



HAL
open science

Dyslexie développementale et méthodes de remédiation (DDMR) : présentation d'une intervention multimodale illustrée par une étude de cas

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

► To cite this version:

Karine Louna Harrar-Eskinazi, Bruno de Cara, Gilles Leloup, Julie Nothelier, Hervé Caci, et al.. Dyslexie développementale et méthodes de remédiation (DDMR) : présentation d'une intervention multimodale illustrée par une étude de cas. *Rééducation orthophonique*, 2021, 288, pp.121-255. hal-03620883

HAL Id: hal-03620883

<https://amu.hal.science/hal-03620883v1>

Submitted on 27 Mar 2022

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

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

Dyslexie développementale et méthodes de remédiation (DDMR) : présentation d'une intervention multimodale illustrée par une étude de cas

Developmental Dyslexia and Remediation Methods (DDMR): Presentation of a multimodal intervention illustrated by a case study

Karine Harrar Eskinazi^{1,3}, Bruno De Cara¹, Gilles Leloup^{2,3}, Julie Nothelier⁴, Hervé Caci³, Johannes Ziegler⁴ & Sylvane Faure¹

Université Côte d'Azur, LAPCOS, Nice¹

Université Côte d'Azur, CoBtek, Nice²

Centre Hospitalier Universitaire, Nice-CHU-Lenval, Nice³

Aix-Marseille Université, CNRS, LPC, ILCB, Marseille⁴

karine.harrar@etu.univ-cotedazur.fr : orthophoniste, doctorante
bruno.de-cara@univ-cotedazur.fr : MCU
gileloup@gmail.com: orthophoniste, PhD
julie.nothelier@gmail.com : orthophoniste, ingénieure d'étude
caci.h@pediatrie-chulerval-nice.fr : pédopsychiatre, PhD
johannes.ziegler@univ-amu.fr : directeur de recherche
sylvane.faure@univ-cotedazur.fr : professeure

Résumé

Les études scientifiques interventionnelles de remédiation de la dyslexie développementale sont généralement fondées sur des hypothèses causales d'une altération plus ou moins exclusive des traitements phonologique, visuo-attentionnel ou de l'intégration intermodalitaire. Or, des études récentes montrent que la cause de la dyslexie développementale est multifactorielle et que la majorité des lecteurs dyslexiques (LD) présentent plusieurs déficits cognitifs sous-jacents. L'originalité de cette étude longitudinale multicentrique, randomisée et croisée, est de proposer un protocole de remédiation multimodale (DDMR) composé de trois interventions (phonologique, visuo-attentionnelle et intermodalitaire) dans un contexte clinique de soin. Ainsi, les entraînements sont adaptés au profil cognitif et au profil de lecture de chaque LD selon une prescription individuelle de soins fondée sur l'expertise clinique de l'orthophoniste. Cette étude menée auprès de 120 LD (âgés de 8 à 13 ans) se déroule en trois phases : une première phase « contrôle pré-intervention » pendant deux mois, une deuxième phase « intervention avec entraînement intensif » pendant six mois et une troisième phase « contrôle post-intervention » pendant deux mois. La deuxième phase est constituée des trois interventions possibles avec un contrebalancement de l'ordre des deux premières interventions (phonologique et visuo-attentionnelle) entre les deux groupes de participants (n=60 pour chaque groupe). La présentation d'un cas unique illustre le protocole de soin et montre une normalisation de l'âge de lecture qui se maintient après l'arrêt de l'intervention. Les résultats préliminaires de cette étude de groupe sont encourageants dans la perspective de valider une alternative thérapeutique curative fondée sur les preuves dans le traitement des dyslexies développementales.

Mots-clés : Dyslexie, intervention multimodale, essai clinique randomisé, expertise clinique, cas unique.

Abstract

Interventional scientific studies of remediation of developmental dyslexia are generally based on causal hypotheses of a more or less exclusive alteration of phonological, visual-attentional or cross-modal integration processing. However, recent studies show that the cause of developmental dyslexia is multifactorial and that the majority of dyslexic readers (DR) present several underlying cognitive deficits. The originality of this multicenter, randomized, longitudinal study is to propose a multimodal remediation protocol (DDMR) composed of three interventions (phonological, visual-attentional and cross-modal) in a clinical care setting. Thus, the training sessions are adapted to the cognitive and reading profile of each DR thanks to the clinical expertise of the speech therapist. This study conducted with 120 DRs (aged 8 to 13 years) takes place in three phases: a first "pre-intervention control" phase lasting two months, a second "intervention with intensive training" phase lasting six months and a third "post-intervention control" phase lasting two months. The second phase consists of the three possible interventions, and the order of the first two interventions (phonological and visual-attentional) is counterbalanced between the two groups of participants (n=60 for each group). A single case presentation illustrates the care protocol and shows a normalization of the reading age that is maintained after the intervention is stopped. The preliminary results of this group study are encouraging with the prospect of validating an evidence-based curative therapeutic alternative in the treatment of developmental dyslexia.

Keywords: Dyslexia, multimodal intervention, randomized clinical trial, clinical expertise, single case.

Introduction

Trois questions fondamentales gravitent autour du concept de dyslexie développementale : Est-ce une maladie ? Et si oui, peut-on la soigner ? Lorsque l'on débute une remédiation que doit-on dire au patient dyslexique ? « Je vais t'aider ou je vais te soigner ? » Les modes interventionnels compensatoires ou adaptatifs, comme les étayages visuels ou kinesthésiques d'aide à la lecture et à l'orthographe, donner un correcteur orthographique numérique ou adapter les conditions d'apprentissage, restent des réponses thérapeutiques à court terme mais ne traitent pas le trouble de la lecture. Les modes interventionnels curatifs traitent préférentiellement la ou les causes du trouble d'identification des mots écrits en intervenant sur les déficits cognitifs sous-jacents (DCSJ). Cependant, ce type d'intervention soulève de nombreuses questions. A quel modèle théorique se référer ? Quel programme thérapeutique proposer ? A quelle fréquence programmer l'intervention ? Comment mesurer les gains obtenus ? La dyslexie développementale est définie comme un trouble sévère et durable de l'apprentissage de la lecture 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. Après quatre décennies de publications scientifiques, de multiples théories explicatives ont orienté la recherche sur la dyslexie développementale dans un labyrinthe étiologique sans parvenir à expliquer totalement la variabilité des tableaux sémiologiques cliniques. Cependant, trois principales hypothèses théoriques -l'hypothèse phonologique, l'hypothèse visuelle et l'hypothèse intermodalitaire- ont permis d'identifier trois causes possibles de la dyslexie développementale et plusieurs DCSJ. Des déficits du traitement phonologique des sons, du traitement visuel des lettres et de l'intégration simultanée lettre-son seraient des causes cognitives et neurobiologiques possibles de la difficulté à établir et automatiser des associations graphèmes-phonèmes pour identifier les mots écrits (Serniclaes et al., 2015).

Les déficits de traitement de l'information phonologique altèrent la capacité d'identifier, de stocker, de récupérer ou de manipuler les phonèmes qui composent le mot (Ziegler et al., 2010). Ces déficits phonologiques peuvent s'expliquer de différentes façons, par un déficit fondamental du traitement perceptif auditif et/ou des déficits du déplacement temporel et spatial de l'attention auditive (Casini et al., 2018; Facoetti et al., 2009; Fostick & Revah, 2018; Goswami, 2011; Hari & Renvall, 2001; Lallier et al., 2010; Meyer & Schaadt, 2020; Serniclaes et al., 2015) et/ou par un déficit d'accès aux représentations phonologiques (Boets et al., 2013; Ramus & Szenkovits, 2008). Par exemple, si un déficit fondamental altère la perception catégorielle des sons de la parole, la persistance d'une perception allophonique des unités subphonémiques peut entraîner un déficit perceptif de catégorisation des phonèmes et par conséquent un déficit de traitement phonologique. Cette hypothèse est étayée par les résultats d'une étude interventionnelle qui montre des bénéfices sur les compétences en lecture après un entraînement auditif de la perception catégorielle avec le programme informatisé Rapdys© (Collet et al., 2017). Un déficit d'accès aux représentations phonologiques peut aussi altérer l'automatisation des associations graphèmes-phonèmes. Trois types de tâches évaluent cet accès aux représentations phonologiques : des tâches de conscience phonologique comme la segmentation phonémique, des tâches de mémoire à court-terme phonologique comme la répétition de pseudomots (Melby-Lervåg et al., 2012) et des tâches de dénomination sérielle rapide comme la dénomination rapide automatisée (DRA) de couleurs (Norton & Wolf, 2012; Wolf et al., 2000). 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 (Bus & van IJzendoorn, 1999; Ehri et al., 2001; Galuschka et al., 2014). Plus récemment, des bénéfices sur la vitesse de lecture ont été obtenus après un entraînement de la DRA sans association à un entraînement de lecture (Pecini et al., 2019; Vander Stappen & Reybroeck, 2018).

Les déficits de traitement de l'information visuelle chez le lecteur dyslexique (LD) altèrent la capacité d'identifier, de stocker, de récupérer ou de manipuler les graphèmes qui composent le mot. Ces déficits dans la modalité visuelle peuvent aussi s'expliquer de différentes façons, par des déficits perceptifs visuels (Lawton, 2019) et/ou des déficits du déplacement temporel et spatial de l'attention visuelle (Bertoni et al., 2019; Stein, 2019; Tulloch & Pammer, 2019; Vidyasagar, 2019). Un exemple de déficit visuo-attentionnel (VA) est le déséquilibre entre les niveaux d'analyse global et local d'une scène visuelle complexe. Un tel déficit peut altérer l'encodage des lettres, l'identification visuelle des mots irréguliers et la stabilisation des représentations orthographiques (Franceschini et al., 2017; Goldstein-Marcusohn et al., 2020; Keita et al., 2014). Un entraînement intensif avec le programme informatisé Switchipido© (Bedoin, 2017; Bedoin & Medina, 2013) montre des effets bénéfiques sur les compétences de focalisation de l'attention visuelle sur les niveaux d'analyse global ou local et une amélioration de la lecture de mots réguliers et irréguliers. Un autre exemple de déficit VA est la réduction de l'empan VA, décrit comme un

déficit de traitement simultané de l'attention visuelle (Valdois et al., 2019). La réduction de l'empan VA, c'est-à-dire du nombre de lettres traitées simultanément lors d'une fixation oculaire, peut perturber l'identification des lettres et par conséquent l'identification des mots écrits (Valdois et al., 2004). Un entraînement intensif avec le programme informatisé Maeva© (Lobier, 2008) augmente l'empan VA et améliore également les compétences de conscience phonémique et de lecture de mots irréguliers (Zoubrinetzky et al., 2019).

