to rhythmic speech in children with developmental dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 7. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2013.00777>
- Prado, C., Dubois, M., & Valdois, S. (2007). The eye movements of dyslexic children during reading and visual search: Impact of the visual attention span. *Vision Research*, 47(19), 2521–2530. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2007.06.001>
- Protopapas, A. (2014). From temporal processing to developmental language disorders: Mind the gap. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1634), 20130090. <https://doi.org/10.1098/rstb.2013.0090>
- Protopapas, A. (2019). Evolving Concepts of Dyslexia and Their Implications for Research and Remediation. *Frontiers in Psychology*, 10, 2873. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.02873>
- Protopapas, A., Altani, A., & Georgiou, G. K. (2013). Development of serial processing in reading and rapid naming. *Journal of Experimental Child Psychology*, 116(4), 914–929. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.08.004>
- Protopapas, A., & Parrila, R. (2018). Is Dyslexia a Brain Disorder? *Brain Sciences*, 8(4), 61. <https://doi.org/10.3390/brainsci8040061>
- Quémart, P., & Casalis, S. (2015). Visual processing of derivational morphology in children with developmental dyslexia: Insights from masked priming. *Applied Psycholinguistics*, 36(2), 345–376. <https://doi.org/10.1017/S014271641300026X>
- R Core Team. (2021). *R: A language and environment for statistical computing*. Published online 2020.
- 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. (2014). Neuroimaging sheds new light on the phonological deficit in dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, 18(6), 274–275. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2014.01.009>
- 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., Folco, C., Guez, A., & Peyre, H. (2021). Épidémiologie des troubles de la lecture en France: Une comparaison du DSM-5 et de la CIM-11. *ANAE - Approche Neuropsychologique des Apprentissages Chez L'enfant*, 175, 25.
- Ramus, F., & Szenkovits, G. (2008). What Phonological Deficit? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61(1), 129–141. <https://doi.org/10.1080/17470210701508822>
- Ratcliff, R. (1981). A Theory of Order Relations in Perceptual Matching. *Psychological Review*, 88(6), 552–572.
- Ray, N. J., Fowler, S., & Stein, J. F. (2005). Yellow Filters Can Improve Magnocellular Function: Motion Sensitivity, Convergence, Accommodation, and Reading. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1039(1), 283–293. <https://doi.org/10.1196/annals.1325.027>

- Raynaud, J. (2022). Etude nationale sur la répartition des professionnels et de l'adéquation entre l'offre et la demande de soins. *L'Orthophoniste*, 419, 24–52.
- Rayner, K., & Reichle, E. D. (2010). Models of the reading process. *WIREs Cognitive Science*, 1(6), 787–799. <https://doi.org/10.1002/wcs.68>
- Reicher, G. M. (1969). Perceptual recognition as a function of meaningfulness of stimulus material. *Journal of Experimental Psychology*, 81(2), 275–280. <https://doi.org/10.1037/h0027768>
- Reichle, E. D., Pollatsek, A., Fisher, D. L., & Rayner, K. (1998). Toward a model of eye movement control in reading. *Psychological Review*, 105, 125–157. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.105.1.125>
- Reilhac, C., Peyrin, C., Démonet, J.-F., & Valdois, S. (2013). Role of the superior parietal lobules in letter-identity processing within strings: fMRI evidence from skilled and dyslexic readers. *Neuropsychologia*, 51(4), 601–612. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.12.010>
- Reilly, R. G., & Radach, R. (2006). Some empirical tests of an interactive activation model of eye movement control in reading. *Cognitive Systems Research*, 7(1), 34–55.
- 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>
- Rey, A., Pacton, S., & Perruchet, P. (2005). L'erreur dans l'acquisition de l'orthographe. *Rééducation orthophonique*, 222.
- Richards, T. L., & Berninger, V. W. (2008). Abnormal fMRI Connectivity in Children with Dyslexia During a Phoneme Task: Before But Not After Treatment. *Journal of Neurolinguistics*, 21(4), 294–304. <https://doi.org/10.1016/j.jneuroling.2007.07.002>
- Richards, T. L., Berninger, V. W., Yagle, K. J., Abbott, R. D., & Peterson, D. J. (2017). Changes in DTI Diffusivity and fMRI Connectivity Cluster Coefficients for Students with and without Specific Learning Disabilities In Written Language: Brain's Response to Writing Instruction. *Journal of Nature and Science*, 3(4), e350. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC5488805/>
- Richardson, U., Leppänen, P. H. T., Leiwo, M., & Lyytinen, H. (2003). Speech Perception of Infants With High Familial Risk for Dyslexia Differ at the Age of 6 Months. *Developmental Neuropsychology*, 23(3), 385–397. https://doi.org/10.1207/S15326942DN2303_5
- Richardson, U., & Lyytinen, H. (2014). The GraphoGame Method: The Theoretical and Methodological Background of the Technology-Enhanced Learning Environment for Learning to Read. *Human Technology: An Interdisciplinary Journal on Humans in ICT Environments*, 10(1), 39–60. <https://doi.org/10.17011/ht/urn.201405281859>
- Richardson, U., Thomson, J. M., Scott, S. K., & Goswami, U. (2004). Auditory processing skills and phonological representation in Dyslexic children. *Dyslexia*, 10(3), 215–233. <https://doi.org/10.1002/dys.276>
- Richlan, F., Kronbichler, M., & Wimmer, H. (2011). Meta-analyzing brain dysfunctions in dyslexic children and adults. *NeuroImage*, 56(3), 1735–1742. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.02.040>
- Ring, J., & Black, J. L. (2018). The multiple deficit model of dyslexia: What does it mean for identification and intervention? *Annals of Dyslexia*, 68(2), 104–125. <https://doi.org/10.1007/s11881-018-0157-y>
- Roberts, J., Jurgens, J., & Burchinal, M. (2005). *The Role of Home Literacy Practices in Preschool Children's Language and Emergent Literacy Skills*. 48(2), 345–359. <https://www.proquest.com/docview/232342240/abstract/66475A33470B4A4DPQ/1>
- 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>

- Romeo, R. R., Christodoulou, J. A., Halverson, K. K., Murtagh, J., Cyr, A. B., Schimmel, C., Chang, P., Hook, P. E., & Gabrieli, J. D. E. (2018). Socioeconomic Status and Reading Disability: Neuroanatomy and Plasticity in Response to Intervention. *Cerebral Cortex*, 28(7), 2297–2312. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhx131>
- Ron Nelson, J., Benner, G. J., & Gonzalez, J. (2003). Learner Characteristics that Influence the Treatment Effectiveness of Early Literacy Interventions: A Meta-Analytic Review. *Learning Disabilities Research and Practice*, 18(4), 255–267. <https://doi.org/10.1111/1540-5826.00080>
- Rosen, S., & Manganari, E. (2001). Is There a Relationship Between Speech and Nonspeech Auditory Processing in Children With Dyslexia? *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 44(4), 720–736. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2001/057\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2001/057))
- Rosenthal, J. H. (1973). Self-esteem in dyslexic children. *Academic Therapy*, 9, 27–39.
- Rosner, B. (1975). On the detection of many outliers. *Technometrics*, 17(2), 221–227.
- Rowe, M. L., & Goldin-Meadow, S. (2009). Differences in early gesture explain SES disparities in child vocabulary size at school entry. *Science (New York, N.Y.)*, 323(5916), 951–953. <https://doi.org/10.1126/science.1167025>
- Russo, N. M., Nicol, T. G., Zecker, S. G., Hayes, E. A., & Kraus, N. (2005). Auditory training improves neural timing in the human brainstem. *Behavioural Brain Research*, 156(1), 95–103. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2004.05.012>
- Ryder, J. F., Tunmer, W. E., & Greaney, K. T. (2008). Explicit instruction in phonemic awareness and phonemically based decoding skills as an intervention strategy for struggling readers in whole language classrooms. *Reading and Writing*, 21(4), 349–369. <https://doi.org/10.1007/s11145-007-9080-z>
- Saalman, Y. B., Pigarev, I. N., & Vidyasagar, T. R. (2007). Neural Mechanisms of Visual Attention: How Top-Down Feedback Highlights Relevant Locations. *Science*, 316(5831), 1612–1615. <https://doi.org/10.1126/science.1139140>
- Sackett, D. L., Rosenberg, W. M., Gray, J. A., Haynes, R. B., & Richardson, W. S. (1996). Evidence based medicine: What it is and what it isn't. *BMJ: British Medical Journal*, 312(7023), 71–72. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC2349778/>
- Saghiran, A., Valdois, S., & Diard, J. (2020). Simulating length and frequency effects across multiple tasks with the Bayesian model BRAID-Phon. *42nd Annual Virtual Meeting of the Cognitive Science Society*, 3158–3163.
- Saine, N. L., Lerkkanen, M.-K., Ahonen, T., Tolvanen, A., & Lyytinen, H. (2010). Predicting word-level reading fluency outcomes in three contrastive groups: Remedial and computer-assisted remedial reading intervention, and mainstream instruction. *Learning and Individual Differences*, 20(5), 402–414. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2010.06.004>
- Saine, N. L., Lerkkanen, M.-K., Ahonen, T., Tolvanen, A., & Lyytinen, H. (2011). Computer-Assisted Remedial Reading Intervention for School Beginners at Risk for Reading Disability: Computer-Assisted Reading Intervention. *Child Development*, 82(3), 1013–1028. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2011.01580.x>
- 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>
- Scammacca, N., Roberts, G., Vaughn, S., Edmonds, M., Wexler, J., Reutebuch, C. K., & Torgesen, J. K. (2007). Interventions for adolescent struggling readers. A Meta-Analysis with Implications for Practice. *Center on Instruction at RMC Research Corporation*, 49.
- Scanlon, D. M., & Vellutino, F. R. (1996). Prerequisite skills, early instruction, and success in first-grade reading: Selected results from a longitudinal study. *Mental Retardation and Developmental*

