



HAL
open science

**Mise en place et évaluation d'un protocole de
remédiation multimodale et intensive de la dyslexie
développementale Implementation and evaluation of an
intensive and multimodal remediation protocol for
developmental dyslexia**

Karine Louna Harrar-Eskinazi, Ambre Denis-Noël, Bruno de Cara, Gilles
Leloup, Julie Nothelier, Hervé Caci, Sylvane Faure, Johannes C Ziegler

► **To cite this version:**

Karine Louna Harrar-Eskinazi, Ambre Denis-Noël, Bruno de Cara, Gilles Leloup, Julie Nothelier, et al.. Mise en place et évaluation d'un protocole de remédiation multimodale et intensive de la dyslexie développementale Implementation and evaluation of an intensive and multimodal remediation protocol for developmental dyslexia. Pratiques innovantes et expertise orthophonique au cœur du parcours de soins. 29e congrès scientifique international FNO - Un autre regard sur les TND. Pratiques innovantes et expertise orthophonique au cœur du parcours de soins, Ortho Edition, pp.314-343, 2023. hal-04547666

HAL Id: hal-04547666

<https://amu.hal.science/hal-04547666>

Submitted on 15 Apr 2024

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

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

Mise en place et évaluation d'un protocole de remédiation multimodale et intensive de la dyslexie développementale

Implementation and evaluation of an intensive and multimodal remediation protocol for developmental dyslexia

Karine Louna Harrar-Eskinazi, Ambre Denis-Noël, Bruno De Cara, Gilles Leloup, Julie Nothelier, Hervé Caci, Sylvane Faure, Johannes C. Ziegler

Karine Louna Harrar-Eskinazi
Orthophoniste, PhD, Post-doctorante en Psychologie
Université Côte d'Azur, LAPCOS, Nice
karine.harrar@etu.univ-cotedazur.fr

Ambre Denis-Noël
Ingénieure de recherche
Aix-Marseille CNRS, LPC, Marseille
ambre.DENIS@univ-amu.fr

Bruno De Cara
Maître de Conférence en Psychologie
Université Côte d'Azur, LAPCOS, Nice
bruno.de-cara@univ-cotedazur.fr

Gilles Leloup
Orthophoniste, PhD
Université Côte d'Azur, CoBTeK, Nice
gileloup@gmail.com

Julie Nothelier
Orthophoniste, Ingénieure d'Étude
Université Côte d'Azur, LAPCOS, Nice
julie.nothelier@gmail.com

Hervé Caci
Docteur en Neurosciences, Directeur de recherche
Hôpitaux de Nice CHU-Lenval & CESP
U1018 INSERM UPS-UVSQ
caci.h@pediatrie-chulenal-nice.fr

Sylvane Faure
Professeur des Universités en Neuropsychologie
Université Côte d'Azur, LAPCOS, Nice
sylvane.faure@univ-cotedazur.fr

Johannes C. Ziegler
Docteur en Neurosciences, Directeur de Recherche
Aix-Marseille Université, CNRS, LPC, ILCB, Marseille
johannes.ziegler@univ-amu.fr

Résumé

Un grand nombre d'études suggère que la plupart des lecteurs dyslexiques présentent de multiples déficits audio-phonologiques, visuo-attentionnels et audio-visuels sous-jacents, présents simultanément à des degrés divers et qui entraînent une grande variabilité des troubles de la lecture et de l'orthographe. L'originalité de cette intervention est de proposer une approche de remédiation

multimodale et multi-componentielle en proposant des programmes d'entraînement individualisés, intensifs et à domicile pendant 6 mois.

Cette étude longitudinale et multicentrique est menée en trois phases auprès de 144 enfants dyslexiques, âgés de 8 à 13 ans, avec la participation de 94 orthophonistes. Lors de la première phase, les participants bénéficient de consultations hebdomadaires de rééducation orthophonique pendant deux mois. Lors de la deuxième phase, outre leur suivi hebdomadaire, ils bénéficient de trois types d'interventions intensives et informatisées, audio-phonologique, visuo-attentionnelle et audio-visuelle, d'une durée de deux mois chacune. Lors de la troisième phase, les interventions intensives sont arrêtées 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-componentielle intensive ont montré une amélioration significative de l'efficacité en lecture, de la compréhension en lecture et de l'orthographe, en comparaison avec les effets d'une rééducation orthophonique hebdomadaire. De plus, l'analyse de cas multiples a révélé que 52 % des participants n'avaient plus de trouble de la lecture, à l'issue du protocole de remédiation. Nos résultats mettent en évidence l'efficacité d'un protocole de remédiation intensive multimodale et multi-componentielle et ouvrent une nouvelle voie dans la remédiation de la dyslexie développementale.

Mots-clés : dyslexie développementale, déficits audio-phonologiques, visuo-attentionnels, audio-visuels, remédiation multimodale et multi-componentielle.

Abstract

A large number of studies suggest that most dyslexic children exhibit multiple underlying audio-phonological, visuo-attentional and audio-visual deficits, that are simultaneously present to varying degrees, leading to a wide range of deficits in reading and spelling. The originality of this intervention is to propose a multimodal and multi-componential rehabilitation programme, using individualized and intensive training at home during 6 months.

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 received weekly speech therapy for two months. In the second phase, in addition to their weekly speech therapy sessions, they received three types of intensive computer-based interventions, audio-phonological, visuo-attentional and audio-visual, for two months each.

In the third phase, intensive interventions were discontinued and weekly speech therapy sessions 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, reading comprehension and spelling, compared with weekly speech therapy. In addition, a multiple-case analysis showed that 52% of participants were no longer deficient in reading. Our results highlight the effectiveness of intensive multimodal and multi-componential remediation protocol, and open up a new issue in the remediation of developmental dyslexia.

Keywords: developmental dyslexia, audio-phonological, visuo-attentional and audio-visual deficits, multimodal and multi-componential remediation.

1. Introduction

Le Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux (DSM-5) définit la dyslexie développementale (DD) comme un trouble spécifique, sévère et durable d'apprentissage du langage écrit, en dépit d'une intelligence normale et de l'absence de pathologie neurologique ou psychiatrique avérée, de déficit sensoriel visuel et auditif ou de carence socio-éducative grave (American Psychiatric Association, 2013). Selon cette classification, la DD se caractérise par des troubles neuro-développementaux de la lecture et de l'orthographe. Plus précisément, les lecteurs dyslexiques éprouvent de grandes difficultés à apprendre et à automatiser le décodage des mots écrits, fondé sur le développement de la conversion grapho-phonémique (Ziegler et al., 2020). De fait, la lecture reste souvent peu fluide et nécessite un effort cognitif supérieur à celui des enfants normolecteurs (Shaywitz & Shaywitz, 2005).

De nombreuses études montrent que l'étiologie de la DD est multifactorielle (McGrath et al., 2020; Pennington, 2006) et que la majorité des lecteurs dyslexiques présenteraient des déficits variables de plusieurs processus cognitifs-sous-jacents essentiellement audio-phonologiques, visuo-attentionnels et audio-visuels, associés aux troubles de la lecture et de l'orthographe (O'Brien & Yeatman, 2021). De plus, ces multiples déficits et leurs manifestations évolueraient différemment avec l'âge et la nature des interventions thérapeutiques, ce qui augmenterait encore leur variabilité individuelle (Menghini et al., 2010; Saksida et al., 2016; Valdois et al., 2021; White et al., 2006; Zoubrinetzky et al., 2014). Ainsi, il serait logique de tenir compte de cette variabilité des profils cliniques en adaptant la remédiation au pattern de déficits propre à chaque patient.