La troisième hypothèse causale du déficit de l'association graphème-phonème propose un déficit de traitement intermodalitaire de l'information audio-visuelle, dans le sens d'un défaut d'intégration simultanée des lettres et des sons en tant qu'objet audio-visuel unique (Blomert, 2011; Blomert & Willems, 2010). Le programme d'entraînement informatisé Graphogame© (Richardson & Lyytinen, 2014) a été développé en Finlande, puis adapté en français (Lassault & Ziegler, 2018) et dans d'autres langues (Brem et al., 2010; Kyle et al., 2013; Ruiz et al., 2017; Saine et al., 2010, 2011). Ce programme permet une présentation audio-visuelle simultanée et répétée de lettres, syllabes, mots et phrases dans une interface ludique avec l'objectif de permettre l'automatisation des associations phonologiques et orthographiques (Lassault et al., 2020). Une récente revue montre ses effets positifs sur les compétences en lecture dans certaines conditions d'apprentissage (McTigue et al., 2020).

Afin d'expliquer la variabilité des tableaux sémiologiques cliniques de la dyslexie développementale, les publications scientifiques s'orientent actuellement vers un concept de « modèle de déficit multifactoriel » (Menghini et al., 2010; Pennington, 2006; van Bergen et al., 2014) en accord avec une hypothèse causale plurifactorielle (Peters et al., 2019; Zoubrinetzky et al., 2014), impliquant plusieurs DCSJ. Cette hypothèse est sous-tendue par le dysfonctionnement d'un vaste circuit de réseaux neuronaux interconnectés (Kershner, 2016). Cette origine multifactorielle de la dyslexie développementale est décrite à un niveau neurobiologique (Paulesu et al., 2014; Pennington, 2006), cognitif (Ramus & Ahissar, 2012; Ramus & Szenkovits, 2008; Ziegler et al., 2008, 2020), comportemental (Haft et al., 2016; McArthur et al., 2020) et environnemental (Fluss et al., 2009). Or, dans les classifications actuelles telles que le *Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux* (DSM-5) et la *Classification Internationale des Maladies* (CIM 10), la dyslexie développementale est définie essentiellement comme un trouble cognitif spécifique du langage écrit (Guelfi & Crocq, 2015; World Health Organization, 2015). Ces définitions, basées sur les troubles comportementaux de la lecture et de l'orthographe, ne tiennent pas compte des DCSJ pour établir un diagnostic. De plus, les manifestations comportementales pathologiques en lecture et les DCSJ varient pour chaque LD et évoluent différemment avec l'âge et la nature des interventions thérapeutiques. Ainsi, la multimodalité étiologique entraîne également une multimodalité sémiologique s'exprimant dans une variabilité clinique souvent très complexe.

Notre étude, basée sur l'origine multifactorielle de la dyslexie développementale, a pour objectif de développer un protocole de soin adapté à la clinique en associant les trois hypothèses phonologiques, visuelles et audio-visuelles afin de tenter de diminuer les troubles de l'apprentissage de la lecture et de l'orthographe. Nous avons, pour cela, respecté cinq critères combinant les exigences théoriques et cliniques : (1) disposer d'outils d'évaluation et d'intervention à la fois validés scientifiquement, disponibles en clinique et expérimentés en français, (2) adopter une pratique clinique soutenue par des entraînements intensifs à domicile, (3) utiliser des programmes numériques afin d'adapter plus précisément les interventions au profil cognitif et à la progression de chaque LD et favoriser l'autonomie, la motivation et l'attention (De Cara & Plaza, 2010; Harrar Eskinazi et al., 2019), (4) associer systématiquement un entraînement des processus cognitifs sous-jacents avec un entraînement des processus de lecture, (5) concevoir une méthode remédiate multimodale qui tiendrait compte du profil sémiologique de chaque LD selon ses compétences cognitives sous-jacentes phonologiques, visuo-attentionnelles et selon son niveau de lecture et d'orthographe.

Ce protocole de remédiation multimodale de la dyslexie développementale (DDMR) a été mis en œuvre au sein d'une étude longitudinale multicentrique, randomisée et croisée afin d'évaluer son impact sur les compétences en lecture (Harrar Eskinazi et al., soumis pour publication). Comme l'essai clinique est toujours en cours, les résultats complets de l'étude de groupe ne sont pas disponibles. L'objectif est, ici, de présenter ce protocole de remédiation multimodale (DDMR) aux professionnels de santé et plus particulièrement aux orthophonistes à travers une étude de cas clinique.

Méthode

Participants

Cent quarante-trois LD, âgés entre 8 ans et 13 ans, ont été inclus dans l'étude par 94 orthophonistes exerçant en libéral dans différentes villes de France. Les critères d'exclusion et d'inclusion des participants répondent aux critères du DSM-5. 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 en accord avec le modèle « Simple Vue de Lecture » (Gough & Tunmer, 1986) ne sont pas inclus. Le diagnostic d'un trouble spécifique neuro-développemental de la lecture doit être confirmé par des performances (en vitesse ou en précision) inférieures ou égales à $-1,5$ écart-type par rapport à la moyenne en âge chronologique aux tests leximétriques Alouette-R© (Lefavrais, 1967, 2005) et/ou Evalec Primaire-Collège© (Sprenger-Charolles et al., 2018) ou des performances inférieures ou égales au centile 7 aux tests leximétriques Mouette, Pinguoin ou Eval2M, Evaléo 6-15© (Launay et al., 2018). Les critères d'inclusion impliquent aussi des performances (en vitesse et/ou en précision) inférieures ou égales à $-1,5$ écart-type par rapport à la moyenne en âge chronologique aux épreuves d'analyse phonémique ou de répétition de pseudomots ou de dénomination rapide automatisée de la Batterie Evalec-Primaire et Collège (Sprenger-Charolles et al., 2018) ; des performances en précision inférieures ou égales à $-1,5$ écart-type par rapport à la moyenne en âge chronologique aux épreuves de report global ou de report partiel du test Evadys© (Valdois et al., 2017) ou des performances (en vitesse et/ou en précision) inférieures ou égales à $-1,5$ écart-type par rapport à la moyenne en âge chronologique aux épreuves de focalisation attentionnelle du test Sigl© (Bedoin & Medina, 2014). Le foyer des parents doit être équipé d'une installation informatique connectée à Internet pour les entraînements quotidiens. Les consentements éclairés des deux parents ou du représentant légal pour l'autorité parentale sont recueillis. Une information orale et écrite (notice d'information et diaporama) est donnée aux parents et à l'enfant. L'ensemble de ces épreuves d'évaluation initiale est réalisé avec l'orthophoniste qui a inclus l'enfant ou l'adolescent dans l'étude.

Procédure expérimentale

Cet essai clinique propose donc trois programmes d'intervention : phonologique (PHO), visuo-attentionnelle (VA) et intermodalitaire (IM). Chacun est composé de plusieurs entraînements qui associent systématiquement un entraînement des processus cognitifs sous-jacents et un entraînement des processus d'identification des mots écrits. Pour chaque LD, les modalités des entraînements sont déterminées par l'orthophoniste selon les performances obtenues aux épreuves initiales évaluant les compétences phonologiques et visuo-attentionnelles ainsi qu'aux épreuves initiales évaluant les compétences en lecture et en orthographe (cf. Figure 1).

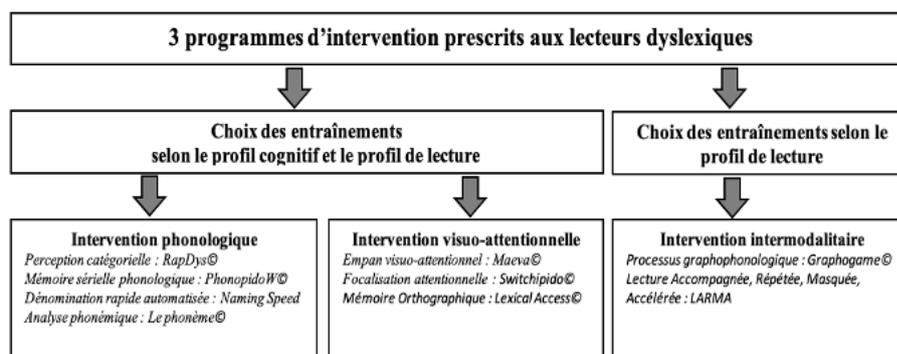


Figure 1. Prescription de soin selon le profil cognitif et le profil de lecture de chaque enfant

Individualisés, systématiques et intensifs, les entraînements sont fondés sur les preuves selon les principes externes (références scientifiques) et internes (expertise de l'orthophoniste et du patient) de l'*Evidence Based Practice* (Sackett et al., 1996). Si la prescription d'un entraînement au sein d'une intervention est individuelle et choisie en fonction du profil cognitif et du profil de lecture, tous les LD reçoivent les trois programmes d'intervention. L'expérimentation se déroule en trois phases sur une période de 16 mois (cf. Figure 2).