- Disabilities Research Reviews*, 2(1), 54–63. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1098-2779\(1996\)2:1<54::AID-MRDD9>3.0.CO;2-X](https://doi.org/10.1002/(SICI)1098-2779(1996)2:1<54::AID-MRDD9>3.0.CO;2-X)
- Scarborough, H. S., & Dobrich, W. (1994). On the Efficacy of Reading to Preschoolers. *Developmental Review*, 14(3), 245–302. <https://doi.org/10.1006/drev.1994.1010>
- Scharfen, J., Peters, J. M., & Holling, H. (2018). Retest effects in cognitive ability tests: A meta-analysis. *Intelligence*, 67, 44–66. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2018.01.003>
- Scheltinga, F., van der Leij, A., & Struiksma, C. (2010). Predictors of Response to Intervention of Word Reading Fluency in Dutch. *Journal of Learning Disabilities*, 43(3), 212–228. <https://doi.org/10.1177/0022219409345015>
- Schmalhofer, F., McDaniel, M. A., & Keefe, D. (2002). A unified model for predictive and bridging inferences. *Discourse Processes*, 33(2), 105–132.
- Schmitt, A., Lachmann, T., & van Leeuwen, C. (2019). Lost in the forest? Global to local interference depends on children's reading skills. *Acta Psychologica*, 193, 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.12.003>
- Schneider, K. A. (2011). Subcortical Mechanisms of Feature-Based Attention. *Journal of Neuroscience*, 31(23), 8643–8653. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.6274-10.2011>
- Schön, D., & Tillmann, B. (2015). Short- and long-term rhythmic interventions: Perspectives for language rehabilitation: Rhythmic interventions for language rehabilitation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1337(1), 32–39. <https://doi.org/10.1111/nyas.12635>
- Schoonbaert, S., & Grainger, J. (2004). Letter position coding in printed word perception: Effects of repeated and transposed letters. *Language and Cognitive Processes*, 19(3), 333–367. <https://doi.org/10.1080/01690960344000198>
- Schroeder, C. E., Lakatos, P., Kajikawa, Y., Partan, S., & Puce, A. (2008). Neuronal oscillations and visual amplification of speech. *Trends in Cognitive Sciences*, 12(3), 106–113. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.01.002>
- Schulte-Körne, G., & Bruder, J. (2010). Clinical neurophysiology of visual and auditory processing in dyslexia: A review. *Clinical Neurophysiology*, 121(11), 1794–1809. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2010.04.028>
- Schwartz, M., Rothermich, K., Schmidt-Kassow, M., & Kotz, S. A. (2011). Temporal regularity effects on pre-attentive and attentive processing of deviance. *Biological Psychology*, 87(1), 146–151. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2011.02.021>
- Sciar, G., Maunsell, J. H. R., & Lennie, P. (1990). Coding of image contrast in central visual pathways of the macaque monkey. *Vision Research*, 30(1), 1–10. [https://doi.org/10.1016/0042-6989\(90\)90123-3](https://doi.org/10.1016/0042-6989(90)90123-3)
- Searle, S. R., Speed, F. M., & Milliken, G. A. (1980). Population marginal means in the linear model: An alternative to least squares means. *The American Statistician*, 34(4), 216–221.
- Seidenberg, M. S., & Gonnerman, L. M. (2000). Explaining derivational morphology as the convergence of codes. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(9), 353–361. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01515-1](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01515-1)
- Seidenberg, M. S., & McClelland, J. L. (1989). A Distributed, Developmental Model of Word Recognition and Naming. *Psychological Review*, 96(4), 523–568.
- 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>
- Sénéchal, M. (2006). Testing the home literacy model: Parent involvement in kindergarten is differentially related to grade 4 reading comprehension, fluency, spelling, and reading for pleasure. *Scientific Studies of Reading*, 10(1), 59–87.

- Sénéchal, M., & LeFevre, J.-A. (2002). Parental Involvement in the Development of Children's Reading Skill: A Five-Year Longitudinal Study. *Child Development*, *73*(2), 445–460. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00417>
- Serniclaes, W. (2018). Allophonic Theory of Dyslexia: A Short Overview. *JSM Communication Disorders*, *2*(1).
- Serniclaes, W., Collet, G., & Sprenger-Charolles, L. (2015). Review of neural rehabilitation programs for dyslexia: How can an allophonic system be changed into a phonemic one? *Frontiers in Psychology*, *6*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00190>
- Serniclaes, W., Heghe, S. V., Mousty, P., Carré, R., & Sprenger-Charolles, L. (2004). Allophonic mode of speech perception in dyslexia. *Journal of Experimental Child Psychology*, *87*(4), 336–361. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2004.02.001>
- Serniclaes, W., López-Zamora, M., Bordoy, S., & Luque, J. (2021). Allophonic perception of VOT contrasts in Spanish children with dyslexia. *Brain and Behavior*, *11*(6). <https://doi.org/10.1002/brb3.2194>
- Seron, X. (1995). La méthode du cas unique dans les rééducations neuropsychologiques: Le problème de l'efficacité du traitement. *Revue de Neuropsychologie*, *5*(2), 253–271.
- Seron, X., & Van der Linden, M. (2016). Objectifs et stratégies de la revalidation neuropsychologique. In *Traité de neuropsychologie: Vol. Revalidation* (De Boeck Supérieur, p. Chapitre 1).
- Share, D. L. (1995). Phonological recoding and self-teaching: Sine qua non of reading acquisition. *Cognition*, *55*(2), 151–218. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(94\)00645-2](https://doi.org/10.1016/0010-0277(94)00645-2)
- Share, D. L., Jorm, A. F., Maclean, R., & Matthews, R. (1984). Sources of Individual Differences in Reading Acquisition. *Journal of Educational Psychology*, *76*(6), 1309–1324.
- Share, D., & Stanovich, K. E. (1995). Cognitive Processes in Early Reading Development: Accommodating Individual Differences into a Model of Acquisition. *Issues in Education*, *1*, 1–57.
- Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Blachman, B. A., Pugh, K. R., Fulbright, R. K., Skudlarski, P., Mencl, W. E., Constable, R. T., Holahan, J. M., Marchione, K. E., Fletcher, J. M., Lyon, G. R., & Gore, J. C. (2004). Development of left occipitotemporal systems for skilled reading in children after a phonologically-based intervention. *Biological Psychiatry*, *55*(9), 926–933. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2003.12.019>
- Shaywitz, B. A., Shaywitz, S. E., Pugh, K. R., Mencl, W. E., Fulbright, R. K., Skudlarski, P., Constable, R. T., Marchione, K. E., Fletcher, J. M., Lyon, G. R., & Gore, J. C. (2002). Disruption of Posterior Brain Systems for Reading in Children with Developmental Dyslexia. *BIOL PSYCHIATRY*, *52*, 101–110.
- Shaywitz, S. E., Fletcher, J. M., Holahan, J. M., Shneider, A. E., Marchione, K. E., Stuebing, K. K., Francis, D. J., Pugh, K. R., & Shaywitz, B. A. (1999). Persistence of Dyslexia: The Connecticut Longitudinal Study at Adolescence. *Pediatrics*, *104*(6), 1351–1359. <https://doi.org/10.1542/peds.104.6.1351>
- Shaywitz, S. E., Morris, R., & Shaywitz, B. A. (2008). The Education of Dyslexic Children from Childhood to Young Adulthood. *Annual Review of Psychology*, *59*(1), 451–475. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093633>
- Shaywitz, S. E., & Shaywitz, B. A. (2005). Dyslexia (Specific Reading Disability). *Biological Psychiatry*, *57*(11), 1301–1309. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2005.01.043>
- 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>
- Shovman, M. M., & Ahissar, M. (2006). Isolating the impact of visual perception on dyslexics' reading ability. *Vision Research*, *46*(20), 3514–3525. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2006.05.011>