Or, les études scientifiques interventionnelles de remédiation de la DD sont généralement fondées sur des hypothèses causales d'une altération plus ou moins exclusive d'un seul type de déficit. Parmi les plus étudiées, ces études interventionnelles ont ciblé les déficits audio-phonologiques, visuo-attentionnels ou de l'intégration intermodale audio-visuelle (Serniclaes et al., 2015).

Les déficits de traitement de l'information Audio-Phonologique (AP) altèrent la capacité d'identifier, de stocker, de récupérer ou de manipuler les phonèmes qui composent le mot. Différents niveaux d'altération du traitement de l'information AP ont été décrits : les déficits perceptifs auditifs de bas niveaux (Casini et al., 2018; Goswami, 2011; Serniclaes et al., 2015), les déficits du déplacement temporel et spatial de l'attention auditive (Hari & Renvall, 2001; Lallier et al., 2010) et les déficits d'accès aux représentations phonologiques (Boets et al., 2013; Ramus & Szenkovits, 2008). Différents types d'intervention ont ainsi été expérimentés.

Par exemple, un entraînement auditif de la perception catégorielle avec le logiciel *Rapdys* améliorerait la conscience phonologique et les compétences en lecture (Collet et al., 2017; Zoubrinetzky et al., 2019). Plusieurs méta-analyses ont montré que l'entraînement à la conscience phonémique est fondamental mais à condition qu'il soit intensif et systématiquement associé à des entraînements de lecture (Ehri et al., 2001; Galuschka et al., 2014). Plus récemment, des bénéfices en vitesse de lecture auraient été obtenus après un entraînement numérique de la dénomination rapide automatisée (Pecini et al., 2019).

Les déficits de traitement de l'information Visuo-Attentionnelle (VA) peuvent altérer la capacité d'identifier, de stocker, de récupérer ou de manipuler les graphèmes qui composent le mot. Différents niveaux d'altération du traitement de l'information visuo-attentionnelle ont été décrits : les déficits perceptifs visuels de bas niveau (Lawton, 2019), les déficits du déplacement temporel et spatial de l'attention visuelle (Bertoni et al., 2019; Vidyasagar, 2019) et les déficits visuo-attentionnels.

Le déficit visuo-attentionnel le plus largement décrit en France est la réduction de l'empan VA (pour une revue, voir Valdois, 2022), c'est-à-dire du nombre de lettres traitées simultanément lors d'une fixation oculaire. Un entraînement intensif avec le logiciel *Maeva* (Lobier, 2008) augmenterait l'empan VA et améliorerait également les compétences de conscience phonémique et de lecture de mots irréguliers (Zoubrinetzky et al., 2019). Le déséquilibre entre les niveaux d'analyse globale et locale d'une scène visuelle complexe peut aussi altérer l'encodage des lettres et la stabilisation des représentations orthographiques (Franceschini et al., 2017; Goldstein-Marcusohn et al., 2020). Un

entraînement intensif avec le logiciel *Switchipido* (Bedoin & Medina, 2013) montrerait des effets positifs sur les compétences de focalisation de l'attention visuelle et sur les compétences en lecture de mots réguliers et irréguliers.

Le déficit de traitement InterModalitaire (IM) altère l'intégration simultanée des lettres et des sons en tant qu'objet audio-visuel unique (Blomert, 2011). Le logiciel d'aide à l'apprentissage de la lecture *GraphoGame* (Richardson & Lyytinen, 2014) créé en Finlande, puis adapté en français (Lassault et al., 2022) et dans d'autres langues (Brem et al., 2010; Kyle et al., 2013; Saine et al., 2011), permet une présentation audio-visuelle simultanée et répétée de lettres, syllabes, mots et phrases. Développé dans une interface ludique, son objectif est de permettre l'automatisation des associations phonologiques et orthographiques. Une méta-analyse montre que *GraphoGame* aurait des effets positifs sur les compétences en lecture seulement si le niveau d'interaction avec un adulte est élevé (McTigue et al., 2020). Ces effets seraient plus grands pour les enfants qui ne maîtrisent pas les étapes initiales de l'apprentissage de la lecture, telles que la compréhension du principe alphabétique et la correspondance entre les graphèmes et les phonèmes (Lassault et al., 2022).

Pour être appliquées dans un contexte clinique, ces programmes d'interventions nécessiteraient un cadre méthodologique de soin. L'objectif de cette étude était donc de fournir aux orthophonistes un protocole de remédiation multimodale auditive, visuelle, audio-visuelle et multi-componentielle (i.e., ciblant la perception catégorielle, la conscience phonologique, la mémoire à court terme phonologique, la dénomination rapide automatisée, l'empan visuo-attentionnel, la focalisation visuo-attentionnelle, la mémoire orthographique et l'intégration grapho-phonologique) qui intégrerait les données probantes interventionnelles et de l'évaluer. Nous avons émis l'hypothèse qu'un protocole combinant trois types d'intervention intensives AP, VA et IM, améliorerait significativement les compétences en lecture et en orthographe, comparées aux effets d'une rééducation orthophonique conventionnelle hebdomadaire et que ces effets se maintiendraient au moins deux mois après l'arrêt de l'intervention.

2. Méthodologie

2.1. Participants

Les participants âgés entre 8 ans et 13 ans, ont été inclus dans l'étude par 94 orthophonistes exerçant en cabinet libéral dans différentes villes de France, selon les critères diagnostiques du DSM-5 et du modèle *Simple View of Reading* (Gough & Tunmer, 1986). Sur 144 enfants dyslexiques, 93 ont terminé le protocole au moment des analyses effectuées dont 48 participants dans le groupe PHO-VA d'âge moyen de 118 mois et 45 participants dans le groupe VA-PHO d'âge moyen de 127 mois.

Cette étude multicentrique, randomisée et croisée a été préenregistrée (ClinicalTrials.gov : NCT04028310) et le protocole de l'étude a été publié avant la réalisation de l'étude (Harrar-Eskinazi et al., 2022). L'approbation éthique a été accordée par le Comité national français de protection des personnes (ID-RCB 2019-A01453-54). Nous avons obtenu le consentement écrit éclairé de tous les enfants et de leurs soignants conformément à la Déclaration d'Helsinki et à la loi française sur la recherche impliquant des participants humains (décret n° 2016-1537).

2.2. Plan expérimental

L'expérimentation s'est déroulée en trois phases sur une période de 16 mois, selon la procédure illustrée sur la Figure 1. 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.

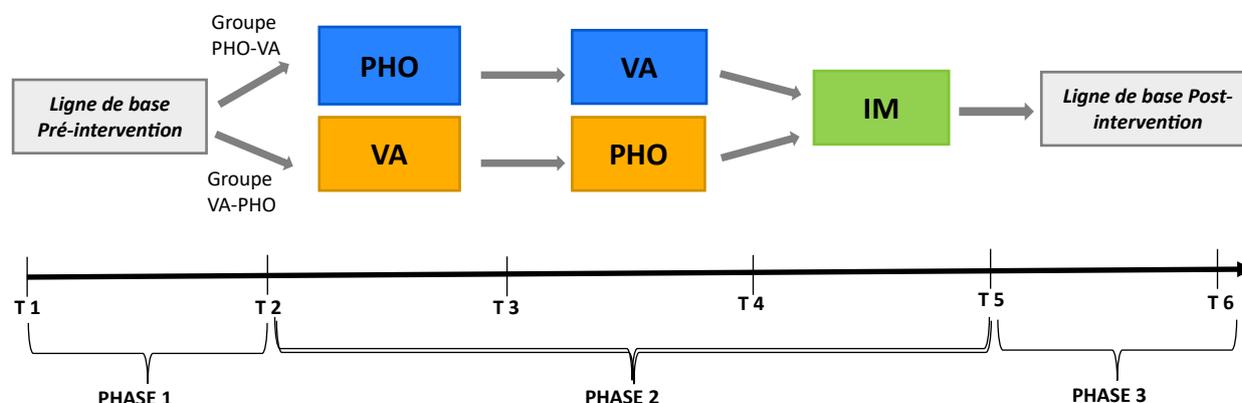


Figure 1. Procédure expérimentale en trois phases d'une durée totale de 16 mois. PHO : intervention audio-PHOnologique ; VA : intervention Visuo-Attentionnelle, IM : intervention InterModalitaire.