Lors de la phase 1 « contrôle pré-intervention », la première évaluation (test 1) est effectuée pour sélectionner et inclure les participants. Un processus de randomisation selon une procédure d'attribution

1/1 répartit les 120 LD en deux groupes, Gr 1 et Gr 2 (n=60 pour chaque groupe). Pendant 8 semaines, tous les LD bénéficient d'une séance hebdomadaire de 30 min avec l'orthophoniste qui a inclus son patient. Aucun entraînement intensif à domicile n'est donné. Selon l'expertise de l'orthophoniste, des activités de lecture et d'orthographe sont effectuées et adaptées aux compétences du LD. A l'issue de la phase 1, le test 2 est effectué.

Lors de la phase 2 « intervention avec entraînement intensif », le LD effectue les trois programmes d'intervention intensive PHO, VA, et IM. Chacun propose différents entraînements effectués 5 jours/semaine, 15 min/jour pendant 8 semaines à domicile, suivis d'une pause de 15 jours sans entraînement. L'ordre des deux premières interventions (PHO et VA) est inversé dans les deux groupes de 60 LD. Le groupe 1 commence par l'intervention PHO et le groupe 2 par l'intervention VA (cf. Figure 2). La séance hebdomadaire avec l'orthophoniste est maintenue, dont une partie est consacrée à vérifier que les instructions d'entraînement à domicile sont bien comprises et appliquées, et l'autre partie à effectuer des activités de lecture et d'orthographe adaptées aux compétences du LD. A la fin de chaque programme d'intervention, l'orthophoniste effectue les tests 3, 4 et 5. De plus, au sein de chaque intervention, l'évaluation est complétée par des lignes de base (LDB) spécifiques à chaque entraînement. Ainsi, chaque entraînement est personnalisé selon les performances PHO et VA et selon le niveau de lecture et d'orthographe relevés lors du test 1 et des LDB.

Lors de la phase 3 « contrôle post-intervention », identique à la phase 1 (une séance hebdomadaire de 30 minutes pendant 8 semaines), le test 6 clôture la procédure expérimentale. Cette dernière phase permet de tester l'objectif principal de cette étude qui est de déterminer si « l'intervention avec entraînement intensif » (phase 2) améliore les compétences en lecture par rapport à la phase 1 « contrôle pré-intervention » et si les gains se maintiennent deux mois après l'arrêt des entraînements intensifs (phase 3, test 6). Les objectifs secondaires sont d'évaluer l'impact : d'une intervention PHO versus une intervention VA sur les compétences en lecture, de l'ordre des entraînements sur les compétences en lecture, d'une intervention multimodale intensive sur les compétences en orthographe et en compréhension écrite, d'une intervention multimodale intensive sur l'appétence à lire et l'estime de soi.

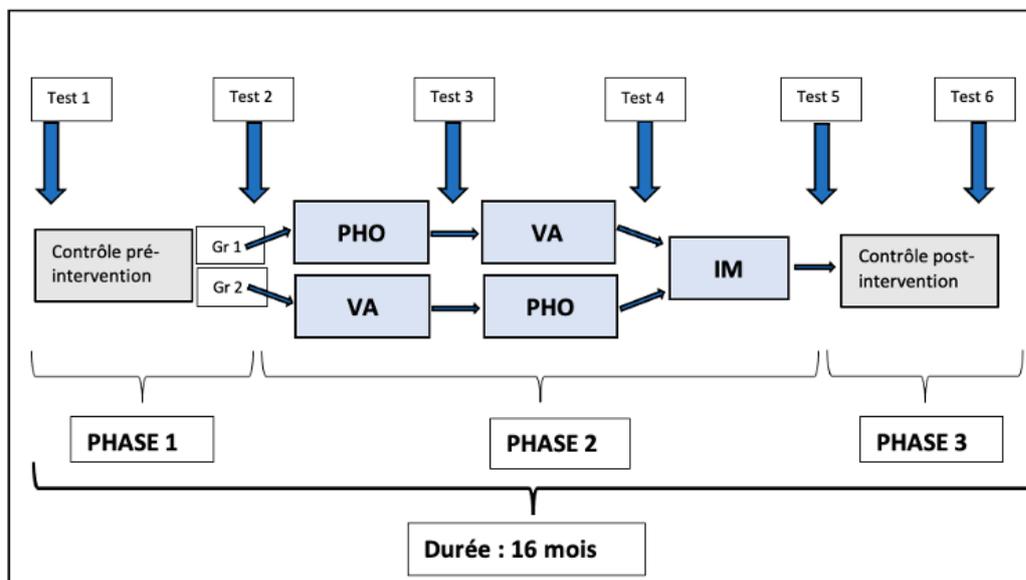


Figure 2. Procédure expérimentale (PHO : intervention PHOnologique ; VA : intervention Visuo-Attentionnelle ; IM : intervention InterModalitaire)

1. Évaluation : du test 1 au test 6

L'efficacité en lecture est évaluée par le texte non significatif *L'Alouette-R*© (Lefavrais, 1967, 2005), « gold standard » des épreuves de leximétrie (Cavalli et al., 2018), par deux tests significatifs *La Mouette* et *Le Pingouin*, (Evaléo 6-15© : Launay et al., 2018), et par un test de lecture de mots en colonnes *Eval2M* (Evaléo 6-15©). Les procédures d'identification sont plus spécifiquement déterminées par des épreuves de lecture de mots réguliers, irréguliers et de pseudomots (*Evalec Primaire-Collège*© : Sprenger-Charolles et al., 2018) qui mesurent les temps d'identification des mots correctement lus par une détection vocale. 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) sont également évaluées. Toutes les performances sont relevées en temps et en précision, excepté pour le test d'orthographe dont les performances sont relevées uniquement en précision.

Les épreuves évaluant les processus cognitifs sont informatisées. Les processus phonologiques sont évalués par le logiciel *Evalec Primaire-Collège*© avec des épreuves de répétition 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 (DRA). Les processus VA sont évalués par le logiciel *Evadys*© (Valdois et al., 2017) 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.

L'évaluation de la mémoire immédiate et de travail verbale utilise la répétition de chiffres à l'endroit et à rebours (*Evaléo 6-15*©), et celle de la mémoire immédiate et de travail visuo-spatiale une séquence de mouvements de pointage de différents cubes ou *blocs de Corsi*, à l'endroit et à rebours (Fournier & Albaret, 2013). Deux questionnaires de type échelle de Likert, proposés avant et après les entraînements aux parents et à l'enfant, évaluent la perception de l'impact du trouble de la lecture sur l'appétence à lire, sur l'estime de soi et l'estime de soi scolaire (Fiassa & Nader-Grosbois, 2016). Enfin, si les compétences linguistiques orales n'ont pas été préalablement évaluées, les compétences lexicales -*Dénomination Lexique* et *Désignation d'images* (*Evaléo 6-15*©) - et la compréhension orale morphosyntaxique - *l'E.CO.S.SE*© (Lecocq, 1998) - sont mesurées. De même, si le LD n'a pas bénéficié d'une évaluation de son efficacité intellectuelle, l'épreuve des *Matrices* non verbale du Wisc-5 (Wechsler, 2014) est effectuée afin de relever un indice de l'intelligence fluide et visuo-spatiale.

Compte tenu de la répétition des mesures leximétriques, relevées du test 1 au test 6, un effet test / retest est attendu (McArthur, 2007). Pour contrôler un éventuel effet retest de L'Alouette-R©, l'épreuve Delta Text (Bedoin, 2017) composée de quatre textes non-signifiants (équilibrés en longueur, en fréquence lexicale et en complexité syllabique et phonémique) est proposée en même temps que le test de L'Alouette-R©. L'évaluation de la lecture d'un texte signifiant est contrôlée par la passation alternée des deux textes (la Mouette et le Pingouin) inclus dans la batterie *Evaléo 6-15*©. De même, l'évaluation de l'orthographe est contrôlée par la passation alternée de deux versions de dictées (A et B) incluses dans le test *Chronosdictées*.

2. Évaluation : LDB pré et post-entraînements

Les entraînements effectués au sein de chaque intervention PHO, VA et IM sont prescrits individuellement selon les performances aux épreuves du test 1 et des LDB précédant chaque entraînement. Selon les principes de *L'Evidence Based Practice*, 4 LDB effectuées avant et après chaque entraînement, évaluent les items entraînés, les items non entraînés, la généralisation en lecture ou en orthographe et les items neutres non spécifiques à l'entraînement. Adaptées à chaque déficit et construites en fonction de la zone proximale de développement du LD, ces LDB permettent de mesurer les effets des différents entraînements prescrits au sein de chaque intervention PHO, VA et IM.

3. Description des entraînements au sein des interventions PHO, VA, IM

Chacune des trois interventions se compose de plusieurs entraînements. Chaque entraînement associe l'entraînement informatisé d'un processus cognitif PHO, VA ou IM pendant 10 minutes et un entraînement de lecture et/ou d'orthographe pendant 5 minutes. 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.

3.1 Intervention phonologique

Les processus PHO sont entraînés selon le relevé des performances faites en phase 1 par le test *Evalec Primaire-Collège*© (phonologie) et selon l'évaluation proposée par le logiciel *RapDys*© lors de la passation des LDB pré-entraînement. Quatre processus PHO peuvent être entraînés: la perception catégorielle par le logiciel *RapDys*© (Collet et al., 2017), la mémoire sérielle phonologique par le logiciel *PhonopidoW*© (Medina, 2010), la DRA par le logiciel *Naming Speed*© (Harrar Eskinazi et al., 2020) et l'analyse phonémique par le programme *Le Phonème*© (Lang & Villuendas, 2011). Les logiciels *RapDys*©, *PhonopidoW*© et *Naming Speed*© s'effectuent 5 jours/semaine, 10 min/jour et sont associés au programme

Le Phonème© 5 minutes, 5 jours/semaine, 5/min/jour. Ainsi, l'entraînement des compétences phonologiques varie selon la nature et l'intensité des troubles de chaque LD. Par exemple, pour un LD ne présentant pas de déficit de la mémoire sérielle phonologique, la perception catégorielle et la fusion de phonèmes sont entraînés le premier mois alors que la DRA et la segmentation de mots en phonèmes sont entraînés le deuxième mois.