- Simos, P. G., Fletcher, J. M., Sarkari, S., Billingsley, R. L., Denton, C., & Papanicolaou, A. C. (2007). Altering the brain circuits for reading through intervention: A magnetic source imaging study. *Neuropsychology*, *21*(4), 485–496. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.21.4.485>
- Simos, P. G., Fletcher, J. M., Sarkari, S., Billingsley-Marshall, R., Denton, C. A., & Papanicolaou, A. C. (2007). Intensive Instruction Affects Brain Magnetic Activity Associated with Oral Word Reading in Children with Persistent Reading Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, *40*(1), 37–48. <https://doi.org/10.1177/00222194070400010301>
- Skeide, M. A., Kumar, U., Mishra, R. K., Tripathi, V. N., Guleria, A., Singh, J. P., Eisner, F., & Huettig, F. (2017). Learning to read alters cortico-subcortical cross-talk in the visual system of illiterates. *Science Advances*, *3*(5), e1602612. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1602612>
- Slavin, R. E., Lake, C., Davis, S., & Madden, N. A. (2011). Effective programs for struggling readers: A best-evidence synthesis. *Educational Research Review*, *6*(1), 1–26. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2010.07.002>
- Sleeman, M., Everatt, J., Arrow, A., & Denston, A. (2022). The identification and classification of struggling readers based on the simple view of reading. *Dyslexia*, *28*(3), 256–275. <https://doi.org/10.1002/dys.1719>
- Smith, J. D. (2012). Single-case experimental designs: A systematic review of published research and current standards. *Psychological Methods*, *17*(4), 510–550. <https://doi.org/10.1037/a0029312>
- Smith, S. D., Pennington, B. F., Boada, R., & Shriberg, L. D. (2005). Linkage of speech sound disorder to reading disability loci. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *46*(10), 1057–1066. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2005.01534.x>
- Snell, J., van Leipsig, S., Grainger, J., & Meeter, M. (2018). OB1-reader: A model of word recognition and eye movements in text reading. *Psychological Review*, *125*(6), 969.
- Snellings, P., van der Leij, A., de Jong, P. F., & Blok, H. (2009). Enhancing the Reading Fluency and Comprehension of Children With Reading Disabilities in an Orthographically Transparent Language. *Journal of Learning Disabilities*, *42*(4), 291–305. <https://doi.org/10.1177/0022219408331038>
- Snow, P. J. (2016). The Structural and Functional Organization of Cognition. *Frontiers in Human Neuroscience*, *10*. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2016.00501>
- Snowling, M. (1998). Dyslexia as a Phonological Deficit: Evidence and Implications. *Child Psychology and Psychiatry Review*, *3*(1), 4–11. <https://doi.org/10.1111/1475-3588.00201>
- Snowling, M., Bishop, D. V. M., & Stothard, S. E. (2000). Is Preschool Language Impairment a Risk Factor for Dyslexia in Adolescence? *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *41*(5), 587–600. <https://doi.org/10.1111/1469-7610.00651>
- Snowling, M. J. (2000). *Dyslexia* (Blackwell).
- Snowling, M. J. (2002). Reading Development and Dyslexia. In *Blackwell Handbook of Childhood Cognitive Development* (pp. 394–411). John Wiley & Sons, Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470996652.ch18>
- Snowling, M. J. (2008). Specific Disorders and Broader Phenotypes: The Case of Dyslexia. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, *61*(1), 142–156. <https://doi.org/10.1080/17470210701508830>
- Snowling, M. J., Hulme, C., & Nation, K. (2020). Defining and understanding dyslexia: Past, present and future. *Oxford Review of Education*, *46*(4), 501–513. <https://doi.org/10.1080/03054985.2020.1765756>
- Snowling, M. J., & Melby-Lervåg, M. (2016). Oral language deficits in familial dyslexia: A meta-analysis and review. *Psychological Bulletin*, *142*(5), 498–545. <https://doi.org/10.1037/bul0000037>
- Snowling, M. J., Muter, V., & Carroll, J. (2007). Children at family risk of dyslexia: A follow-up in

- early adolescence. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 48(6), 609–618. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2006.01725.x>
- Solan, H. A., Larson, S., Shelley-Tremblay, J., Ficarra, A., & Silverman, M. (2001). Role of Visual Attention in Cognitive Control of Oculomotor Readiness in Students with Reading Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 34(2), 107–118. <https://doi.org/10.1177/002221940103400202>
- Song, S., Georgiou, G. K., Su, M., & Hua, S. (2016). How Well Do Phonological Awareness and Rapid Automatized Naming Correlate With Chinese Reading Accuracy and Fluency? A Meta-Analysis. *Scientific Studies of Reading*, 20(2), 99–123. <https://doi.org/10.1080/10888438.2015.1088543>
- Sparrow, L., & Miell, S. (2002). Activation of phonological codes during reading: Evidence from eye movements. *Brain and Language*, 8.
- Spencer, M., & Wagner, R. K. (2018). The Comprehension Problems of Children With Poor Reading Comprehension Despite Adequate Decoding: A Meta-Analysis. *Review of Educational Research*, 88(3), 366–400. <https://doi.org/10.3102/0034654317749187>
- Sperling, A. J., Lu, Z.-L., Manis, F. R., & Seidenberg, M. S. (2005). Deficits in perceptual noise exclusion in developmental dyslexia. *Nature Neuroscience*, 8(7), Article 7. <https://doi.org/10.1038/nn1474>
- Sperling, A. J., Lu, Z.-L., Manis, F. R., & Seidenberg, M. S. (2006). Motion-Perception Deficits and Reading Impairment: It's the Noise, Not the Motion. *Psychological Science*, 17(12), 1047–1053. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2006.01825.x>
- Spinelli, D., De Luca, M., Judica, A., & Zoccolotti, P. (2002). Crowding Effects on Word Identification in Developmental Dyslexia. *Cortex*, 38(2), 179–200. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(08\)70649-X](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(08)70649-X)
- Sprenger-Charolles, L. (2017). Une progression pédagogique construite à partir de statistiques sur l'orthographe du français (d'après Manulex-Morpho): Pour les lecteurs débutants et atypiques. *A.N.A.E.*, 148, 247–256.
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Kipffer-Piquard, A., Pinton, F., & Billard, C. (2009). Reliability and prevalence of an atypical development of phonological skills in French-speaking dyslexics. *Reading and Writing*, 22(7), 811–842. <https://doi.org/10.1007/s11145-008-9117-y>
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Lacert, P., & Serniclaes, W. (2000). On subtypes of developmental dyslexia: Evidence from processing time and accuracy scores. *Canadian Journal of Experimental Psychology / Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, 54, 87–104. <https://doi.org/10.1037/h0087332>
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Piquard-Kipffer, A., Pourcin, L., & Leloup, G. (2018). *EVALEC: computerized diagnostic assessment battery for specific reading learning disabilities*. Happyneuron.
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., & Serniclaes, W. (2013). *Reading acquisition and developmental dyslexia*. (Psychology Press.).
- Sprenger-Charolles, L., Siegel, L. S., Jiménez, J. E., & Ziegler, J. C. (2011). Prevalence and Reliability of Phonological, Surface, and Mixed Profiles in Dyslexia: A Review of Studies Conducted in Languages Varying in Orthographic Depth. *Scientific Studies of Reading*, 15(6), 498–521. <https://doi.org/10.1080/10888438.2010.524463>
- Sprenger-Charolles, L., & Ziegler, J. C. (2019). Apprendre à lire: Contrôle, automatismes et auto-apprentissage. In *L'apprentissage de la lecture* (Lea.fr, pp. 95–103). Nathan.
- Squires, K. E., & Wolter, J. A. (2016). The Effects of Orthographic Pattern Intervention on Spelling Performance of Students With Reading Disabilities: A Best Evidence Synthesis. *Remedial and Special Education*, 37(6), 357–369. <https://doi.org/10.1177/0741932516631115>
- Stanké, B. (2016). *Les dyslexies-dysorthographies* (Vol. 40). Presses de l'Université du Québec.