Phase 1 : *Ligne de base Pré-intervention*, pendant laquelle les participants effectuent une rééducation orthophonique conventionnelle sans entraînement intensif pendant huit semaines, à la fréquence d'une séance hebdomadaire de 30 minutes avec l'orthophoniste. La *Ligne de base Pré-intervention* correspond aux mesures effectuées à T1 et T2.

Phase 2 : *Protocole de remédiation* pendant lequel les participants effectuent les trois programmes d'interventions intensives, audio-phonologique (PHO), visuo-attentionnelle (VA), et intermodalitaire (IM) à domicile 5 jours/semaine, 15 min/jour. Chaque programme dure 8 semaines puis est suivi 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. Le *Protocole de remédiation* correspond aux mesures effectuées à T2 et T5.

Phase 3 : *Ligne de base Post-intervention* de T5 à T6 : 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 à T5 et T6. La *Ligne de base Post-intervention* correspond aux mesures effectuées à T5 et T6.

2.2 Protocole d'évaluation

Lecture et orthographe

L'efficacité en lecture a été évaluée par le texte non signifiant *L'Alouette*, « gold standard » des épreuves de leximétrie (Cavalli et al., 2018), par deux textes signifiants, *La Mouette* et *Le Pingouin*, et par un test de lecture de mots en colonnes *Eval2M (Evaléo 6-15)*, Launay et al., 2018) à T1, T2, T3, T4, T5, T6. Les procédures d'identification ont été évaluées par des épreuves de lecture de mots réguliers, irréguliers et de pseudomots (*Evaléc*, Sprenger-Charolles et al., 2018). Les compétences en compréhension de phrases lues silencieusement (*ORLEC L3*, Lobrot, 1967; Piérart & Grégoire, 2004))

et en orthographe lexicale, morphosyntaxique et phonétique (*Chronosdictées*, Baneath et al., 2006) ont été également évaluées à T1, T2, T5.

Processus phonologiques et visuo-attentionnels (T1, T2, T5)

Les processus phonologiques ont été évalués par des épreuves de répétition orale de pseudomots (mémoire à court terme phonologique), de suppression de la première syllabe de pseudomots trisyllabiques, de suppression du premier phonème de pseudomots monosyllabiques (analyse phonologique) et de dénomination rapide de couleurs (*Evalec*, Sprenger-Charolles et al., 2018).

Les processus VA ont été évalués par le logiciel *Evadys* (Valdois et al., 2014) qui mesure l'empan VA par une tâche de report global et une tâche de report partiel, et le logiciel *Sigl* (Bedoin & Medina, 2014) qui mesure la capacité à focaliser l'attention sur un mode d'analyse globale ou locale de l'information visuelle.

Processus mnésiques, linguistiques et intelligence non-verbale

L'empan de chiffres à l'endroit et à rebours (*Evaléo 6-15*, Launay et al., 2018) évalue les compétences en mémoire immédiate et mémoire de travail verbale. L'évaluation de l'empan visuo-spatial à l'endroit et à rebours (*Blocs de Corsi*, Fournier & Albaret, 2013) détermine les compétences en mémoire immédiate et mémoire de travail visuo-spatiale (T1, T2, T5).

Les compétences lexicales ont été évaluées par des tâches de dénomination et de désignation d'images (*Evaléo 6-15*, Launay et al., 2018). La compréhension orale morphosyntaxique a été mesurée par *l'E.CO.S.SE* (Lecocq, 1998). L'épreuve des *Matrices* non verbale du *WISC-V* (Wechsler, 2014) a été utilisée comme mesure de l'intelligence fluide et visuo-spatiale (T1).

Impact de la dyslexie

Deux questionnaires ont été proposés avant et après les entraînements aux parents et à l'enfant afin d'évaluer la perception de l'impact du trouble de la lecture sur l'appétence à lire et l'estime de soi dans le contexte scolaire et extra-scolaire (T1, T2, T5, T6).

2.3. Programmes d'intervention

Le programme d'intervention PHO associe l'entraînement des déficits audio-phonologiques (perception catégorielle, analyse phonémique, la dénomination rapide automatisée (DRA), mémoire sérielle phonologique) à un entraînement du décodage phonologique en lecture (conversion graphème-phonème) et en transcription (conversion phonème-graphème). Le programme d'intervention VA associe un entraînement des déficits VA (empan VA, analyse globale/locale) à un entraînement du recodage lexical en lecture et de la mémoire orthographique en transcription. Le programme d'intervention IM associe *GraphoGame* à un entraînement de la fluidité en lecture.

Intervention audio-phonologique

Quatre processus audio-phonologiques peuvent être entraînés selon les performances déficitaires mises en évidence chez le participant aux pré-tests de la *Ligne de base Pré-intervention*: la perception catégorielle avec le logiciel *RapDys* (Collet et al., 2017), la mémoire sérielle phonologique avec le logiciel *PhonopidoW* (Medina, 2010), la DRA avec le programme *Naming Speed* (Harrar-Eskinazi et al., 2020) et l'analyse phonémique par le programme *Le Phonème* (Lang & Villuendas, 2011). Les entraînements informatisés s'effectuent 5 jours/semaine, 10 minutes/jour et sont associés au programme *Le Phonème* 5 jours/semaine, 5 minutes/jour. Dans un souci d'individualiser l'entraînement selon le profil de chaque participant, l'entraînement des compétences phonologiques varie selon la nature et l'intensité des troubles de chaque participant. L'orthophoniste décide des entraînements prescrits. Par exemple, pour un participant ne présentant pas de déficit de la mémoire sérielle phonologique mais un déficit de l'analyse phonémique, de la DRA et de la perception

catégorielle, 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.

- L'entraînement de la perception catégorielle avec le logiciel *RapDys* améliore l'identification et la discrimination de la différence de voisement entre les consonnes /t/ et /d/. La persistance d'une perception allophonique correspond à une perception trop grande du délai d'établissement du voisement (Voice Onset Time ou VOT). En réduisant progressivement le VOT (positif pour les phonèmes sourds et négatif pour les phonèmes voisés) des pics allophoniques à +/- 75 ms VOT aux pics phonémiques à +/- 5 ms VOT, ce logiciel permet de réduire la distance acoustique entre deux phonèmes autour de la frontière phonémique de voisement et favorise ainsi une catégorisation des phonèmes.
- L'entraînement de la mémoire sérielle phonologique avec le logiciel *PhonopidoW* consiste à discriminer un son parmi une séquence de plusieurs sons, à comparer ou à composer des séquences de sons. La proximité phonologique entre les sons proposés et la charge en mémoire phonologique sont paramétrables.
- L'entraînement de la DRA avec *Naming Speed*, inspiré du logiciel italien *Run the RAN* (Pecini et al., 2019) consiste à entraîner la dénomination rapide de stimuli visuels non alphanumériques. 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. L'enfant dénomme les images, dans le sens de lecture, selon une vitesse de dénomination fournie automatiquement par le marquage d'un curseur rouge entourant l'image à dénommer. Au fur et à mesure de l'entraînement, la vitesse de dénomination est augmentée en passant d'une seule image incluse à 2, 3, 4 et 5 images à dénommer simultanément. L'intervalle inter-stimuli passe de 200 ms à 50 ms.
- L'entraînement de l'analyse phonémique se compose de tâches orales de fusion de phonèmes (par exemple, d/r/a/g/ɓ : dragon) et de segmentation de mots en phonèmes (par exemple, jardin : /j/a/r/d/ɛ̃) avec des listes de 10 mots et/ou de pseudomots, issues d'un outil de remédiation *Le Phonème*. Les mots fusionnés et segmentés sont ensuite lus à voix haute et transcrits manuellement par le participant. A la fin de la copie, l'enfant est invité à rappeler par écrit les mots dont il se souvient.