L'entraînement de la perception catégorielle avec le logiciel *RapDys*© (Collet et al., 2017) permet de catégoriser les phonèmes selon la différence de voisement entre les consonnes /t/ et /d/. Le déficit de la perception catégorielle est lié à une perception des variantes intra-catégorielles du même phonème (par exemple à la différence entre deux variantes de /d/), due à une sensibilité accrue aux caractéristiques allophoniques (ou subphonémiques). Cette 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, le logiciel *RapDys*© permet de réduire la distance acoustique entre deux phonèmes autour de la frontière phonémique de voisement et permet ainsi une catégorisation des phonèmes.

L'entraînement de la mémoire sérielle phonologique avec le logiciel *PhonopidoW*© (Medina, 2010) est proposé si le score au subtest de répétition de pseudomots de la batterie *Evalec Primaire-Collège*© indique des performances déficitaires. Les exercices permettent de discriminer un son parmi une séquence de plusieurs sons, de comparer ou de composer des séquences de sons. La proximité phonologique entre les sons et la charge en mémoire phonologique sont paramétrables.

L'entraînement de la DRA est proposé si les performances au subtest *Dénomination sérielle rapide* de la batterie *Evalec Primaire-Collège*© sont déficitaires. Le programme numérique *Naming Speed*© (Harrar Eskinazi et al., 2020), inspiré du programme 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 (cf. Figure 3). 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 (e.g. d/r/a/g/ɔ̃ : dragon) et de de segmentation (i.g. jardin : /j/a/r/d/ɛ) avec des listes de mots et/ou de pseudomots (*Le Phonème*© ; (Lang & Villuendas, 2011) qui sont ensuite lus à voix haute et écrits manuellement par le participant.

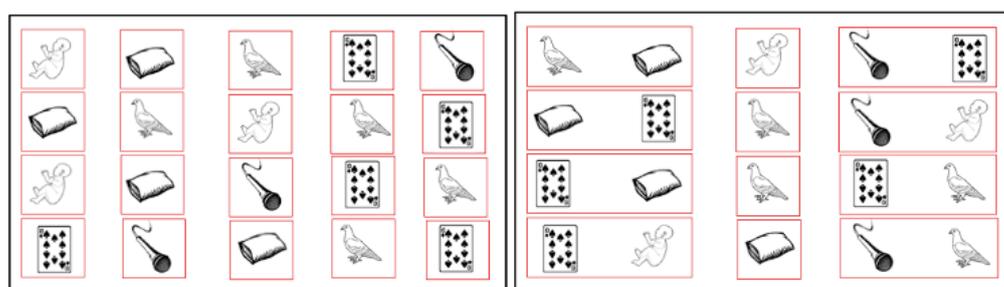


Figure 3. Exemples d'items à dénommer rapidement sur le programme *Naming Speed*©

3.2 Intervention visuo-attentionnelle

Selon le relevé des performances faites en phase 1 par les tests *Evadys*© et *Sigl*©, les compétences VA sont entraînées avec les programmes informatisés *Maeva*© (Lobier, 2008) et *Switchipido*© (Bedoin & Medina, 2013), à une fréquence de 5 jours/semaine, 10 min/jour. Le logiciel *Maeva*© présente brièvement (420 à 120 ms) à l'écran une séquence de deux à sept stimuli visuels comprenant des lettres, des pseudolettres, des chiffres, des formes géométriques ou des caractères japonais. A sa disparition, l'enfant doit réaliser une tâche de catégorisation selon six consignes différentes de difficulté croissante (i.g. Figure 4). Un algorithme qui prend en compte les réponses de l'enfant, permet d'adapter en temps réel la difficulté de l'exercice. 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 (i.g. Figure 5).

Ces deux programmes d'entraînement sont systématiquement associés au programme informatisé de mémoire orthographique *LexicalAccess*© (Lebel et al., 2018), à la fréquence de 5 jours/semaine, 5 min/jour. Ce programme repose sur le principe d'un processus mnésique d'encodage/stockage/récupération et consiste en une lecture « flash » de 10 à 20 mots dont la signification est préalablement contrôlée. A la suite de la lecture, les mêmes mots présentés dans le même ordre en temps limité, sont copiés. A la fin de la copie, l'enfant est invité à rappeler par écrit les mots dont il se souvient. 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 logiciels *Maeva*© et *Switchipido*©.

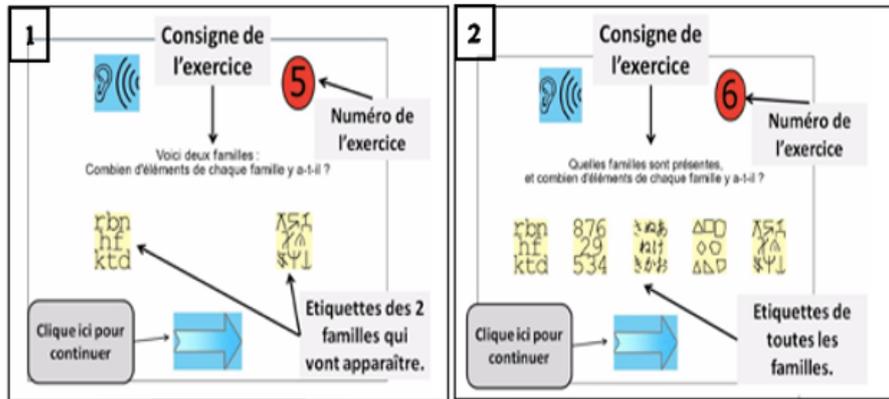


Figure 4. *Maeva*, deux exemples de catégorisation (1) avec deux familles de stimuli (2) avec toutes les familles de stimuli (Zoubrinetzky et al., 2019)

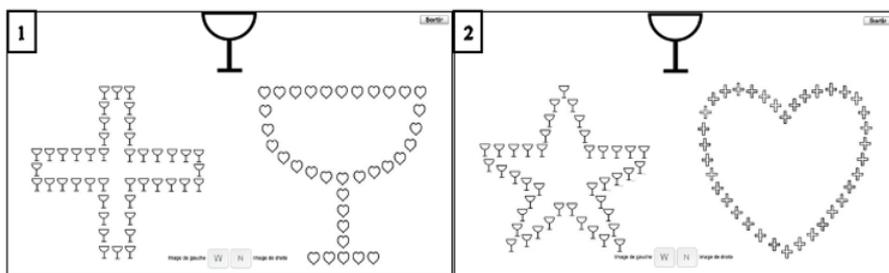


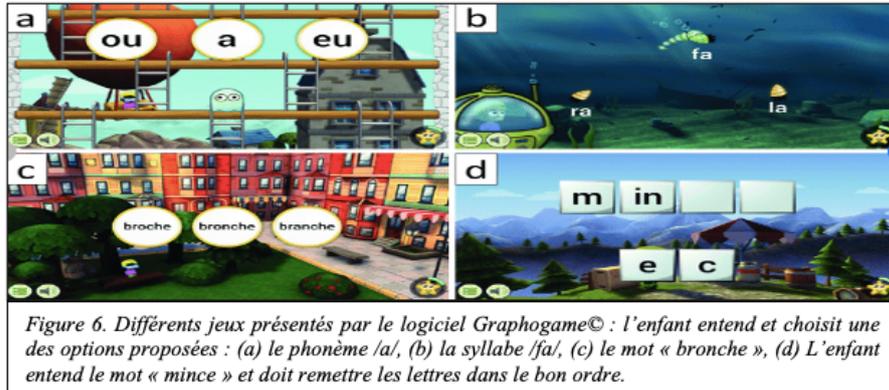
Figure 5. *Switchipido*, (1) focalisation au niveau global : « appairer un stimulus simple avec un des deux dessins hiérarchisés identique au niveau global. » (2) bascule de la focalisation entre le niveau local et le niveau global : « appairer un stimulus simple avec un des deux dessins hiérarchisés identique soit au niveau local, soit au niveau global. » (Bedoin, 2017)

3.3 Intervention intermodalaire

L'entraînement des processus intermodaux (IM) avec le logiciel *Graphogame*© (Richardson & Lyytinen, 2014) est proposé à tous les LD pendant deux mois (10 min/jour) afin de réduire le déficit spécifique de liaison intermodale (i.e audio-visuel) entre les lettres et les sons, ceci afin 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, soit auditive, soit visuelle, d'unités linguistiques ou non linguistiques. En revanche, *Graphogame*© est un entraînement audio-visuel présentant simultanément des stimuli auditifs et des stimuli 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 du LD. Le principe est d'associer un stimulus oral avec un stimulus écrit (e.g Figure 6). L'enfant doit recommencer la série d'items jusqu'à ce que le critère de réussite fixé à 85 % soit atteint.