- Stanké, B., Ferlatte, M.-A., & Granger, S. (2016). Apprentissage avec erreurs et sans erreur de l'orthographe lexicale: Impact auprès d'élèves du primaire bons et faibles orthographes. *La nouvelle revue de l'adaptation et de la scolarisation*, 76(4), 65. <https://doi.org/10.3917/nras.076.0065>
- Stanké, B., Flessas, J., & Ska, B. (2008). The Role of Lexical Orthographic Memory in lexical orthographic knowledge acquisition of 5 years old kindergarten children. *ANAE - Approche Neuropsychologique Des Apprentissages Chez l'Enfant*, 20, 326–335.
- Stanké, B., Rezzonico, S., Moreau, A. C., Robidoux, J., & Royle, P. (2021). Impact de l'enseignement explicite des régularités graphotactiques et morphologiques sur l'apprentissage de l'orthographe lexicale auprès de différents. *A.N.A.E.*, 173, 493–502.
- Stanovich, K. E. (1980). Toward an Interactive-Compensatory Model of Individual Differences in the Development of Reading Fluency. *Reading Research Quarterly*, 16(1), 32–71. <https://doi.org/10.2307/747348>
- Stanovich, K. E. (1986). Matthew Effects in Reading: Some Consequences of Individual Differences in the Acquisition of Literacy. *Reading Research Quarterly*, 21(4), 360–407. <https://www.jstor.org/stable/747612>
- Stanovich, K. E. (1988). Explaining the Differences Between the Dyslexic and the Garden-Variety Poor Reader: The Phonological-Core Variable-Difference Model. *Journal of Learning Disabilities*, 21(10), 590–604. <https://doi.org/10.1177/002221948802101003>
- Stanovich, K. E., & West, R. F. (1989). Exposure to print and orthographic processing. *Reading Research Quarterly*, 24(4), 402–433.
- Stein, C. M., Schick, J. H., Gerry Taylor, H., Shriberg, L. D., Millard, C., Kundtz-Kluge, A., Russo, K., Minich, N., Hansen, A., Freebairn, L. A., Elston, R. C., Lewis, B. A., & Iyengar, S. K. (2004). Pleiotropic Effects of a Chromosome 3 Locus on Speech-Sound Disorder and Reading. *The American Journal of Human Genetics*, 74(2), 283–297. <https://doi.org/10.1086/381562>
- Stein, D. S., Blum, N. J., & Barbaresi, W. J. (2011). Developmental and Behavioral Disorders Through the Life Span. *Pediatrics*, 128(2), 364–373. <https://doi.org/10.1542/peds.2011-0266>
- Stein, J. (2001). The magnocellular theory of developmental dyslexia. *Dyslexia*, 7(1), 12–36. <https://doi.org/10.1002/dys.186>
- Stein, J. (2014). Dyslexia: The Role of Vision and Visual Attention. *Current Developmental Disorders Reports*, 1(4), 267–280. <https://doi.org/10.1007/s40474-014-0030-6>
- Stein, J. (2019). The current status of the magnocellular theory of developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, 130, 66–77. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.03.022>
- Stein, J. F., Richardson, A. J., & Fowler, M. S. (2000). Monocular occlusion can improve binocular control and reading in dyslexics. *Brain*, 123(1), 164–170. <https://doi.org/10.1093/brain/123.1.164>
- Stein, J. F., Riddell, P. M., & Fowler, S. (1988). Disordered vergence control in dyslexic children. *British Journal of Ophthalmology*, 72(3), 162–166. <https://doi.org/10.1136/bjo.72.3.162>
- Stein, J., & Walsh, V. (1997). To see but not to read; the magnocellular theory of dyslexia. *Trends in Neurosciences*, 20(4), 147–152. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(96\)01005-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(96)01005-3)
- Stevens, E. A., Austin, C., Moore, C., Scammacca, N., Boucher, A. N., & Vaughn, S. (2021). Current State of the Evidence: Examining the Effects of Orton-Gillingham Reading Interventions for Students With or at Risk for Word-Level Reading Disabilities. *Exceptional Children*, 87(4), 397–417. <https://doi.org/10.1177/0014402921993406>
- Stevens, M., & Grainger, J. (2003). Letter visibility and the viewing position effect in visual word recognition. *Perception & Psychophysics*, 65(1), 133–151. <https://doi.org/10.3758/BF03194790>
- Steyerberg, E. W., Moons, K. G. M., van der Windt, D. A., Hayden, J. A., Perel, P., Schroter, S., Riley, R. D., Hemingway, H., Altman, D. G., & for the PROGRESS Group. (2013). Prognosis Research

- Strategy (PROGRESS) 3: Prognostic Model Research. *PLoS Medicine*, *10*(2), e1001381. <https://doi.org/10.1371/journal.pmed.1001381>
- Strong, G. K., Torgerson, C. J., Torgerson, D., & Hulme, C. (2011). A systematic meta-analytic review of evidence for the effectiveness of the 'Fast ForWord' language intervention program. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *52*(3), 224–235. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2010.02329.x>
- Stuart, G. W., McAnally, K. I., McKay, A., Johnston, M., & Castles, A. (2006). A test of the magnocellular deficit theory of dyslexia in an adult sample. *Cognitive Neuropsychology*, *23*(8), 1215–1229. <https://doi.org/10.1080/02643290600814624>
- Suggate, S. P. (2010). Why what we teach depends on when: Grade and reading intervention modality moderate effect size. *Developmental Psychology*, *46*(6), 1556–1579. <https://doi.org/10.1037/a0020612>
- Suggate, S. P. (2016). A Meta-Analysis of the Long-Term Effects of Phonemic Awareness, Phonics, Fluency, and Reading Comprehension Interventions. *Journal of Learning Disabilities*, *49*(1), 77–96. <https://doi.org/10.1177/0022219414528540>
- 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>
- Szmaliec, 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*, 1270–1279. <https://doi.org/10.1037/a0023820>
- Szmaliec, A., Page, M. P. A., & Duyck, W. (2012). The development of long-term lexical representations through Hebb repetition learning. *Journal of Memory and Language*, *67*(3), 342–354. <https://doi.org/10.1016/j.jml.2012.07.001>
- Taatgen, N. A., van Rijn, H., & Anderson, J. (2007). An integrated theory of prospective time interval estimation: The role of cognition, attention, and learning. *Psychological Review*, *114*(3), 577–598. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.114.3.577>
- Taft, M. (1979). Taft, M. (1979) Recognition of affixed words and the word frequency effect. *Memory & Cognition*, *7*: 263-272. *Memory & Cognition*, *7*, 263–272.
- Taft, M., & van Graan, F. (1998). Lack of Phonological Mediation in a Semantic Categorization Task. *Journal of Memory and Language*, *38*(2), 203–224. <https://doi.org/10.1006/jmla.1997.2538>
- Talcott, J. B., Witton, C., Hebb, G. S., Stoodley, C. J., Westwood, E. A., France, S. J., Hansen, P. C., & Stein, J. F. (2002). On the relationship between dynamic visual and auditory processing and literacy skills; results from a large primary-school study. *Dyslexia*, *8*(4), 204–225. <https://doi.org/10.1002/dys.224>
- Talcott, J. B., Witton, C., McLean, M. F., Hansen, P. C., Rees, A., Green, G. G. R., & Stein, J. F. (2000). Dynamic sensory sensitivity and children's word decoding skills. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *97*(6), 2952–2957. <https://doi.org/10.1073/pnas.040546597>
- Tallal, P. (1980). Auditory temporal perception, phonics, and reading disabilities in children. *Brain and Language*, *9*(2), 182–198. [https://doi.org/10.1016/0093-934X\(80\)90139-X](https://doi.org/10.1016/0093-934X(80)90139-X)
- Tate, R. L., Perdices, M., Rosenkoetter, U., Wakim, D., Godbee, K., Togher, L., & McDonald, S. (2013). Revision of a method quality rating scale for single-case experimental designs and *n* -of-1 trials: The 15-item Risk of Bias in *N* -of-1 Trials (RoBiNT) Scale. *Neuropsychological Rehabilitation*, *23*(5), 619–638. <https://doi.org/10.1080/09602011.2013.824383>
- Thiede, A., Virtala, P., Ala-Kurikka, I., Partanen, E., Huotilainen, M., Mikkola, K., Leppänen, P. H. T., & Kujala, T. (2019). An extensive pattern of atypical neural speech-sound discrimination in newborns at risk of dyslexia. *Clinical Neurophysiology*, *130*(5), 634–646. <https://doi.org/10.1016/j.clinph.2019.01.019>