Intervention visuo-attentionnelle

Les compétences VA sont entraînées avec les logiciels *Maeva* (Lobier, 2008) et *Switchipido* (Bedoin & Medina, 2013), à une fréquence de 5 jours/semaine, 10 minutes/jour. Ces deux logiciels d'entraînement sont systématiquement associés à un outil numérique de remédiation de la mémoire orthographique ELOR, 5 minutes/jour.

- L'entraînement de l'empan visuo-attentionnel avec le logiciel *Maeva* présente brièvement (420 à 120 ms) à l'écran une séquence de 2 à 7 stimuli visuels comprenant des lettres, des pseudo-lettres, des chiffres, des formes géométriques ou des caractères japonais. À sa disparition, l'enfant doit réaliser une tâche de catégorisation selon six consignes différentes de difficulté croissante. Un algorithme prenant en compte les réponses de l'enfant permet d'adapter en temps réel la difficulté de l'exercice.
- L'entraînement de l'analyse visuelle locale/globale avec le logiciel *Switchipido* présente brièvement à l'écran des stimuli hiérarchisés (grands stimuli réalisés avec des petits dessins). L'enfant doit focaliser son attention visuelle soit sur la forme globale, soit sur les détails, soit mobiliser la bascule de la focalisation visuelle entre le niveau global et le niveau local.

L'entraînement de la mémoire orthographique avec le programme informatisé *ELOR* favorise le processus mnésique d'encodage/stockage/récupération par une lecture « flash » de 20 mots ayant la même régularité orthographique (par exemple, mots finissant par « eau »). À la suite de la lecture, les mêmes mots présentés dans le même ordre en temps limité sont copiés, puis écrits sous dictée.

Intervention intermodalaire

- L'entraînement audio-visuel avec le logiciel *GraphoGame* (Richardson & Lyytinen, 2014) est proposé à tous les participants pendant deux mois, 5 jours/semaine, 10 minutes/jour, afin de renforcer l'automatisation du couplage entre les codes orthographique et phonologique. Contrairement aux entraînements phonologiques et VA proposant une présentation non simultanée, soit auditive, soit visuelle, d'unités linguistiques ou non linguistiques, *GraphoGame* est un entraînement audio-visuel présentant simultanément des stimuli auditifs entendus et des stimuli visuels écrits d'unités linguistiques de différentes tailles (phonèmes, syllabes, rimes, mots, phrases). Trois niveaux de démarrage ont été paramétrés pour s'adapter au niveau de lecture.
- L'entraînement de la fluence en lecture avec le programme *LARMA* (Lecture Accompagnée, Répétée, Masquée, Accélérée) est associé à *GraphoGame*, 5 jours/semaine, 5 minutes/jour. L'objectif est d'améliorer la fluidité de lecture et l'appétence à lire. Ce programme s'inspire des interventions en lecture répétée avec masquage auditivo-verbal (Leloup et al., 2021).

3. Résultats

3.1. Évolution des compétences en lecture de texte et en orthographe

Analyses statistiques

Pour évaluer les effets du protocole, nous avons utilisé des modèles linéaires à effets mixtes. Les analyses statistiques ont été réalisées à l'aide du logiciel R (R Core Team, 2021) version 4.1.2 et du *package lme4* (Bates et al., 2014). Cinq variables dépendantes (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). 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 *Ligne de base Pré-intervention* sans entraînement.

Pour respecter les directives éditoriales concernant la longueur de l'article, nous présenterons seulement les modèles linéaires de deux VD : l'efficacité en lecture des textes *Mouette-Pingouin* (i.e., le nombre de mots correctement lus en 2 minutes) et le nombre d'erreurs en dictées de phrases au test *Chronodictées*. Les résultats des autres VD sont disponibles en ligne

(<https://www.theses.fr/2023COAZ2025>). Le test de *Rosner* n'a identifié aucune valeur aberrante. Les résultats du test *Shapiro-Wilk* indiquent que les résidus de ces VD n'étaient pas normalement distribués ($p < .05$). La distribution des résidus présente des coefficients d'asymétrie (*Skewness* : S) proches de 0 mais les coefficients d'aplatissement (*Kurtosis* : K) étaient hétérogènes, *Mouette-Pingouin* (S = 0.11 ; K = 0.96) et *Chronosdictées* (S = 0.9 ; K = 7.6). 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).

Efficiace en lecture de texte (Mouette/Pingouin)

Les analyses statistiques, présentées sur la Figure 2 pour chaque groupe, à chacun des temps, montrent que les participants des deux groupes ont amélioré 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 ($F(5, 449) = 185.23, p < .001$) (cf. Figure 2).

Les comparaisons post-hoc n'ont montré aucune amélioration significative des compétences en lecture pour la *Ligne de base Pré-intervention* entre T1 et T2 (estimation = -1.58, erreur standard = 2.76,

$t = -0.57, p = .99$), ni pour la *Ligne de base Post-intervention* entre T5 et T6 (estimation = -1.18, erreur standard = 2.8, $t = -0.42, p = .99$).

Comme attendu, les comparaisons post-hoc ont mis en évidence une amélioration des compétences en lecture significative pendant toute la période d'entraînements intensifs de T2 à T5, et ce, à l'issue de chaque programme d'intervention PHO, VA et IM ($t_s < -4.1 ; p_s < .001$). Enfin, l'ordre des entraînements n'a pas eu d'effet sur cette amélioration de même ampleur pour les deux groupes PHO-VA et VA-PHO, l'effet principal de Groupe ($F(1, 90) = 3.15, p = .079$) et l'interaction entre Temps et Groupe ($F(5, 449) = 0.93, p = .455$) n'étant pas significatifs.