L'entraînement avec *Graphogame*© est associé à un entraînement de la fluence en lecture (5 minutes, 5 jours/semaine) avec le programme *LARMA* (Lecture Accompagnée, Répétée, Masquée, Accélérée). Ce programme vise à améliorer la fluidité de lecture et l'appétence à lire et s'inspire des programmes de lecture accélérée et masquée (Breznitz, 1997) et de lecture répétée et masquée (Leloup et al., 2021). Le LD choisit un livre « papier » adapté à son niveau de lecture pour lire chaque jour un texte à voix haute en suivant 6 étapes. (1) Lecture du texte pendant 2 minutes par le LD. Le parent relève le nombre d'erreurs. (2) Lecture

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



Résultats

Afin d'illustrer ce protocole de remédiation, nous présentons les performances obtenues par une des participantes. Angélique est âgée de 10 ans 2 mois lorsqu'elle effectue le test 1. Scolarisée au CM2, sa plainte concerne des troubles du langage écrit qui se manifestent par des confusions de lettres et de mots en lecture et en orthographe depuis le cours préparatoire et persistent malgré une intervention thérapeutique orthophonique pendant 3 ans. La grossesse, l'accouchement, le développement langagier et moteur se sont déroulés normalement. Les habiletés motrices globales et fines, les habiletés constructives, les compétences linguistiques et les capacités attentionnelles ne sont pas altérées. Aucune difficulté n'a été signalée en maternelle. Les apprentissages scolaires sont ralentis et difficiles. Les consignes écrites ne sont pas comprises à cause d'un déficit d'identification des mots écrits qui augmente également le temps consacré aux devoirs à la maison (2 heures tous les soirs). Les devoirs sur table ne sont pas terminés. Scolarisée dans une école bilingue Français/Anglais, Angélique parle également Italien, langue maternelle de sa maman. Sa langue natale est le Français et aucun retard de développement du langage oral en Français ou Italien n'est signalé. Le bilan neuropsychologique (WPPSI-R), effectué à l'âge de 6 ans, relève un raisonnement fluide (135) et une compréhension verbale (114) supérieurs à la moyenne d'âge alors que les compétences visuo-spatiales et la vitesse de traitement se situent dans la moyenne. Le bilan orthoptique ne relève pas de déficits. Très calme et réservée, Angélique dispose de qualités relationnelles lui permettant d'entretenir de bonnes interactions sociales avec son entourage. Fille unique, elle vit seule avec sa mère (niveau d'études Bac +5), semble très autonome et fait preuve d'une grande maturité pour son âge. Sa participation aux premières évaluations, son implication et sa motivation permettent de faire un pronostic favorable quant à l'évolution de son trouble de la lecture.

1. Phase 1 « contrôle pré-intervention », évaluations tests 1 et 2

Les scores aux tests 1 et 2 de la phase 1 sont résumés dans les tableaux 1, 2 et 3. Le trouble d'identification du mot écrit est confirmé par un décalage de 25 mois entre l'âge chronologique et l'âge de lecture lors de la lecture à voix haute d'un texte non signifiant (*L'Alouette*) et par un décalage de deux années scolaires (niveau CE2) lors de la lecture d'un texte signifiant (*Mouette au test 1 et Pingouin au test 2*). Une dysorthographe phonétique, lexicale et grammaticale ainsi qu'une altération des deux procédures de lecture (lecture de mots irréguliers et de pseudomots), plus marquée pour la procédure lexicale, caractérisent également cette dyslexie développementale. Comme attendu, la compréhension orale et écrite, le vocabulaire passif, la mémoire verbale et visuo-spatiale ne sont pas altérés. Un trouble de l'évocation orale est confirmé par des scores pathologiques à la tâche évaluant le lexique en dénomination, probablement en lien avec le bilinguisme et/ou le déficit d'accès aux représentations phonologiques. Les

DCSJ phonologiques concernent l'analyse phonologique, l'empan phonologique et la DRA. Les DCSJ visuo-attentionnels concernent l'empan VA en report global et l'interférence issue du global et du local. A l'issue de l'inclusion dans l'étude, Angélique est randomisée dans le groupe 2 donc commence le protocole de soin par l'intervention VA.

| Tâches et unités de mesure | TEST 1 Scores (ET ou centiles) | TEST 2 Scores (ET ou centiles) |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Alouette, NE | 24 (-2) | 23 (-1,9) |
| Alouette, MCL | 183 (-1,1) | 186 (-1) |
| Alouette, temps en sec | 180 (-0,9) | 180 (-0,9) |
| Alouette, score efficacité CTL | 183 (-1) | 186 (-1) |
| Age de lecture en mois (niveau scolaire) | 97 (Août CE1) | 97 (Août CE1) |
| DeltaText, MCL | 172 | 182 |
| DeltaText temps en sec | 180 | 180 |
| DeltaText, score efficacité CTL | 172 | 182 |
| Mouette/Pingouin, MCL en 2 min | 166 (centiles 7 à 20) | 157 (centiles < 7) |
| Eval2M, MCL en 2 min | 135 (centiles 21 à 38) | 129 (centiles 7 à 20) |
| Orlec L3, % d'items réussis | 55 (-0,6) | 69 (+0,2) |
| Chronodictées A/B, NE | 29 (-2) | 35 (-5) |
| Mots réguliers, % d'erreurs | 8,33 (-2) | 2,78 (-0,3) |
| Mots réguliers, temps en ms | 826 (-0,8) | 778 (-0,4) |
| Mots irréguliers, % d'erreurs | 33,33 (-11,3) | 33,33 (-11,3) |
| Mots irréguliers, temps en ms | 834 (-0,2) | 625 (+0,6) |
| Pseudomots, % d'erreurs | 25,71 (-1,5) | 34,29 (-2) |
| Pseudomots, temps en ms | 1062 (-0,4) | 977 (0) |
| Questionnaire enfant score total | 42 | 44 |
| Questionnaire parent score total | 40 | 45 |

Tableau 1 : résultats aux tests évaluant la lecture, l'orthographe et l'impact du trouble (ET : écart types, NE : nombre d'erreurs, MCL : mots corrects lus, CTL : (MCL/temps de lecture) x180

| Tâches et unités de mesure | TEST 1 Score (ET ou centiles) | TEST 2 Scores (ET ou centiles) |
|---------------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Suppression syllabe, % d'erreurs | 20 (-0,9) | 30 (-1,7) |
| Suppression syllabe, temps en sec | 33,35 (0) | 17,16 (+2) |
| Suppression phonème CVC, % d'erreurs | 25 (-2,3) | 0 (+0,4) |
| Suppression phonème CVC, temps en sec | 34,03 (-0,5) | 20,15 (+1) |
| Suppression phonème CCV, % d'erreurs | 36,36 (-1) | 36,36 (-1) |
| Suppression phonème CCV, temps en sec | 36,60 (0) | 54,55 (-1,9) |
| Empan phonologique | 3 (-1,92) | 4 (-0,8) |
| DRA % d'erreurs | 1,85 (-2,7) | 5,56 (-7,2) |
| DRA temps en sec | 38,72 (-0,5) | 35,5 (0) |
| Seuil de lettre / 150 ms | 84 (-2,6) | 84 (-2,6) |
| EVA en report global / 5 | 3,7 (-1,5) | 3,7 (-1,5) |
| EVA en report partiel / 5 | 4,6 (+0,5) | 4,3 (0) |
| Interférence issue du local TR en ms | -44,93 (-1,75) | -74,61(-2,37) |
| Interférence issue du global TR en ms | -27,19 (-0,72) | -22,31 (-1,41) |
| Asymétrie de l'interférence TR en ms | 17,73 (-0,25) | 52,30 (+0,15) |
| Interférence issue du local TE en % | 11 (+1,65) | 4 (+0,42) |
| Interférence issue du global TE en % | -1 (-0,8) | 3 (-0,29) |
| Asymétrie de l'interférence TE en % | -12 (-1,76) | -1 (-0,52) |
| Empan de chiffres endroit | 4 (centiles 7 à 20) | 4 (centiles 7 à 20) |
| Empan de chiffres envers | 3 (centiles 21 à 38) | 4 (centiles 39 à 62) |
| Empan visuo-spatial endroit | 6 (+0,7) | 6 (+0,7) |
| Empan visuo-spatial envers | 5 (0) | 5 (0) |

Tableau 2 : résultats aux tests évaluant les processus cognitifs sous-jacents phonologiques et visuo-attentionnels (ET : écart-types, CVC : consonne-voyelle-consonne, CCV : consonne-consonne-voyelle, DRA : dénomination rapide automatisée, EVA : empan visuo-attentionnel, TR : temps de réponse, TE : taux d'erreurs

| Tâches et unités de mesure | TEST 1 Score (centiles ou note standard) |
|--|---|
| Compréhension syntaxique orale, NE | 3 (centile 75) |
| Vocabulaire désignation, IC/168 | 157 (centiles 39 à 62) |
| Vocabulaire dénomination, IC/100 | 58 (centiles < 7) |
| Vocabulaire dénomination, temps en sec | 374 (centiles < 7) |
| Matrices, IC/32 (note standard/10) | 16 (note standard 9) |

Tableau 3 : phase 1, tests 1 et 2, scores aux tests de langage oral et de raisonnement fluide (NE : nombre d'erreurs, IC : items réussis)

2. Phase 2, « intervention VA », test 3

L'objectif de la première intervention est de rétablir les DCSJ VA relevés au test 1. Le premier mois, le logiciel *Maeva*© et le deuxième mois, le logiciel *Switchipido*© sont associés à un entraînement de la mémoire orthographique avec le programme *Lexical Access*©. Afin de mesurer l'impact des entraînements, des LDB sont effectuées avant et après chaque intervention (cf. Tableau 4). L'analyse statistique des scores obtenus avant et après l'intervention VA est réalisée par le calcul du Tau-U corrigé (Parker et al., 2011). Cette méthode d'analyse permet d'évaluer la taille de l'effet en contrôlant la pente de la baseline et de calculer une moyenne pondérée de la taille de l'effet global de l'intervention (Tarlow, 2017). Après 2 mois d'entraînement, les moyennes pondérées des contrastes analysés montrent une taille de l'effet très significative ($\tau = 0,8$; $p = 10^{-5}$) pour les items spécifiques à l'intervention VA (LDB1, *Maeva*©, *Switchipido*©), non significative ($\tau = 0,2$; $p = .4268$) pour les items spécifiques non entraînés (LDB2, empan global de chiffres), non significative ($\tau = 0,4$; $p = .08$) pour les items pour lesquels est attendue une généralisation (LDB3, lecture de mots irréguliers) et non significative ($\tau = 0,21$; $p = .3693$) pour les items neutres non spécifiques pour lesquels une amélioration n'est pas attendue (LDB4, fluidité dessin).