- 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>
- Thomson, J. M., Leong, V., & Goswami, U. (2013). Auditory processing interventions and developmental dyslexia: A comparison of phonemic and rhythmic approaches. *Reading and Writing*, *26*(2), 139–161. <https://doi.org/10.1007/s11145-012-9359-6>
- Tilanus, E. A. T., Segers, E., & Verhoeven, L. (2019). Predicting responsiveness to a sustained reading and spelling intervention in children with dyslexia. *Dyslexia*, *25*(2), 190–206. <https://doi.org/10.1002/dys.1614>
- Toffalini, E., Giofrè, D., Pastore, M., Carretti, B., Fraccadori, F., & Szűcs, D. (2021). Dyslexia treatment studies: A systematic review and suggestions on testing treatment efficacy with small effects and small samples. *Behavior Research Methods*, *53*(5), 1954–1972. <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01549-x>
- Toffalini, E., Pezzuti, L., & Cornoldi, C. (2017). Einstein and dyslexia: Is giftedness more frequent in children with a specific learning disorder than in typically developing children? *Intelligence*, *62*, 175–179. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2017.04.006>
- Torgerson, C. J., & Torgerson, D. J. (2003). The Design and Conduct of Randomised Controlled Trials in Education: Lessons from health care. *Oxford Review of Education*, *29*(1), 67–80. <https://doi.org/10.1080/03054980307434>
- Torgesen, J. K., Alexander, A. W., Wagner, R. K., Rashotte, C. A., Voeller, K. K. S., & Conway, T. (2001). Intensive Remedial Instruction for Children with Severe Reading Disabilities: Immediate and Long-term Outcomes From Two Instructional Approaches. *Journal of Learning Disabilities*, *34*(1), 33–58. <https://doi.org/10.1177/002221940103400104>
- Torgesen, J. K., Wagner, R. K., & Rashotte, C. A. (1994). Longitudinal Studies of Phonological Processing and Reading. *Journal of Learning Disabilities*, *27*(5), 276–286. <https://doi.org/10.1177/002221949402700503>
- Torppa, M., Georgiou, G. K., Niemi, P., Lerkkänen, M.-K., & Poikkeus, A.-M. (2017). The precursors of double dissociation between reading and spelling in a transparent orthography. *Annals of Dyslexia*, *67*(1), 42–62. <https://doi.org/10.1007/s11881-016-0131-5>
- Touzin, M. (2004). La rééducation des troubles spécifiques d'acquisition du langage écrit. *Approches Thérapeutiques En Orthophonie*. Ortho Edition.
- Tran, L., Sanchez, T., Arellano, B., & Lee Swanson, H. (2011). A Meta-Analysis of the RTI Literature for Children at Risk for Reading Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, *44*(3), 283–295. <https://doi.org/10.1177/0022219410378447>
- Treiman, R., & Kessler, B. (2006). Spelling as statistical learning: Using consonantal context to spell vowels. *Journal of Educational Psychology*, *98*(3), 642–652. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.98.3.642>
- Tressoldi, P. E., Brembati, F., Donini, R., Iozzino, R., & Vio, C. (2012). Treatment of Dyslexia in a Regular Orthography: Efficacy and Efficiency (Cost-Effectiveness) Comparison Between Home vs Clinic-Based Treatments. *Europe's Journal of Psychology*, *8*(3), 375–390. <https://doi.org/10.5964/ejop.v8i3.442>
- Tressoldi, P. E., Lonciari, I., & Vio, C. (2000). Treatment of Specific Developmental Reading Disorders, Derived from Single- and Dual-Route Models. *Journal of Learning Disabilities*, *33*(3), 278–285. <https://doi.org/10.1177/002221940003300305>
- Tressoldi, P. E., Vio, C., & Iozzino, R. (2007). Efficacy of an Intervention to Improve Fluency in Children With Developmental Dyslexia in a Regular Orthography. *Journal of Learning Disabilities*, *40*(3), 203–209. <https://doi.org/10.1177/00222194070400030201>
- Tucci, R., Savoia, V., Bertolo, L., Vio, C., & Tressoldi, P. E. (2015). Efficacy and efficiency outcomes

- of a training to ameliorate developmental dyslexia using the online software Reading Trainer®. *Applied Psychology Bulletin*, 65(273), 53–60.
- Tunmer, W. E., & Chapman, J. W. (2012). Does Set for Variability Mediate the Influence of Vocabulary Knowledge on the Development of Word Recognition Skills? *Scientific Studies of Reading*, 16(2), 122–140. <https://doi.org/10.1080/10888438.2010.542527>
- Undheim, A. M., Wichstrøm, L., & Sund, A. M. (2011). Emotional and Behavioral Problems Among School Adolescents With and Without Reading Difficulties as Measured by the Youth Self-Report: A One-Year Follow-Up Study. *Scandinavian Journal of Educational Research*, 55(3), 291–305. <https://doi.org/10.1080/00313831.2011.576879>
- Valdois, S. (2022). The visual-attention span deficit in developmental dyslexia: Review of evidence for a visual-attention-based deficit. *Dyslexia*, 28(4), 397–415. <https://doi.org/10.1002/dys.1724>
- Valdois, S., Bidet-Ildes, C., Lassus-Sangosse, D., Reilhac, C., N'guyen-Morel, M.-A., Guinet, E., & Orliaguet, J.-P. (2011). A visual processing but no phonological disorder in a child with mixed dyslexia. *Cortex*, 47(10), 1197–1218. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2011.05.011>
- Valdois, S., Guinet, E., & Embs, J. L. (2014). *Evadys: Visuo-attentional span diagnostic tool*. Happy Neuron.
- Valdois, S., Lassus-Sangosse, D., Lallier, M., Moreaud, O., & Pisella, L. (2019). What bilateral damage of the superior parietal lobes tells us about visual attention disorders in developmental dyslexia. *Neuropsychologia*, 130, 78–91. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.08.001>
- Valdois, S., Lassus-Sangosse, D., & Lobier, M. (2012). Impaired Letter-String Processing in Developmental Dyslexia: What Visual-to-Phonology Code Mapping Disorder? *Dyslexia*, 18(2), 77–93. <https://doi.org/10.1002/dys.1437>
- Valdois, S., Peyrin, C., Lassus-Sangosse, D., Lallier, M., Démonet, J.-F., & Kandel, S. (2014). Dyslexia in a French–Spanish bilingual girl: Behavioural and neural modulations following a visual attention span intervention. *Cortex*, 53, 120–145. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2013.11.006>
- Valdois, S., Reilhac, C., Ginestet, E., & Line Bosse, M. (2021). Varieties of Cognitive Profiles in Poor Readers: Evidence for a VAS-Impaired Subtype. *Journal of Learning Disabilities*, 54(3), 221–233. <https://doi.org/10.1177/0022219420961332>
- Valdois, S., Roulin, J.-L., & Line Bosse, M. (2019). Visual attention modulates reading acquisition. *Vision Research*, 165, 152–161. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2019.10.011>
- van Atteveldt, N., Formisano, E., Goebel, R., & Blomert, L. (2004). Integration of Letters and Speech Sounds in the Human Brain. *Neuron*, 43(2), 271–282. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.06.025>
- van Atteveldt, N. M., Formisano, E., Blomert, L., & Goebel, R. (2006). The Effect of Temporal Asynchrony on the Multisensory Integration of Letters and Speech Sounds. *Cerebral Cortex*, 17(4), 962–974. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhl007>
- van Bergen, E., van der Leij, A., & de Jong, P. F. (2014). The intergenerational multiple deficit model and the case of dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00346>
- Van Buuren, S., Groothuis-Oudshoorn, K., & Robitzsch, A. (2019). Package ‘mice’: Multivariate imputation by chained equations. *CRAN Repos*.
- van den Boer, M., de Jong, P. F., & Haentjens-van Meeteren, M. M. (2013). Modeling the Length Effect: Specifying the Relation With Visual and Phonological Correlates of Reading. *Scientific Studies of Reading*, 17(4), 243–256. <https://doi.org/10.1080/10888438.2012.683222>
- van den Boer, M., van Bergen, E., & de Jong, P. F. (2015). The specific relation of visual attention span with reading and spelling in Dutch. *Learning and Individual Differences*, 39, 141–149. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2015.03.017>