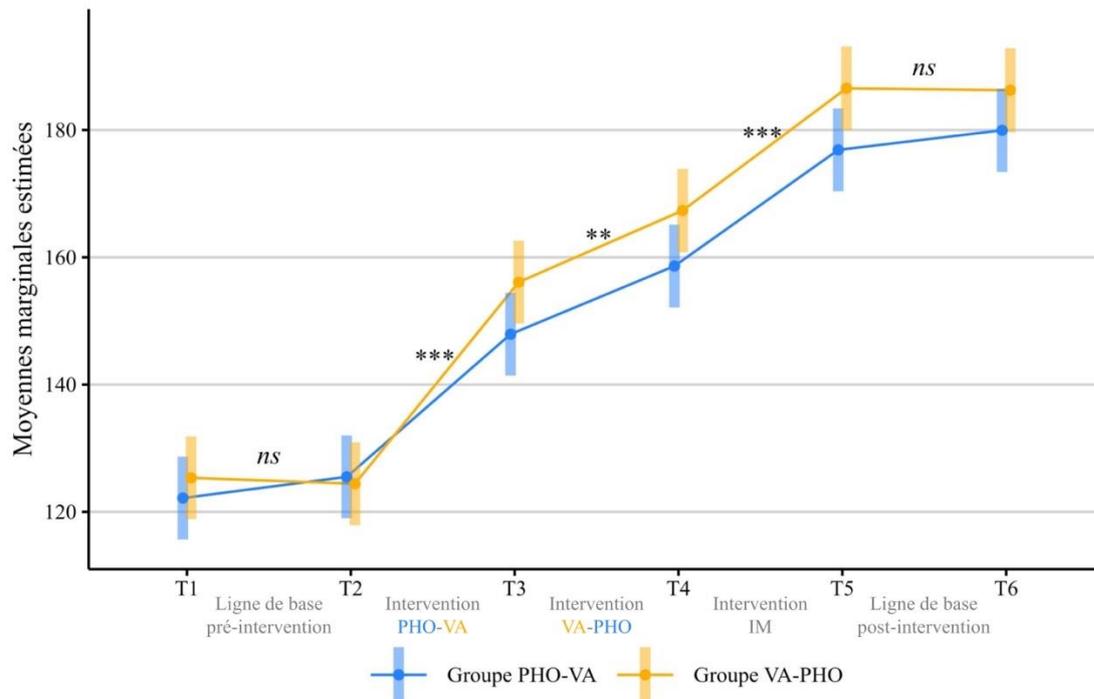


Figure 2. Représentation des prédictions du modèle concernant l'évolution de l'efficacité en lecture au test Mouette-Pingouin pour chaque groupe et à chaque temps. La ligne bleue représente les moyennes marginales estimées du groupe PHO-VA. La ligne jaune représente les moyennes marginales estimées du 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 comparaisons post-hoc (***: $p < .001$; **: $p < .01$; ns : $p > .05$).

Compétences orthographiques (Chronosdictées)

Les analyses (cf. Figure 3) confirment que les enfants dyslexiques ont fait significativement moins d'erreurs à T5 qu'à T1 ($F(2, 717) = 37.86, p < .001$). En revanche, l'effet principal de Groupe ($F(1, 89) = 0.71, p = .39$) et l'interaction entre Temps et Groupe ($F(2, 717) = 1.56, p = .21$) n'étaient pas significatifs. Les comparaisons post-hocs décomposant l'effet principal de Temps montrent que le nombre d'erreurs d'orthographe ne diminue pas durant la *Ligne de base Pré-intervention* (i.e., entre T1 et T2 ; $t = 0.96, p = .60$) mais diminue de manière significative à l'issue de l'intervention, pendant la période d'entraînements intensifs (i.e., entre T2 et T5 ; $t = 7.02, p < .001$).

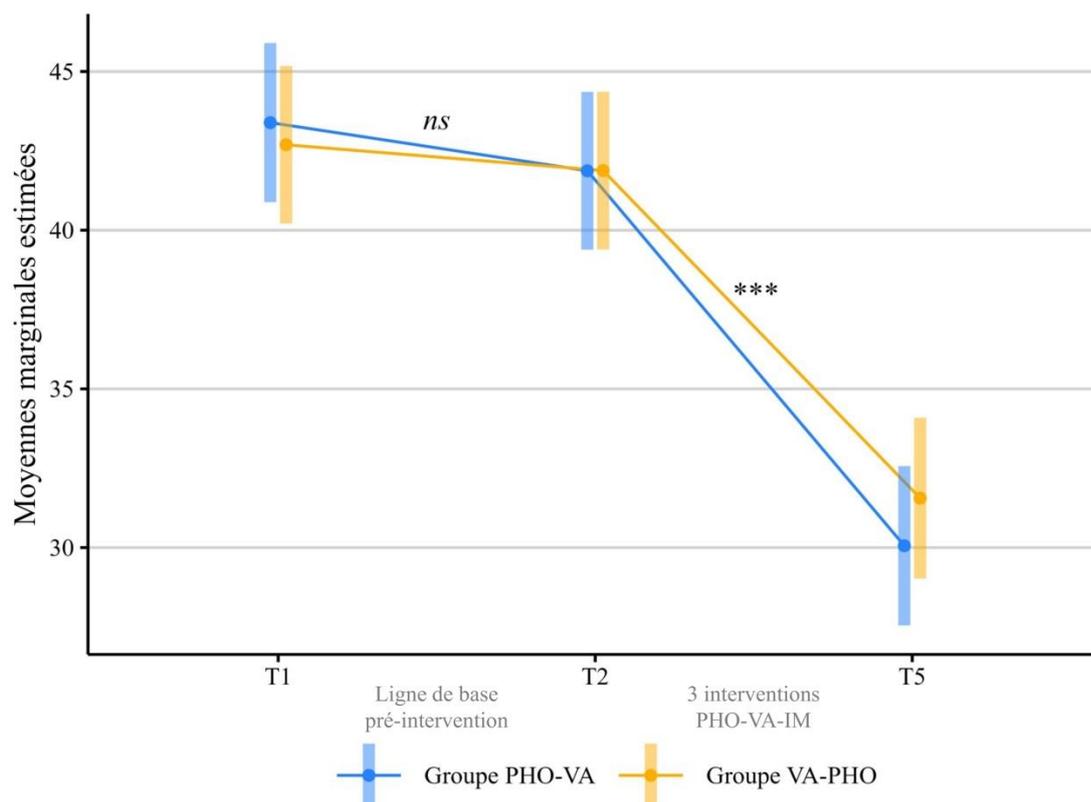


Figure 3. Représentation des prédictions du modèle pour le nombre total d'erreurs en orthographe dans chaque groupe aux temps 1, 2 et 5. La ligne bleue représente les moyennes marginales estimées du groupe PHO-VA. La ligne jaune représente les moyennes marginales estimées du groupe VA-PHO. Les barres 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).

3.2. Comparaison des tailles d'effet pré et post-intervention

Analyses statistiques

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 tailles d'effets en lecture, en compréhension de lecture et en orthographe à l'issue des trois programmes d'interventions (PHO + VA + IM) par rapport à la *Ligne de base pré-intervention*, pour chaque variable dépendante *DeltaText*, *Mouette/Pingouin*, *Chronosdictées* et *L3-ORLEC*. Chaque taille d'effet a été calculée comme suit :

$$d = \frac{\text{Temps}^n - \text{Temps}^{n-1}}{\sigma(\text{Temps}^n, \text{Temps}^{n-1})}$$

La taille d'effet à l'issue de la *Ligne de base Pré-intervention* a été calculée à partir de T1 et T2. La taille d'effet à l'issue des 3 interventions (i.e., PHO + VA + IM) a été calculée à partir de T2 et T5.

Les tailles d'effets calculées à partir de T1-T2 et T2-T5 ont été comparées par des tests *t de Student* pour échantillons appariés, avec correction de *Bonferroni*. Le calcul des *t-test* et des *d* de Cohen¹ est effectué avec le package *rstatix* (Kassambara, 2021). Ici, les variables présentées sont l'efficacité en lecture

¹ 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*. 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).

(*DeltaText* et *Mouette/Pingouin*), le nombre d'erreurs d'orthographe (*Chronosdictées*) et la compréhension de lecture (*ORLEC-L3*).

La Figure 4 illustre les tailles d'effets pré et post intervention, obtenues en lecture de textes, en orthographe, et en compréhension écrite.