Au-delà des lignes de base, nous effectuons le test 3 pour ré-évaluer les compétences en lecture et l'efficacité des processus cognitifs sous-jacents tels qu'ils avaient déjà été évalués aux test 1 et 2 (cf. Tableau 5). L'intervalle entre le test 2 et 3 correspond à la phase d'entraînement intensif des processus cognitifs sous-jacents VA et de la mémoire orthographique pendant 2 mois. L'âge de lecture augmente de 25 mois (*L'Alouette*) et cette progression est mise en évidence dans tous les scores d'efficacité en lecture (*DeltaText 3*, *Mouette au test 3*, *Eval2M*). Comme attendu, après l'entraînement VA, les processus cognitifs sous-jacents phonologiques altérés au test 1 et 2 restent altérés au test 3 (DRA, suppression de syllabe et phonème, empan phonologique). Les processus cognitifs sous-jacents VA altérés aux tests 1 et 2 et ciblés spécifiquement par l'entraînement cognitif, s'améliorent au test 3. L'empan VA se normalise en report global et augmente en report partiel. Le seuil de lettres n'est plus altéré. L'interférence issue du local s'est améliorée.

| PHASE 2 : ENTRAÎNEMENT VISUO-ATTENTIONNEL (durée : 8 semaines) | | |
|--|----------------------------|-----------------------------|
| | Résultats pré-entraînement | Résultats post-entraînement |
| Maeva (10 min) + Lexical Access (5 min), 5 j/semaine, durée : 4 semaines | | |
| LDB1 : Items Maeva, IC sur 10 | 2 | 10 |
| LDB2 : Empan VA global chiffres /5 (IC/100) | 3,7 (74) | 4,2 (84) |
| LDB3 : Lecture de mots irréguliers, IC/20 (temps en sec) | 16 (22,67) | 18 (16,60) |
| LDB4 : Fluidité dessin en 1 minute, IC/35 | 7 | 9 |
| Switchipido (10 min) + Lexical Access (5 min), 5 j/semaine, durée : 4 semaines | | |
| LDB1 : Triplets complexes Switchipido, IC (temps) | 6 (17490 ms) | 29 (3026 ms) |
| LDB2 : Empan VA global chiffres /5 (IC/100) | 4,2 (84) | 4,4 (88) |
| LDB3 : Lecture de mots irréguliers, IC/ 20 (temps en sec) | 18 (16,60) | 19 (17,32) |
| LDB4 : Symboles mathématiques (IC en 1 minute) | 4 | 5 |

Tableau 4 : scores aux lignes de base (LDB) pré et post entraînement visuo-attentionnel (IC : items corrects, VA : visuo-attentionnel)

| Tâches et unités de mesure | TEST 1 Scores (ET ou centiles) | TEST 2 Scores (ET ou centiles) | TEST 3 Scores (ET ou centiles) |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Alouette, NE | 24 (-2) | 23 (-1,8) | 13 (-0,43) |
| Alouette, MCL | 183 (-1,1) | 186 (-1) | 252 (+0,5) |
| Alouette, temps en sec | 180 (-0,9) | 180 (-0,9) | 150 (+0,3) |
| Alouette, score efficacité CTL | 183 (-1) | 186 (-1) | 302 (+0,3) |
| Age de lecture en mois (niveau scolaire) | 97 (Août CE1) | 97 (Août CE1) | 122 (Sept CM2) |
| DeltaText, MCL | 172 | 182 | 191 |
| DeltaText, temps en sec | 180 | 180 | 132 |
| DeltaText, score efficacité CTL | 172 | 182 | 260 |
| Mouette/pingouin, MCL en 2 min | 166 (centiles 7 à 20) | 157 (centiles < 7) | 213 (centiles 21 à 38) |
| Eval2M, MCL en 2 min | 135 (centiles 21 à 38) | 129 (centiles 7 à 20) | 166 (centiles 39 à 62) |
| Suppression syllabe, % d'erreurs | 20 (-0,9) | 30 (-1,7) | 50 (-3,4) |
| Suppression syllabe, Temps en sec | 33,35 (0) | 17,16 (+2) | 23,46 (+1,3) |
| Suppression phonème, CVC % d'erreurs | 25 (-2,3) | 0 (+0,4) | 16,67 (-1,2) |
| Suppression phonème CVC, temps en sec | 34,03 (-0,5) | 20,15 (+1) | 18 (+1,3) |
| Suppression phonème CCV, % d'erreurs | 36,36 (-1) | 36,36 (-1) | 27,27 (-0,4) |
| Suppression phonème CCV, temps en sec | 36,60 (0) | 54,55 (-1,9) | 21,43 (+1,4) |
| Empan phonologique | 3 (-1,92) | 4 (-0,8) | 3 (-1,92) |
| DRA % d'erreurs | 1,85 (-2,7) | 5,56 (-7,2) | 1,85 (-2,1) |
| DRA temps en sec | 38,72 (-0,48) | 35,5 (0) | 32,72 (+0,4) |
| Seuil de lettre / 150 ms | 84 (-2,6) | 84 (-2,6) | 50 (-0,5) |
| EVA en report global / 5 | 3,7 (-1,5) | 3,7 (-1,5) | 4,4 (0) |
| EVA en report partiel / 5 | 4,6 (+0,5) | 4,3 (0) | 4,8 (+0,8) |
| Interférence issue du local TR en ms | -44,93 (-1,75) | -74,61(-2,37) | -31,99 (-1,47) |
| Interférence issue du global TR en ms | -27,19 (-0,72) | -22,31 (-1,41) | -21,44 (-1,4) |
| Asymétrie de l'interférence TR en ms | 17,73 (-0,25) | 52,30 (+0,15) | +10,55 (-0,33) |
| Interférence issue du local TE en % | 11 (+1,65) | 4 (+0,42) | -1 (-0,44) |
| Interférence issue du global TE en % | -1 (-0,8) | 3 (-0,29) | 3 (-0,29) |
| Asymétrie de l'interférence TE en % | -12 (-1,76) | -1 (-0,52) | 4 (+0,04) |

Tableau 5 : résultats du test 3 après l'entraînement visuo-attentionnel (ET : écart-types, NE : nombre d'erreurs, MCL : mots corrects lus, CTL : (MCL/temps de lecture) x180), CVC : consonne-voyelle-consonne, CCV : consonne-consonne-voyelle, DRA : dénomination rapide automatisée, EVA : empan visuo-attentionnel, TR : temps de réponse, TE : taux d'erreurs

3. Phase 2, « intervention PHO », test 4

Après une pause de 15 jours sans entraînement quotidien, l'objectif de la deuxième intervention est d'améliorer les compétences de perception catégorielle, de dénomination rapide et d'analyse phonémique. Le premier mois, la perception catégorielle est entraînée en condition de discrimination avec le logiciel *RapDys*© (10 min) et les compétences d'analyse phonémique par la fusion orale de phonèmes (5min). Le deuxième mois, les compétences de dénomination rapide sont entraînées avec le programme *Naming Speed*© (10 min) et les compétences d'analyse phonémique par la segmentation de mots en phonèmes (5 min). Afin de mesurer l'effet de ces entraînements, des LDB sont effectuées avant et après chaque intervention (cf. Tableau 6). Après 2 mois d'entraînement, les moyennes pondérées des contrastes analysés montrent une taille de l'effet très significative ($\tau = 0,8$; $p = 10^{-5}$) pour les items spécifiques à l'intervention (LDB1 et LDB2) en fusion phonémique ($\tau = 0,91$; $p = 10^{-4}$) et en segmentation phonémique ($\tau = 0,95$; $p = 10^{-6}$), significative ($\tau = 0,77$; $p = 0,0009$) pour les items pour lesquels est attendue une généralisation (LDB3, lecture de pseudomots) et non significative ($\tau = 0,0154$; $p = 0,9438$) pour les items neutres non spécifiques pour lesquels une amélioration n'est pas attendue (LDB4, calcul mental).

Afin de vérifier si cette évolution n'est pas due à un effet retest et si elle se généralise à la lecture de textes avec et sans signification, nous effectuons le test 4 pour ré-évaluer les compétences en lecture (cf. tableau 7). L'âge de lecture augmente de 12 mois par rapport au test 3 (*L'Alouette*) et cette progression se retrouve dans tous les scores d'efficacité en lecture (*DeltaText4*, *Pingouin au test 4* et *Eval2M*).

| PHASE 2 : ENTRAÎNEMENT PHONOLOGIQUE (durée : 8 semaines) | | |
|---|----------------------------|-----------------------------|
| RapDys (10 min) + Fusion (5 min), 5 j/semaine, durée : 4 semaines | Résultats pré-entraînement | Résultats post-entraînement |
| LDB1 Fusion mots travaillés, IC/10 (temps en sec) | 3 (163 sec) | 8 (103) |
| RapDys discrimination % | 21 | 80 |
| LDB2 Fusion mots non travaillés, IC/10 (temps en sec) | 0 (102) | 8 (108) |
| Contrepétries, IC/5 (temps en sec) | 3 (61,2) | 4 (58,2) |
| LDB3 Lecture de PM, IC/20 (temps en sec) | 16 (22,17) | 19 (15,29) |
| LDB4 Code, temps en sec | 22,09 | 17 |
| Naming Speed (10 min) + Segmentation (5 min), 5 j/semaine, durée : 4 semaines | Résultats pré-entraînement | Résultats post-entraînement |
| LDB1 Segmentation mots travaillés, IC/10 (temps en sec) | 1 (175) | 10 (75) |
| DRA mots travaillés, NE/25 (temps en sec) | 1 (28,25) | 0 (14,61) |
| LDB2 Segmentation mots non travaillés, IC/10 (temps en sec) | 2 (118) | 8 (65) |
| DRA mots non travaillés, IC/25 (temps en sec) | 0 (26,26) | 0 (15,45) |
| LDB3 Lecture de mots en 1min | 128 | 144 |
| Lecture de PM, IC/20 (temps en sec) | 16 (22,17) | 20 (10,21) |
| LDB4 Calcul mental, IC en 2 min | 5 | 6 |