- Van Der Auwera, S., Vandermosten, M., Wouters, J., Ghesquière, P., & Vanderauwera, J. (2021). A three-time point longitudinal investigation of the arcuate fasciculus throughout reading acquisition in children developing dyslexia. *NeuroImage*, 237, 118087. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2021.118087>
- Van Hirtum, T., Ghesquière, P., & Wouters, J. (2021). A Bridge over Troubled Listening: Improving Speech-in-Noise Perception by Children with Dyslexia. *Journal of the Association for Research in Otolaryngology*, 22(4), 465–480. <https://doi.org/10.1007/s10162-021-00793-4>
- Van Hirtum, T., Moncada-Torres, A., Ghesquière, P., & Wouters, J. (2019). Speech Envelope Enhancement Instantaneously Effaces Atypical Speech Perception in Dyslexia: *Ear and Hearing*, 40(5), 1242–1252. <https://doi.org/10.1097/AUD.0000000000000706>
- Van Ingelghem, M. V., Boets, B., van Wieringen, A., Onghena, P., Ghesquière, P., Vandebussche, E., & Wouters, J. (2005). 3 An auditory temporal processing deficit in children with dyslexia? In *Learning disabilities: A challenge to teaching and instruction* (University Press, pp. 47–63).
- Van Orden, G. C., & Kloos, H. (2005). The Question of Phonology and Reading. In M. J. Snowling & C. Hulme (Eds.), *The Science of Reading: A Handbook* (pp. 61–78). Blackwell Publishing Ltd. <https://doi.org/10.1002/9780470757642.ch4>
- Van Orden, G. C., Pennington, B. F., & Stone, G. O. (1990). Word identification in reading and the promise of subsymbolic psycholinguistics. *Psychological Review*, 97(4), 488–522. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.97.4.488>
- Van Steensel, R. (2006). Relations between socio-cultural factors, the home literacy environment and children's literacy development in the first years of primary education. *Journal of Research in Reading*, 29(4), 367–382. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9817.2006.00301.x>
- van Viersen, S., Kroesbergen, E. H., Slot, E. M., & de Bree, E. H. (2016). High Reading Skills Mask Dyslexia in Gifted Children. *Journal of Learning Disabilities*, 49(2), 189–199. <https://doi.org/10.1177/0022219414538517>
- Vander Stappen, C., & Reybroeck, M. V. (2018). Phonological Awareness and Rapid Automatized Naming Are Independent Phonological Competencies With Specific Impacts on Word Reading and Spelling: An Intervention Study. *Frontiers in Psychology*, 9, 320. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00320>
- Vandermosten, M., Boets, B., Luts, H., Poelmans, H., Golestani, N., Wouters, J., & Ghesquière, P. (2010). Adults with dyslexia are impaired in categorizing speech and nonspeech sounds on the basis of temporal cues. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(23), 10389–10394. <https://doi.org/10.1073/pnas.0912858107>
- Vandermosten, M., Boets, B., Luts, H., Poelmans, H., Wouters, J., & Ghesquière, P. (2011). Impairments in speech and nonspeech sound categorization in children with dyslexia are driven by temporal processing difficulties. *Research in Developmental Disabilities*, 32(2), 593–603. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2010.12.015>
- Vandermosten, M., Boets, B., Wouters, J., & Ghesquière, P. (2012). A qualitative and quantitative review of diffusion tensor imaging studies in reading and dyslexia. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 36(6), 1532–1552. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2012.04.002>
- Vandermosten, M., Wouters, J., Ghesquière, P., & Golestani, N. (2019). Statistical Learning of Speech Sounds in Dyslexic and Typical Reading Children. *Scientific Studies of Reading*, 23(1), 116–127. <https://doi.org/10.1080/10888438.2018.1473404>
- 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>
- Verwimp, C., Tijms, J., Snellings, P., Haslbeck, J. M. B., & Wiers, R. W. (2021). A network approach to dyslexia: Mapping the reading network. *Development and Psychopathology*, 1–15.

<https://doi.org/10.1017/S0954579421000365>

- VeUILLET, E., Magnan, A., Ecalle, J., Thai-Van, H., & Collet, L. (2007). Auditory processing disorder in children with reading disabilities: Effect of audiovisual training. *Brain*, *130*(11), 2915–2928. <https://doi.org/10.1093/brain/awm235>
- Vicari, S., Finzi, A., Menghini, D., Marotta, L., Baldi, S., & Petrosini, L. (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>
- Vidyasagar, T. (2013). Reading into neuronal oscillations in the visual system: Implications for developmental dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience*, *7*, 1–10. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2013.00811>
- Vidyasagar, T. R. (2005). Attentional Gating in Primary Visual Cortex: A Physiological Basis for Dyslexia. *Perception*, *34*(8), 903–911. <https://doi.org/10.1068/p5332>
- Vidyasagar, T. R. (2019). Visual attention and neural oscillations in reading and dyslexia: Are they possible targets for remediation? *Neuropsychologia*, *130*, 59–65. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.02.009>
- Vidyasagar, T. R., & Pammer, K. (1999). Impaired visual search in dyslexia relates to the role of the magnocellular pathway in attention. *NeuroReport*, *10*(6), 1283. https://journals.lww.com/neuroreport/Abstract/1999/04260/Impaired_visual_search_in_dyslexia_relates_to_the.24.aspx
- Vidyasagar, T. R., & Pammer, K. (2010). Dyslexia: A deficit in visuo-spatial attention, not in phonological processing. *Trends in Cognitive Sciences*, *14*(2), 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2009.12.003>
- Viterbo, G., Katzir, T., & Goldfarb, L. (2020). Accelerating reading via local priming. *Acta Psychologica*, *205*, 103056. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2020.103056>
- Volkmer, S., & Schulte-Körne, G. (2018). Cortical responses to tone and phoneme mismatch as a predictor of dyslexia? A systematic review. *Schizophrenia Research*, *191*, 148–160. <https://doi.org/10.1016/j.schres.2017.07.010>
- von Károlyi, C., Winner, E., Gray, W., & Sherman, G. F. (2003). Dyslexia linked to talent: Global visual-spatial ability. *Brain and Language*, *85*(3), 427–431. [https://doi.org/10.1016/S0093-934X\(03\)00052-X](https://doi.org/10.1016/S0093-934X(03)00052-X)
- Wagner, R. K. (1986). Phonological Processing Abilities and Reading: Implications for Disabled Readers. *Journal of Learning Disabilities*, *19*(10), 623–629. <https://doi.org/10.1177/002221948601901009>
- Walberg, H. J., & Ling Tsai, S. (1985). Correlates of Reading Achievement and Attitude: A National Assessment Study. *The Journal of Educational Research*, *78*(3), 159–167. <https://doi.org/10.1080/00220671.1985.10885592>
- Wandell, B. A., Rauschecker, A. M., & Yeatman, J. D. (2012). Learning to See Words. *Annual Review of Psychology*, *63*(1), 31–53. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120710-100434>
- Wandell, B. A., & Yeatman, J. D. (2013). Biological development of reading circuits. *Current Opinion in Neurobiology*, *23*(2), 261–268. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2012.12.005>
- Wanzek, J., Stevens, E. A., Williams, K. J., Scammacca, N., Vaughn, S., & Sargent, K. (2018). Current Evidence on the Effects of Intensive Early Reading Interventions. *Journal of Learning Disabilities*, *51*(6), 612–624. <https://doi.org/10.1177/0022219418775110>
- Wanzek, J., & Vaughn, S. (2007). Research-Based Implications From Extensive Early Reading Interventions. *School Psychology Review*, *36*(4), 541–561. <https://doi.org/10.1080/02796015.2007.12087917>
- Wanzek, J., Vaughn, S., Scammacca, N., Gatlin, B., Walker, M. A., & Capin, P. (2016). Meta-Analyses