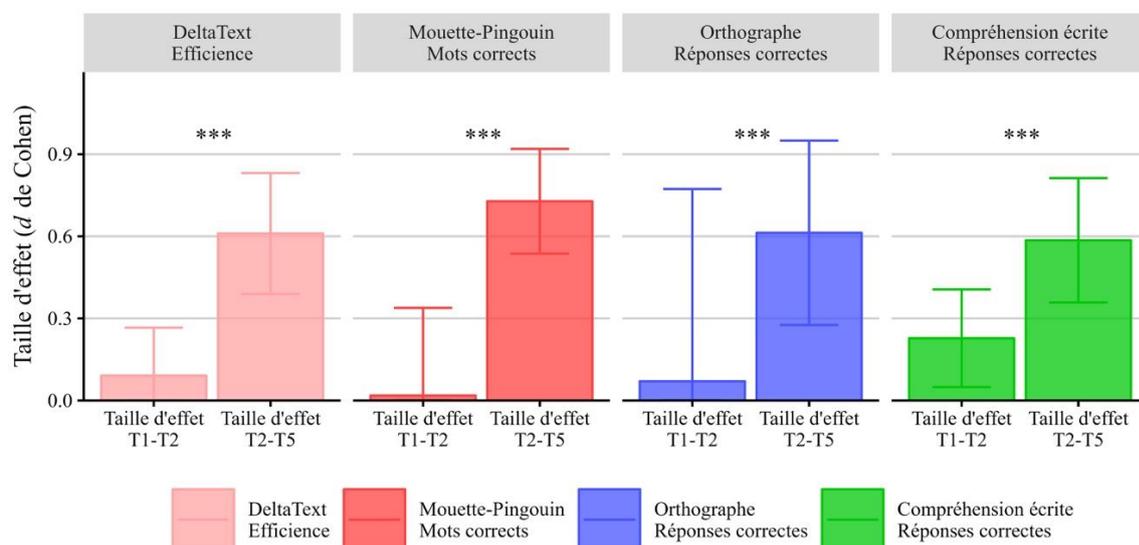


Figure 4. Tailles d'effet pré et post intervention concernant l'efficacité en lecture, la compréhension de lecture et l'orthographe.

Le Tableau 1 présente les tailles d'effet de la ligne de base pré-intervention et les tailles d'effet de l'intervention pour chacune des VDs, ainsi que les résultats des tests *t* de *Student* permettant de comparer ces tailles d'effets. Les résultats montrent que les tailles d'effet induites par le programme d'intervention sont significativement supérieures à celles induites par la ligne de base pré-intervention (cf. Tableau 1).

Tableau 1.

Tailles d'effet pré et post-intervention (*d* de Cohen)

Tests	<i>d</i> de Cohen		<i>Test de Student</i>		
	Tailles d'effet (T1-T2)	Tailles d'effet (T2-T5)	<i>t</i>	<i>ddl</i>	<i>p</i>
<i>DeltaText</i> Lecture textes non signifiants	0.11	0.62	-9.65	142.9	<.001
<i>Mouette/Pingouin</i> Lecture textes signifiants	0.02	0.74	-13.56	180.7	<.001
<i>Chronosdictées</i> Orthographe	0.07	0.65	5.29	176.3	<.001
<i>ORLEC L3</i> Compréhension écrite	0.23	0.60	-6.05	167.3	<.001

Notes. *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).

3.3. Évolution des compétences en lecture

Enfin dans le cadre d'une étude de cas multiples, nous avons analysé l'évolution longitudinale des compétences en lecture d'un texte signifiant (*Mouette/Pingouin*) à tous les temps de l'intervention. L'analyse des scores de déviance pour chaque participant (calculés à partir des données normatives de chaque test pour chaque participant) a montré l'amélioration de l'efficacité en lecture selon un continuum de niveau de 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 compétences en lecture (cf. Figure 5).

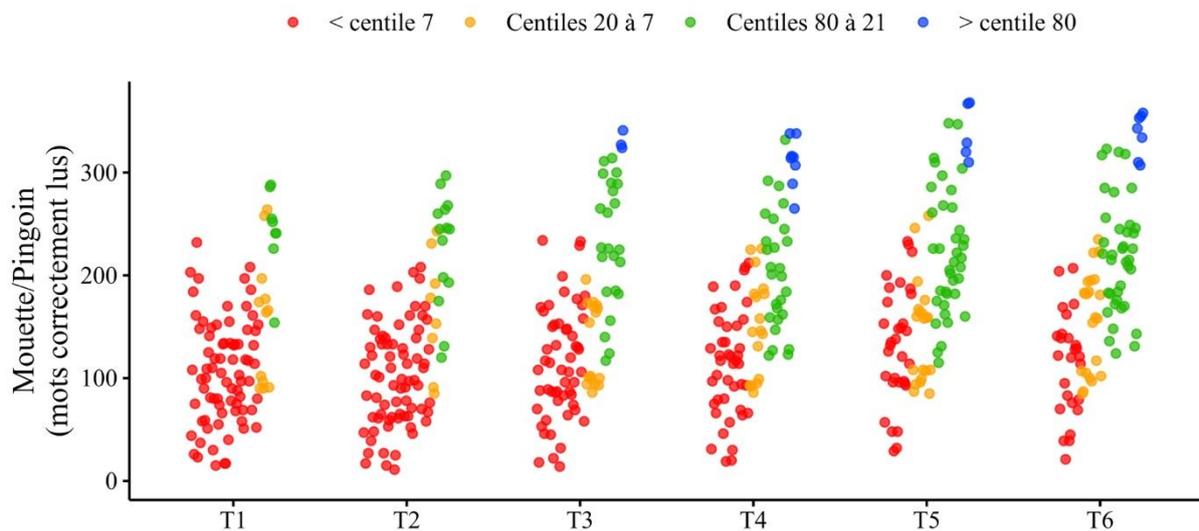


Figure 5. Évolution des performances en lecture au test *Mouette/Pingouin* à chaque temps de l'intervention. Pour chaque variable, l'axe des ordonnées représente les scores bruts tandis que la couleur des points représente le niveau de performances des participants sur la base des scores standardisés. 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.

Premier fait intéressant, l'analyse individuelle des scores de déviance par rapport aux données normatives a montré que 52% des participants ont normalisé leur score en lecture au test *Mouette-Pingouin* (lecture d'un texte signifiant) à l'issue de l'intervention à T6, 19% ont conservé un trouble modéré de la lecture et 28% ont présenté encore un trouble sévère de la lecture par rapport aux données normatives bien que ces participants aient augmenté leur efficacité en lecture. Deuxième fait intéressant, l'analyse de corrélation a indiqué que, à T1 et T5, plus le nombre de déficits cognitifs sous-jacents diminue, plus l'efficacité en lecture augmente (T1 : $r = -0.27$, $p < .001$; T5 : $r = -0.43$, $p < .001$).

4. Discussion

Cet essai clinique a évalué les effets d'une intervention multimodale (auditive, visuelle, audiovisuelle) 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 et l'orthographe. 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, il n'existe aucune étude ayant évalué une intervention multimodale et multi-componentielle auprès de lecteurs

dyslexiques. À la lumière des concepts théoriques de multi-déficits, nous avons fait l'hypothèse que ce protocole de remédiation incluant trois interventions aurait un effet cumulatif sur les compétences en lecture et en orthographe.