Tableau 6 : scores aux lignes de base (LDB) pré et post entraînement phonologique (IC : items corrects, PM : pseudomots, NE : nombre d'erreurs, DRA : dénomination rapide automatisée)

| Tâches et unités de mesure | TEST 1 Scores (ET ou centiles) | TEST 2 Scores (ET ou centiles) | TEST 3 Scores (ET ou centiles) | TEST 4 Scores (ET ou centiles) |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Alouette, NE | 24 (-2) | 23 (-1,8) | 13 (-0,43) | 16 (-0,8) |
| Alouette, MCL | 183 (- 1,1) | 186 (-1) | 252 (+0,5) | 249 (+0,4) |
| Alouette, temps en sec | 180 (- 0,9) | 180 (-0,9) | 150 (+0,3) | 115 (+1,7) |
| Alouette, score efficacité CTL | 183 (-1) | 186 (-1) | 302 (+0,3) | 389 (+1,3) |
| Age de lecture en mois (niveau scolaire) | 97 (Août CE1) | 97 (Août CE1) | 122 (Sept CM2) | 134 (Sept 6 ^{èmes}) |
| DeltaText, MCL | 172 | 182 | 191 | 192 |
| DeltaText, temps en sec | 180 | 180 | 132 | 118 |
| DeltaText, score efficacité CTL | 172 | 182 | 260 | 293 |
| Mouette/pingouin, MCL en 2 min | 166 (centiles 7 à 20) | 157 (centiles < 7) | 213 (centiles 21 à 38) | 233 (centiles 39 à 62) |
| Eval2M, MCL en 2 min | 135 (centiles 21 à 38) | 129 (centiles 7 à 20) | 166 (centiles 39 à 62) | 172 (centiles 63 à 80) |

Tableau 7 : résultats du test 4 après l'entraînement phonologique (ET : écart types, NE : nombre d'erreurs, MCL : mots corrects lus, CTL : (MCL/temps de lecture) x180)

4. Phase 2, « intervention IM »

Après les interventions VA et PHO, l'objectif de la troisième intervention est de renforcer l'automatisation du couplage entre le code orthographique et le code phonologique avec le logiciel *Graphogame*© (10 min) et l'entraînement *LARMA* (5 min). Afin de mesurer l'effet de ces entraînements, des LDB sont effectuées avant et après l'intervention (cf. Tableau 8). Après 2 mois d'entraînement, les moyennes pondérées des contrastes analysés montrent une taille de l'effet modérée significative ($\tau = 0,47$; $p = .0035$) en lecture et en transcription de mots pour les items spécifiques à l'intervention (LDB1 et LDB2), modérée significative ($\tau = 0,55$; $p = .02$) pour les items pour lesquels est attendue une généralisation (LDB3, lecture de mots réguliers) et non significative ($\tau = 0,2$; $p = .6015$) pour les items neutres non spécifiques pour lesquels une amélioration n'est pas attendue (LDB4, labyrinthe).

Afin de compléter ces résultats, nous effectuons le test 5 pour ré-évaluer toutes les compétences évaluées au test 2. Tous les scores du test 5 sont normalisés sauf l'interférence issue du global légèrement altérée (cf. Tableau 9).

| PHASE 2 : ENTRAÎNEMENT INTERMODALITAIRE (durée : 8 semaines) | | |
|---|----------------------------|-----------------------------|
| Grapholearn (10 min) + LARMA (5 min), 5 j/semaine, durée : 8 semaines | Résultats pré-entraînement | Résultats post-entraînement |
| LDB1 Lecture de mots travaillés, IC/20 (temps en sec) | 17 (14) | 20 (10,93) |
| LDB2 Dictée de mots travaillés, IC/10 | 5 | 10 |
| LDB3 Lecture de mots réguliers, IC/20 (temps en sec) | 17 (20,79) | 18 (14,80) |
| LDB4 Labyrinthe (temps en sec) | 56,47 | 36,60 |

Tableau 8 : scores aux lignes de base (LDB) pré et post entraînement intermodalitaire (IC : items corrects, PM : pseudomots, NE : nombre d'erreurs, DRA : dénomination rapide automatisée)

| Tâches et unités de mesure | TEST 1 Scores (ET ou centiles) | TEST 2 Scores (ET ou centiles) | TEST 5 Scores (ET ou centiles) |
|--|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| Alouette, NE | 24 (-2) | 23 (-1,9) | 7 (+0,4) |
| Alouette, MCL | 183 (-1,1) | 186 (-1) | 258 (+0,7) |
| Alouette, temps en sec | 180 (-0,9) | 180 (-0,9) | 116 (+1,6) |
| Alouette, score efficacité CTL | 183 (-1) | 186 (-1) | 400 (+2,3) |
| Age de lecture en mois (niveau scolaire) | 97 (Août CE1) | 97 (Août CE1) | 142 (Mai 6 ^{ème}) |
| DeltaText, MCL | 172 | 182 | 198 |
| DeltaText, temps en sec | 180 | 180 | 127 |
| DeltaText, score efficacité CTL | 172 | 182 | 281 |
| Mouette/Pingouin, MCL en 2 min | 166 (centiles 7 à 20) | 157 (centiles < 7) | 235 (centiles 39 à 62) |
| Eval2M, MCL en 2 min | 135 (centiles 21 à 38) | 129 (centiles 7 à 20) | 185 (centiles 81 à 93) |
| Orlec L3, % d'items réussis | 55 (-0,6) | 69 (+0,2) | 89 (6 ^{ème}) |
| Chronodictées A/B, NE | 29 (-2) | 35 (-5) | 21 (6 ^{ème}) |
| Mots réguliers, % d'erreurs | 8,33 (-2) | 2,78 (-0,3) | 2,78 (-0,3) |
| Mots réguliers, temps en ms | 826 (-0,8) | 778 (-0,4) | 667 (+0,3) |
| Mots irréguliers, % d'erreurs | 33,33 (-11,3) | 33,33 (-11,3) | 0 (+0,3) |
| Mots irréguliers, temps en ms | 834 (-0,2) | 625 (+0,6) | 673 (+0,4) |
| Pseudomots, % d'erreurs | 25,71 (-1,5) | 34,29 (-2) | 8,57 (+0,6) |
| Pseudomots, temps en ms | 1062 (-0,4) | 977 (0) | 949 (0) |
| Questionnaire enfant score total | 42 | 44 | 49 |
| Questionnaire parent score total | 40 | 45 | 48 |
| Suppression syllabe, % d'erreurs | 36,36 (-1) | 36,36 (-1) | 20 (-0,9) |
| Suppression syllabe, Temps en sec | 36,60 (0) | 54,55 (-1,9) | 26,01 (+0,95) |
| Suppression phonème, CVC % d'erreurs | 3 (-1,92) | 4 (-0,8) | 0 (+0,4) |
| Suppression phonème CVC, temps en sec | 1,85 (-2,7) | 5,56 (-7,2) | 22,86 (+0,8) |
| Suppression phonème CCV, % d'erreurs | 38,72 (-0,48) | 35,5 (0) | 9,09 (+0,5) |
| Suppression phonème CCV, temps en sec | 84 (-2,6) | 84 (-2,6) | 27,82 (+0,8) |
| Empan phonologique | 3 (-1,92) | 4 (-0,8) | 4 (-0,8) |
| DRA % d'erreurs | 1,85 (-2,7) | 5,56 (-7,2) | 0 (+0,4) |
| DRA temps en sec | 38,72 (-0,48) | 35,5 (0) | 28,61 (+1) |
| Seuil de lettre / 150 ms | 84 (-2,6) | 84 (-2,6) | 50 (-0,5) |
| EVA en report global / 5 | 3,7 (-1,5) | 3,7 (-1,5) | 4,5 (+0,3) |
| EVA en report partiel / 5 | 4,6 (+0,5) | 4,3 (0) | 4,7 (+0,5) |
| Interférence issue du local TR en ms | -44,93 (-1,75) | -74,61 (-2,37) | 19,81 (0,39) |
| Interférence issue du global TR en ms | -27,19 (-0,72) | -22,31 (-1,41) | -16,12 (-1,33) |
| Asymétrie de l'interférence TR en ms | 17,73 (-0,25) | 52,30 (+0,15) | -35,93 (-0,88) |
| Interférence issue du local TE en % | 11 (+1,65) | 4 (+0,42) | 4 (-0,44) |
| Interférence issue du global TE en % | -1 (-0,8) | 3 (-0,29) | -1 (-0,83) |
| Asymétrie de l'interférence TE en % | -12 (-1,76) | -1 (-0,52) | -5 (-0,97) |
| Empan de chiffres endroit | 4 (2) | 4 (2) | 5 (3) |
| Empan de chiffres envers | 3 (3) | 4 (4) | 4 (4) |
| Empan visuo-spatial endroit | 6 (+0,7) | 6 (+0,7) | 6 (+0,7) |
| Empan visuo-spatial envers | 5 (0) | 5 (0) | 5 (0) |

Tableau 9 : résultats du test 5 après l'entraînement intermodalitaire (ET : écart types, NE : nombre d'erreurs, MCL : mots corrects lus, CTL : (MCL/temps de lecture) x180), CVC : consonne-voyelle-consonne, CCV : consonne-consonne-voyelle, DRA : dénomination rapide automatisée, EVA : empan visuo-attentionnel, TR : temps de réponse, TE : taux d'erreurs