- of the Effects of Tier 2 Type Reading Interventions in Grades K-3. *Educational Psychology Review*, 28(3), 551–576. <https://doi.org/10.1007/s10648-015-9321-7>
- Warrier, C. M., Johnson, K. L., Hayes, E. A., Nicol, T., & Kraus, N. (2004). Learning impaired children exhibit timing deficits and training-related improvements in auditory cortical responses to speech in noise. *Experimental Brain Research*, 157(4), 431–441. <https://doi.org/10.1007/s00221-004-1857-6>
- Watson, R. T., & Pitt, L. F. (1993). Personal computing ethics: Beliefs and behaviour. *International Journal of Information Management*, 13(4), 287–298. [https://doi.org/10.1016/0268-4012\(93\)90019-Z](https://doi.org/10.1016/0268-4012(93)90019-Z)
- Wechsler, D. (2014). *Echelle d'intelligence de Wechsler pour enfants: Wisc V*. ECPA, les Editions du centre de psychologie appliquée.
- Weissman, D. H., & Woldorff, M. G. (2005). Hemispheric Asymmetries for Different Components of Global/Local Attention Occur in Distinct Temporo-parietal Loci. *Cerebral Cortex*, 15(6), 870–876. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhh187>
- Wheeler, D. D. (1970). Processes in word recognition. *Cognitive Psychology*, 1(1), 59–85. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(70\)90005-8](https://doi.org/10.1016/0010-0285(70)90005-8)
- White, S., Milne, E., Rosen, S., Hansen, P., Swettenham, J., Frith, U., & Ramus, F. (2006). The role of sensorimotor impairments in dyslexia: A multiple case study of dyslexic children. *Developmental Science*, 9(3), 237–255. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2006.00483.x>
- Whitehurst, G. J., & Lonigan, C. J. (1998). Child Development and Emergent Literacy. *Child Development*, 69(3), 848–872. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1998.tb06247.x>
- Whitney, C. (2001). How the brain encodes the order of letters in a printed word: The SERIOL model and selective literature review. *Psychonomic Bulletin & Review*, 8(2), 221–243. <https://doi.org/10.3758/BF03196158>
- Whitney, C., & Cornelissen, P. (2005). Letter-position encoding and dyslexia. *Journal of Research in Reading*, 28(3), 274–301. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9817.2005.00270.x>
- Whitney, D., & Levi, D. M. (2011). Visual crowding: A fundamental limit on conscious perception and object recognition. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(4), 160–168. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.02.005>
- Willcutt, E. G., & Pennington, B. F. (2000). Psychiatric Comorbidity in Children and Adolescents with Reading Disability. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 41(8), 1039–1048. <https://doi.org/10.1111/1469-7610.00691>
- Willcutt, E. G., Pennington, B. F., Olson, R. K., Chhabildas, N., & Hulslander, J. (2005). Neuropsychological Analyses of Comorbidity Between Reading Disability and Attention Deficit Hyperactivity Disorder: In Search of the Common Deficit. *Developmental Neuropsychology*, 27(1), 35–78. https://doi.org/10.1207/s15326942dn2701_3
- Williams, J. P. (1980). Teaching Decoding With an Emphasis on Phoneme Analysis and Phoneme Blending. *Journal of Educational Psychology*, 72(1), 1–15.
- Wilson-Fowler, E. B., & Apel, K. (2015). Influence of Morphological Awareness on College Students' Literacy Skills: A Path Analytic Approach. *Journal of Literacy Research*, 47(3), 405–432. <https://doi.org/10.1177/1086296X15619730>
- Wimmer, H. (1993). Characteristics of developmental dyslexia in a regular writing system. *Applied Psycholinguistics*, 14(1), 1–33. <https://doi.org/10.1017/S0142716400010122>
- Wimmer, H., Mayringer, H., & Raberger, T. (1999). Reading and Dual-Task Balancing: Evidence Against the Automatization Deficit Explanation of Developmental Dyslexia. *Journal of Learning Disabilities*, 32(5), 473–478. <https://doi.org/10.1177/002221949903200513>
- Wise, B. W., Ring, J., & Olson, R. K. (1999). Training Phonological Awareness with and without

- Explicit Attention to Articulation. *Journal of Experimental Child Psychology*, 72(4), 271–304. <https://doi.org/10.1006/jecp.1999.2490>
- Wise, B. W., Ring, J., & Olson, R. K. (2000). Individual Differences in Gains from Computer-Assisted Remedial Reading. *Journal of Experimental Child Psychology*, 77(3), 197–235. <https://doi.org/10.1006/jecp.1999.2559>
- Witton, C., Stein, J. F., Stoodley, C. J., Rosner, B. S., & Talcott, J. B. (2002). Separate Influences of Acoustic AM and FM Sensitivity on the Phonological Decoding Skills of Impaired and Normal Readers. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 14(6), 866–874. <https://doi.org/10.1162/089892902760191090>
- Witton, C., Talcott, J. B., Hansen, P. C., Richardson, A. J., Griffiths, T. D., Rees, A., Stein, J. F., & Green, G. G. R. (1998). Sensitivity to dynamic auditory and visual stimuli predicts nonword reading ability in both dyslexic and normal readers. *Current Biology*, 8(14), 791–797. [https://doi.org/10.1016/S0960-9822\(98\)70320-3](https://doi.org/10.1016/S0960-9822(98)70320-3)
- WMA Declaration of Helsinki. *Ethical principles for medical research involving human subjects*. (2018). <https://www.wma.net/policies-post/wma-declaration-of-helsinki-ethical-principles-for-medical-research-involving-human-subjects/>
- Wolf, M., & Bowers, P. G. (1999). The Double-Deficit Hypothesis for the Developmental Dyslexias. *Journal of Educational Psychology*, 91(3), 414–438.
- Wolf, M., Bowers, P. G., & Biddle, K. (2000). Naming-Speed Processes, Timing, and Reading: A Conceptual Review. *Journal of Learning Disabilities*, 33(4), 387–407. <https://doi.org/10.1177/002221940003300409>
- Wolf, M., Miller, L., & Donnelly, K. (2000). Retrieval, Automaticity, Vocabulary Elaboration, Orthography (RAVE-O): A Comprehensive, Fluency-Based Reading Intervention Program. *Journal of Learning Disabilities*, 33(4), 375–386. <https://doi.org/10.1177/002221940003300408>
- Wolf, M., O’rourke, A. G., Gidney, C., Lovett, M., Cirino, P., & Morris, R. (2002). The second deficit: An investigation of the independence of phonological and naming-speed deficits in developmental dyslexia. *Reading and Writing*, 15, 43–72.
- Wolff, U. (2014). RAN as a predictor of reading skills, and vice versa: Results from a randomised reading intervention. *Annals of Dyslexia*, 64(2), 151–165. <https://doi.org/10.1007/s11881-014-0091-6>
- Woollams, A. M. (2014). Connectionist neuropsychology: Uncovering ultimate causes of acquired dyslexia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 369(1634), 20120398. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0398>
- 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>
- Yeatman, J. D., Dougherty, R. F., Ben-Shachar, M., & Wandell, B. A. (2012). Development of white matter and reading skills. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 109(44), E3045–E3053. <https://doi.org/10.1073/pnas.1206792109>
- Yeatman, J. D., Rauschecker, A. M., & Wandell, B. A. (2013). Anatomy of the visual word form area: Adjacent cortical circuits and long-range white matter connections. *Brain and Language*, 125(2), 146–155. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2012.04.010>
- Yeung, P., Ho, C. S., Chan, D. W., & Chung, K. K. (2016). Orthographic skills important to Chinese literacy development: The role of radical representation and orthographic memory of radicals. *Reading and Writing*, 29(9), 1935–1958. <https://doi.org/10.1007/s11145-016-9659-3>
- Yu, Y.-T., & Tsuei, M. (2022). The effects of digital game-based learning on children’s Chinese language learning, attention and self-efficacy. *Interactive Learning Environments*, 0(0), 1–20. <https://doi.org/10.1080/10494820.2022.2028855>