Comme attendu, les compétences en lecture et en orthographe se sont améliorées de façon significative tout au long du protocole de remédiation, comparées à celles de la *Ligne de base Pré-intervention* et se sont maintenues au moins deux mois après l'arrêt de l'intervention. Les gains sur les mesures d'efficacité en lecture de texte signifiant, du nombre d'erreurs en orthographe et de compréhension de lecture ont révélé des tailles d'effet élevées (respectivement : $d=0.74$; $d=0.65$, $d=0.60$) à l'issue de l'intervention multimodale. Enfin, 52% des participants ne présentaient plus de trouble d'apprentissage de la lecture à l'issue du programme de remédiation et cette amélioration était corrélée à la diminution des déficits cognitifs sous-jacents.

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: (1) Le protocole de remédiation cible les processus cognitifs sous-jacents audio-phonologiques, visuo-attentionnels et intermodalitaire, de façon intensive et longitudinale; (2) Chaque entraînement est adapté au profil individuel de chaque participant et cible un processus cognitif sous-jacent et des procédures de lecture et d'orthographe ; (3) Les entraînements sont numériques et référencés ; (4) et s'effectuent à domicile grâce à un partenariat parental.

Premièrement, la remédiation cible les processus cognitifs sous-jacents audio-phonologiques, visuo-attentionnels et intermodalitaire, de façon intensive et longitudinale. En partant du constat de l'hétérogénéité des profils sémiologiques des lecteurs dyslexiques, nous avons conçu notre protocole de remédiation selon les modèles à déficits multiples (Pennington, 2006; Perry et al., 2019) plus cohérents avec l'étiologie multifactorielle et probabiliste des troubles neurodéveloppementaux. De plus, 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 lecteurs dyslexiques (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 multimodale longitudinale et individuelle. L'ensemble de ces résultats souligne la nécessité d'évaluer et de traiter ces multiples déficits cognitifs sous-jacents 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).

Deuxièmement, les entraînements sont adaptés 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. 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). Pour élaborer l'intervention PHO, nous ne nous sommes pas contentés 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. Soulignons que les items proposés pour chaque entraînement ont été soigneusement sélectionnés par l'orthophoniste en fonction de la passation de lignes de base cliniques (Sackett et al., 1996). De plus, l'entraînement d'un déficit cognitif sous-jacent a été systématiquement 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).

Troisièmement, nous avons privilégié les supports numériques et nous nous sommes appuyés sur un partenariat parental. 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. En effet, le caractère ludique des entraînements proposés sur dispositifs numériques augmente les capacités attentionnelles (Yu & Tsuei, 2022) et la motivation. 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. Le feedback correctif et l'affichage des scores permettent un retour de l'information, un apprentissage sans erreur et un renforcement positif (Maillart et al., 2014), ce qui encourage 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 en 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. 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 participant.

Quatrièmement, les entraînements se sont effectués à domicile grâce à un partenariat parental. Afin d'optimiser l'adhésion des enfants aux entraînements intensifs, nous avons choisi de former les parents. Nous leur avons appris à utiliser de façon autonome les logiciels d'entraînement et à devenir de véritables experts dans le maniement des programmes d'intervention. De façon répétitive, nous leur avons fourni toutes les informations nécessaires sur la définition de la dyslexie, sur son impact et sur les solutions de remédiation que nous proposons. 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. Fait intéressant, 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). Enfin, 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.

La limite principale de cette étude est l'absence d'un groupe contrôle de participants n'ayant pas participé à ce protocole de remédiation multimodale intensive. La comparaison avec un groupe contrôle d'enfants recevant un entraînement non spécifique est normalement nécessaire pour contrôler l'effet du temps (la progression naturelle) et l'effet de la répétition des tests.

Nous avons choisi de présenter les analyses où seules les données des participants ayant terminé le protocole sont prises en compte. Cette analyse « par protocole » permet. Cela peut induire une surestimation des effets. Il sera nécessaire de faire une analyse des patients qui ont arrêté les entraînements en cours de route (« intention de traiter »).

Pour conclure, il est fort probable que l'efficacité de ce protocole de remédiation soit en lien avec la prise en compte des trois processus de traitement de la lecture impliquant le décodage phonologique, la qualité des représentations phonémiques et phonologiques et l'efficience du traitement orthographique et visuo-attentionnel, dans une vision plus intégrative de la lecture (Grainger et al., 2016) et en accord avec les modèles multi-déficits (Ziegler et al., 2019). Il est également fort probable que l'adaptation individuelle des entraînements, le recours aux outils numériques à domicile et le partenariat parental aient joué un rôle majeur dans la réussite de cette intervention. Il est possible que l'intégration d'autres modalités et d'autres composantes impliquées dans la lecture, comme les fonctions exécutives (Horowitz-Kraus et al., 2014; Pasqualotto et al., 2022), les fonctions visuelles (Bellocchi et al., 2018) et visuo-spatiales (Flores-Gallegos et al., 2022) ou encore les fonctions auditives temporelles (Van Hirtum et al., 2021), permettrait encore d'augmenter l'efficacité de notre protocole. A cette fin, nous allons répliquer cette étude avec trois groupes contrôles pour confirmer nos hypothèses et d'autres logiciels d'entraînement pour cibler d'autres fonctions.

Financements et Remerciements

Cette recherche a été financée par le CHU Lenval à Nice, par une Convention Industrielle de Formation par la Recherche (Cifre n° 2018/1089) en partenariat industriel avec la société GNOSIA et le Laboratoire d'Anthropologie et de Psychologie cliniques, Cognitives et Sociales (LAPCOS) et par le projet GraphoGameAdapt (ANR-22-FRAN-0004, PIA2/France2030) dans le contexte du programme Efran (Espaces de formation, de recherche et d'animation numériques).

Nous remercions les sociétés *Ortho Éditions*, *HappyNeuron* et *Gnosia* pour la mise à disposition des outils numériques. Nous remercions tous les parents et tout particulièrement les orthophonistes qui ont participé à cette étude. Leur implication et leur motivation ont permis le bon déroulement de l'essai clinique : 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 Vaultier, 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.

Références

- 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), Article 4.
<https://doi.org/10.1080/10573560591002286>
- American Psychiatric Association. (2013). *American Psychiatric Association. Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders: Neurodevelopmental Disorders: DSM-5* (5th edition). American Psychiatric Publishing.
- 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), Article 4.
<https://doi.org/10.1016/j.jml.2007.12.005>