- Zabor, E. C., Kaizer, A. M., & Hobbs, B. P. (2020). Randomized Controlled Trials. *Chest*, *158*(1), S79–S87. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2020.03.013>
- Ziegler, J. C. (1997). Phonology Can Help or Hurt the Perception of Print. *Journal of Experimental Psychology*, *23*(3), 845–860.
- Ziegler, J. C., Bertrand, D., Tóth, D., Csépe, V., Reis, A., Faísca, L., Saine, N., Lyytinen, H., Vaessen, A., & Blomert, L. (2010). Orthographic Depth and Its Impact on Universal Predictors of Reading: A Cross-Language Investigation. *Psychological Science*, *21*(4), 551–559. <https://doi.org/10.1177/0956797610363406>
- Ziegler, J. C., Castel, C., Pech-Georgel, C., George, F., Alario, F. X., & Perry, C. (2008). Developmental dyslexia and the dual route model of reading: Simulating individual differences and subtypes. *Cognition*, *107*, 151–178.
- Ziegler, J. C., Ferrand, L., Jacobs, A. M., Rey, A., & Grainger, J. (2000). Visual and Phonological Codes in Letter and Word Recognition: Evidence from Incremental Priming. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A*, *53*(3), 671–692. <https://doi.org/10.1080/713755906>
- Ziegler, J. C., & Goswami, U. (2005). Reading Acquisition, Developmental Dyslexia, and Skilled Reading Across Languages: A Psycholinguistic Grain Size Theory. *Psychological Bulletin*, *131*(1), 3–29. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.131.1.3>
- Ziegler, J. C., Jacobs, A. M., & Stone, G. O. (1996). Statistical analysis of the bidirectional inconsistency of spelling and sound in French. *Behavior Research Methods, Instruments & Computers*, *28*(4), 504–515. <https://doi.org/10.3758/BF03200539>
- Ziegler, J. C., Pech-Georgel, C., George, F., & Lorenzi, C. (2009). Speech-perception-in-noise deficits in dyslexia. *Developmental Science*, *12*(5), 732–745. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00817.x>
- Ziegler, J. C., Perry, C., & Coltheart, M. (2000). The DRC model of visual word recognition and reading aloud: An extension to German. *European Journal of Cognitive Psychology*, *12*(3), 413–430. <https://doi.org/10.1080/09541440050114570>
- Ziegler, J. C., Perry, C., & Coltheart, M. (2003). Speed of lexical and nonlexical processing in French: The case of the regularity effect. *Psychonomic Bulletin & Review*, *10*(4), 947–953. <https://doi.org/10.3758/BF03196556>
- Ziegler, J. C., Perry, C., & Zorzi, M. (2014). Modelling reading development through phonological decoding and self-teaching: Implications for dyslexia. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, *369*(1634), 20120397. <https://doi.org/10.1098/rstb.2012.0397>
- Ziegler, J. C., Perry, C., & Zorzi, M. (2019). Modeling the Variability of Developmental Dyslexia. In L. Verhoeven, C. Perfetti, & K. Pugh (Eds.), *Developmental Dyslexia across Languages and Writing Systems* (1st ed., pp. 350–371). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781108553377.016>
- Ziegler, J. C., Perry, C., & Zorzi, M. (2020). Learning to Read and Dyslexia: From Theory to Intervention Through Personalized Computational Models. *Current Directions in Psychological Science*, *29*(3), 293–300. <https://doi.org/10.1177/0963721420915873>
- Zoccolotti, P., de Jong, P. F., & Spinelli, D. (Eds.). (2016). *Understanding Developmental Dyslexia: Linking Perceptual and Cognitive Deficits to Reading Processes*. Frontiers Media SA. <https://doi.org/10.3389/978-2-88919-864-1>
- Zorzi, M., Barbiero, C., Facoetti, A., Lonciari, I., Carrozzi, M., Montico, M., Bravar, L., George, F., Pech-Georgel, C., & Ziegler, J. C. (2012). Extra-large letter spacing improves reading in dyslexia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(28), 11455–11459. <https://doi.org/10.1073/pnas.1205566109>
- Zoubinetzky, R., Bielle, F., & Valdois, S. (2014). New Insights on Developmental Dyslexia Subtypes: Heterogeneity of Mixed Reading Profiles. *PLoS ONE*, *9*(6), 1–15.

<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>

Résumé

Parmi les troubles du langage écrit, la dyslexie développementale est définie comme un trouble spécifique de l'apprentissage du langage écrit dont les répercussions sur les apprentissages scolaires, durables et délétères, nécessitent des réponses thérapeutiques efficaces. Les études sur la remédiation de la dyslexie développementale sont généralement fondées sur l'hypothèse causale d'une altération plus ou moins exclusive d'un processus cognitif sous-jacent. Or, chez la majorité des lecteurs dyslexiques, de multiples déficits cognitifs sous-jacents, variables selon les individus, seraient simultanément responsables des troubles comportementaux de la lecture et de l'orthographe. Ainsi, une *multifactorialité étiologique* de la dyslexie développementale entraîne une *hétérogénéité sémiologique* qui s'exprime dans une variabilité clinique très complexe dont les contours imprécis peuvent entraîner un diagnostic incertain, ce que nous avons nommé *variabilité nosographique*.

Dans ce contexte théorique et à la lumière des modèles à déficits multiples de la dyslexie développementale, nous avons élaboré un protocole de remédiation multimodale et multi-composante ciblant à la fois les processus cognitifs sous-jacents audio-phonologiques, visuo-attentionnels et intermodalitaires et les troubles de la lecture et de l'orthographe, selon une approche qui combine plusieurs entraînements conçus en fonction du profil sémiologique individuel. Grâce à la participation de 94 orthophonistes, nous avons évalué les bénéfices de ce protocole à partir d'un essai clinique, multicentrique, longitudinal, randomisé, croisé, mené en trois phases sur une durée totale de 16 mois, auprès de 144 lecteurs dyslexiques âgés de 8 à 13 ans.

Lors de la première phase, les participants répartis aléatoirement en deux groupes, ont bénéficié pendant 2 mois de consultations de rééducation orthophonique hebdomadaires sans entraînement intensif. Lors de la deuxième phase, les participants ont bénéficié, outre leur suivi hebdomadaire, de trois types d'interventions intensives informatisées d'une durée de deux mois chacune. Les deux premières interventions ciblent les processus audio-phonologiques et visuo-attentionnels (dont l'ordre est contrebalancé entre les deux groupes) puis sont suivies d'une intervention qui cible les processus intermodalitaires. La construction des trois programmes d'entraînement s'est appuyée sur la littérature scientifique, l'expertise des orthophonistes, la plainte du patient (décision partagée de soin) et sur le contexte environnemental. Lors de la troisième phase, les interventions intensives ont été interrompues et les consultations hebdomadaires de rééducation orthophonique maintenues pendant deux mois.

A l'issue du protocole de remédiation, les effets de l'intervention multimodale et multi-composante intensive ont montré une amélioration significative de l'efficacité en lecture (d de Cohen=2,3), de la compréhension en lecture (d de Cohen=0,9) et de l'orthographe (d de Cohen=0,78), comparée à une rééducation orthophonique hebdomadaire (première phase), et ce quel que soit l'ordre des interventions. L'analyse de cas multiples a révélé qu'à l'issue du protocole de remédiation 52 % des participants n'avaient plus de trouble de la lecture.

En conclusion, nos résultats montrent l'efficacité d'une remédiation intensive multimodale et multi-composante dans le traitement de la dyslexie développementale. Ces résultats confirment le caractère davantage curatif que compensatoire de nos interventions et ouvrent une nouvelle piste pour la remédiation de la dyslexie développementale.

Mots-clés : troubles d'apprentissage, dyslexie développementale, déficits cognitifs sous-jacents, remédiation multimodale et multi-composante, essai clinique randomisé.