- Baneath, B., Boutard, C., & Alberti, C. (2006). *Chronosdictées: Tools for evaluating orthographic performance, with and without time constraints* (Orthoéditions).
- Bates, D., Mächler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2014). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *arXiv Preprint arXiv:1406.5823*.
- Bedoin, N., & Medina, F. (2013). *Switchipido, training software for alternating between local and global visual treatments, and for the inhibition of details* [Computer software]. GNOSIA.
- Bedoin, N., & Medina, F. (2014). *Sigl: Software for the evaluation of selection and inhibition skills for global and local treatments* [Computer software]. 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*.
- 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>
- Blomert, L. (2011). The neural signature of orthographic–phonological binding in successful and failing reading development. *NeuroImage, 57*(3), Article 3. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.11.003>
- 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), Article 6163. <https://doi.org/10.1126/science.1244333>
- 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), Article 1. <https://doi.org/10.3758/BF03195507>
- Brem, S., Bach, S., Kucian, K., Kujala, J. V., Guttorm, T. K., Martin, E., Lyytinen, H., Brandeis, D., & Richardson, U. (2010). Brain sensitivity to print emerges when children learn letter–speech sound correspondences. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 107*(17), Article 17. <https://doi.org/10.1073/pnas.0904402107>
- Casini, L., Pech-Georgel, C., & Ziegler, J. C. (2018). It's about time: Revisiting temporal processing deficits in dyslexia. *Developmental Science, 21*(2), Article 2. <https://doi.org/10.1111/desc.12530>
- 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), Article 3. <https://doi.org/10.1177/0022219417704637>
- 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), Article 3. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2012.05.002>
- Cohen, J. (1988). *Statistical power analysis for the behavioral sciences. Edition 2*. Hillsdale. Erlbaum.
- 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. *Approche Neuropsychol Apprentissages Chez Enfant, 29*(148), 257–263.
- 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), Article 8. <https://doi.org/10.1177/0956797612472204>
- 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), Article 107.
- Dehaene, S. (2013). Les quatre piliers de l'apprentissage, ou ce que nous disent les neurosciences. *Paris Tech Review*.
- 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), Article 3.
<https://doi.org/10.1598/RRQ.36.3.2>
- 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>
- 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), Article 3.
<https://doi.org/10.3917/devel.016.0076>
- 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), Article 1.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-17626-1>
- 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), Article 2. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089900>
- 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), Article 2.
<https://doi.org/10.1080/19345747.2019.1689591>
- 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>
- 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>
- 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>
- Grainger, J., Dufau, S., & Ziegler, J. C. (2016). A Vision of Reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 20(3), Article 3. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.12.008>
- 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), Article n/a.
<https://doi.org/10.1002/rrq.477>
- Hari, R., & Renvall, H. (2001). Impaired processing of rapid stimulus sequences in dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, 5(12), Article 12. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01801-5](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01801-5)
- Harrar-Eskinazi, K. L., Nothelier, J., & Versio, M. (2020). *Naming Speed* [Computer software].
- 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), Article 6. <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), Article 3.
- Kassambara, A. (2021). rstatix: Pipe-friendly framework for basic statistical tests. R package version 0.7.0. *Computer Software*. <https://CRAN.R-Project.org/Packagename=Rstatix>
- Kyle, F., Kujala, J., Richardson, U., Lyytinen, H., & Goswami, U. (2013). Assessing the Effectiveness of Two Theoretically Motivated Computer-assisted Reading Interventions in the UK: GG Rime and GG Phoneme. *Reading Research Quarterly*, 48(1), Article 1.
<https://doi.org/doi:10.1002/rrq.038>
- Lallier, M., Donnadieu, S., Berger, C., & Valdois, S. (2010). A case study of developmental phonological dyslexia: Is the attentional deficit in the perception of rapid stimuli sequences amodal? *Cortex*, 46(2), Article 2. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2009.03.014>
- Lang, E., & Villuendas, A. (2011). *Le phonème* [Computer software]. 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), Article 6. <https://doi.org/10.1080/10888438.2022.2052884>
- Launay, L., Maeder, C., Roustit, J., & Touzin, M. (2018). *Evaléo 6-15: Évaluation du langage écrit et du langage oral* [Computer software]. Orthoéditions.
- 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), Article 1. <https://doi.org/10.15761/NNS.1000118>
- Lecocq, P. (1998). *É.co.s.se: A test of syntaxico-semantic comprehension (manual and proofs): Two volumes*. Presses Univ. Septentrion.
- Leloup, G., Anders, R., Charlet, V., Eula-Fantozzi, B., Fossoud, C., & Cavalli, E. (2021). 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), Article 1. <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)*.
- Lobier, M. (2008). *Design of a software program for the rehabilitation of visuo-attentional span disorders* [Computer software].
- Lobrot, M. (1967). *ORLEC: battery to measure reading and spelling*. bureau d'études et de recherches.
- 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), Article 3. <https://doi.org/10.1086/499669>
- Maillart, C., Desmottes, L., Prigent, G., & Leroy, S. (2014). Réflexions autour des principes de rééducation proposés aux enfants dysphasiques. *ANAE - Approche Neuropsychologique des Apprentissages Chez L'enfant*, 131, Article 131.
- McGrath, L. M., Peterson, R. L., & Pennington, B. F. (2020). The Multiple Deficit Model: Progress, Problems, and Prospects. *Scientific Studies of Reading*, 24(1), Article 1. <https://doi.org/10.1080/10888438.2019.1706180>
- 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), Article 1. <https://doi.org/10.1002/rrq.256>
- Medina, F. (2010). *PhonopidoW: training software for phonological components and phonological buffer in working memory* [Computer software]. GNOSIA.
- 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), Article 4. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.11.003>
- 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), Article 1. <https://doi.org/10.1002/rrq.379>
- O'Brien, G., & Yeatman, J. D. (2021). Bridging sensory and language theories of dyslexia: Toward a multifactorial model. *Developmental Science*, 24(3), Article 3. <https://doi.org/10.1111/desc.13039>
- 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>

- 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), Article 3. <https://doi.org/10.1002/dys.1619>
- Pennington, B. F. (2006). From single to multiple deficit models of developmental disorders. *Cognition*, 101(2), Article 2. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.04.008>
- Perry, C., Zorzi, M., & Ziegler, J. C. (2019). Understanding Dyslexia Through Personalized Large-Scale Computational Models. *Psychological Science*, 30(3), Article 3. <https://doi.org/10.1177/0956797618823540>
- Piérart, B., & Grégoire, J. (2004). *Decode and understand: The reading closure test revisited. Belgian calibration of Lobrot's L3* (2). 39(2), Article 2.
- R Core Team. (2021). *R: A language and environment for statistical computing. Published online 2020.*
- Ramus, F., & Szenkovits, G. (2008). What Phonological Deficit? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61(1), Article 1. <https://doi.org/10.1080/17470210701508822>
- 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), Article 1. <https://doi.org/10.17011/ht/urn.201405281859>
- 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), Article 7023.
- 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), Article 3. <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), Article 10. <https://doi.org/10.1037/dev0000184>
- 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), Article 4.
- 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>
- Shaywitz, S. E., & Shaywitz, B. A. (2005). Dyslexia (Specific Reading Disability). *Biological Psychiatry*, 57(11), Article 11. <https://doi.org/10.1016/j.biopsych.2005.01.043>
- Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Piquard-Kipffer, A., Pourcin, L., & Leloup, G. (2018). *EVALEC: computerized diagnostic assessment battery for specific reading learning disabilities* [Computer software]. Happyneuron.
- Suggate, S. P. (2010). Why what we teach depends on when: Grade and reading intervention modality moderate effect size. *Developmental Psychology*, 46(6), Article 6. <https://doi.org/10.1037/a0020612>
- Valdois, S. (2022). The visual-attention span deficit in developmental dyslexia: Review of evidence for a visual-attention-based deficit. *Dyslexia*, 28(4), Article 4. <https://doi.org/10.1002/dys.1724>
- Valdois, S., Guinet, E., & Embs, J. L. (2014). *Evadys: Visuo-attentional span diagnostic tool* [Computer software]. Happy Neuron.
- 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), Article 3. <https://doi.org/10.1177/0022219420961332>
- 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), Article 4. <https://doi.org/10.1007/s10162-021-00793-4>

- 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>
- 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), Article 3. <https://doi.org/10.1007/s10648-015-9321-7>
- Wechsler, D. (2014). *Echelle d'intelligence de Wechsler pour enfants: Wisc V*. ECPA, les Editions du centre de psychologie appliquée.
- 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), Article 3. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2006.00483.x>
- 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), Article 0. <https://doi.org/10.1080/10494820.2022.2028855>
- 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), Article 3. <https://doi.org/10.1177/0963721420915873>
- Zoubrinetzky, R., Bielle, F., & Valdois, S. (2014). New Insights on Developmental Dyslexia Subtypes: Heterogeneity of Mixed Reading Profiles. *PLoS ONE*, *9*(6), Article 6. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099337>
- Zoubrinetzky, 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>