5. Phase 3, arrêt des entraînements

Après 8 semaines sans entraînements, les compétences en lecture sont réévaluées et les scores du test 6 sont présentés et comparés aux résultats obtenus aux tests 1,2,3,4 et 5 (cf. Tableau 10). Les performances à l'épreuve *L'Alouette* sont équivalents à ceux du test 5. Les performances aux épreuves *DeltaText 6*, *Pingouin* au test 6 et *Eval2M* ont augmenté. La figure 7 présente l'évolution de l'âge de lecture comparativement à l'âge chronologique, et la figure 8, l'évolution des scores d'efficacité de toutes les tâches de lecture à voix haute. La durée du protocole, prolongée de 4 mois à cause de l'épidémie du *corona virus*, a été au total de 20 mois au lieu de 16 mois initialement prévu.

| Tâches et unités de mesure | TEST 1 Scores (ET, c.) | TEST 2 Scores (ET, c.) | TEST 3 Scores (ET, c.) | TEST 4 Scores (ET, c.) | TEST 5 Scores (ET, c.) | TEST 6 Scores (ET, c.) |
|---|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Alouette, NE | 24 (-2) | 23 (-1,9) | 13 (-0,43) | 16 (-0,8) | 7 (+0,4) | 7 (+0,4) |
| Alouette, MCL | 183 (-1,1) | 186 (-1) | 252 (+0,5) | 249 (+0,4) | 258 (+0,7) | 258 (+0,7) |
| Alouette, temps en sec | 180 (-0,9) | 180 (-0,9) | 150 (+0,3) | 115 (+1,7) | 116 (+1,6) | 119 (+1,5) |
| Alouette, score efficacité CTL | 183 (-1) | 186 (-1) | 302 (+0,3) | 389 (+1,3) | 400 (+2,3) | 390 (+2,2) |
| Age de lecture en mois Niveau scolaire | 97 Août CE1 | 97 Août CE1 | 122 Sept CM2 | 134 Sept 6 ^{ème} | 142 Mai 6 ^{ème} | 142 Mai 6 ^{ème} |
| DeltaText, MCL | 172 | 182 | 191 | 192 | 198 | 199 |
| DeltaText, temps en sec | 180 | 180 | 132 | 118 | 127 | 123 |
| DeltaText, score efficacité CTL | 172 | 182 | 260 | 293 | 281 | 291 |
| Mouette/pingouin, MCL en 2 min | 166 (c. 7 à 20) | 157 (c. < 7) | 213 (c. 21 à 38) | 233 (c.39 à 62) | 235 (c. 39 à 62) | 241 (c.39 à 62) |
| Eval2M, MCL en 2 min | 135 (c. 21 à 38) | 129 (c. 7 à 20) | 166 (c. 39 à 62) | 172 (c. 63 à 80) | 185 (c. 81 à 93) | 204 (c. > 93) |

Tableau 10 : résultats du test 6 après la phase 3, sans entraînement intensif (ET : écart types, c. : centiles, NE : nombre d'erreurs, MCL : mots corrects lus, CTL : (MCL/temps de lecture) x180)

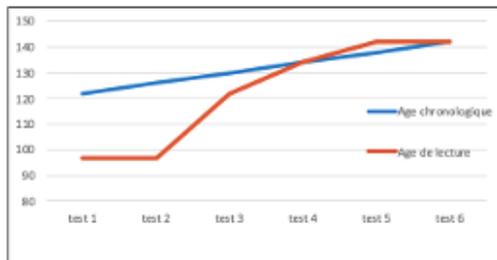


Figure 7. Evolution de l'âge de lecture (L'Alouette) et de l'âge chronologique du test 1 au test 6.

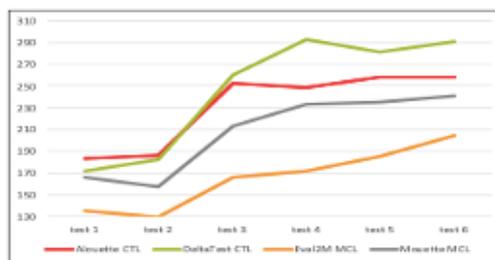


Figure 8. Evolution des scores d'efficacité en lecture (L'Alouette, DeltaText, Eval2M et Mouette/Pingouin) du test 1 au test 6.

Discussion

Cette étude de cas -Angélique, 10 ans, LD- illustre le *design* expérimental du protocole DDMR fondé sur une intervention multimodale intensive pour traiter les déficits cognitifs sous-jacents causaux d'un trouble développemental de la lecture. L'objectif principal de cet essai clinique randomisé est d'évaluer l'impact du protocole DDMR sur les compétences en lecture et le maintien des gains après 2 mois d'arrêt. La durée totale a été prolongée de 4 mois à cause de l'épidémie du *corona virus* et des absences liées aux vacances scolaires ou aux maladies. L'analyse des résultats montre une normalisation des compétences en lecture et en orthographe en âge chronologique, 20 mois après son inclusion dans ce protocole expérimental. Les processus cognitifs sous-jacents phonologiques et VA altérés initialement (analyse phonologique, DRA, empan VA et focalisation attentionnelle local/global, interférence issue du local) sont normalisés. La confiance et l'estime de soi, l'appétence à lire et les résultats scolaires s'améliorent également à la fin du protocole de remédiation.

Nous ne pouvons pas encore publier les résultats de l'étude de groupe car tous les LD inclus n'ont pas terminé l'expérimentation. Toutefois, nous constatons que le gain total en âge de lecture (45 mois) obtenu par Angélique, est supérieur au gain total moyen de 34 mois en âge de lecture obtenu par 20 LD qui ont terminé l'expérimentation. De plus, si nous comparons l'âge de lecture d'Angélique à son âge chronologique, nous ne constatons plus de décalage. Les comparaisons entre les LDB pré et post-entraînement montrent (1) un effet sur les items spécifiques à l'entraînement (LDB1 et 2), (2) un effet sur la généralisation aux compétences de lecture et d'orthographe (LDB3), excepté pour les mots irréguliers après l'intervention VA, (3) et comme attendu, aucun effet sur les items non spécifiques à l'entraînement (LDB4). Un entraînement des compétences visuo-attentionnelles sur une durée plus longue aurait sans doute permis de réduire l'interférence issue du local afin de favoriser l'inhibition des détails (les lettres) pour accéder au traitement global de l'information (le mot) et améliorer de la lecture globale des mots. De façon générale, les résultats obtenus aux différentes LDB confirment la spécificité de chaque intervention et les gains obtenus aux tests 3, 4 et 5.

Ces résultats peuvent s'expliquer par deux facteurs de protection : l'efficacité de l'intelligence fluide très supérieure à la moyenne (évaluée à l'âge de 6 ans) bien que l'épreuve des Matrices ne reflète pas cette efficacité de l'intelligence (note standard de 9), et le niveau éducatif de la mère. En effet, la normalisation des compétences de lecture, d'orthographe et des processus cognitifs phonologiques et visuo-attentionnels pourraient s'expliquer par l'investissement très important de la mère et de l'enfant pour effectuer les entraînements tout au long de l'expérimentation. Dans cette étude, les principes d'éducation thérapeutique et de décision partagée sont mis en œuvre pour promouvoir la participation des enfants et des parents qui reçoivent toutes les informations nécessaires à la compréhension de la dyslexie développementale et du protocole de soin qui leur est proposé. Ces informations sont présentées et répétées pendant toute la durée de l'étude sur différents supports (diaporama, films, fiches d'informations). Les enfants et leurs parents sont formés pour utiliser de façon autonome les logiciels d'entraînement. Les résultats obtenus aux différents temps de l'étude sont communiqués et expliqués aux parents et aux enfants. Angélique et sa maman ont toujours posé des questions très pertinentes sur l'essai clinique et ont géré les contraintes liées au matériel sans jamais montrer de signes d'impatience, de lassitude ou d'insatisfaction malgré les dysfonctionnements informatiques, les entraînements et les évaluations, tous très longs et répétitifs. Leur attitude très positive s'est traduite par une grande reconnaissance envers l'orthophoniste et un grand intérêt pour l'étude en cours. La réaction positive de l'enseignant, étonné par la progression en lecture et en orthographe et par une amélioration des résultats scolaires, a également joué un rôle dans la motivation de

la mère et de l'enfant. Ces constatations confirment l'absolue nécessité d'entraînements ciblés et intensifs mis en œuvre dans une décision de soin partagée avec le patient et ses parents, en partenariat avec les enseignants et sont en accord avec le consensus récent sur le parcours de soin des troubles du langage écrit (HAS, 2017).

Cette méthodologie de soin répond à la fois à des preuves scientifiques externes fondées sur l'hypothèse causale multimodale de la dyslexie développementale (Menghini et al., 2010; Pennington, 2006) et à des preuves cliniques internes fondées sur l'expertise du clinicien, tout en respectant le niveau de compétences de chaque lecteur dyslexique. Ainsi, les modalités du protocole de soin DDMR (objectifs, fréquence et durée de l'intervention) ont été définies selon les conclusions de méta-analyses sur l'efficacité des interventions (Ehri et al., 2001; Galuschka et al., 2014), les principes généraux de la rééducation cognitive (Peyroux & Seguin, 2018) et les principes de généralisation et d'efficacité d'une intervention (Tressoldi et al., 2012) dans le contexte de remédiation des troubles de la lecture. Particulièrement, il nous paraît important de souligner la nécessité de l'intensité des entraînements (5 jours par semaine et 15 min par jour) poursuivis à domicile et de l'association systématique d'un entraînement des processus cognitifs sous-jacents avec un entraînement des processus de lecture. De plus, les compétences sont évaluées avec des mesures répétées sur des temps définis par rapport à des critères de généralisation à d'autres compétences au-delà de celles ciblées par l'intervention et par le maintien des gains une fois que l'intervention a cessé.

Selon les principes fondamentaux de la recherche, le *design* expérimental de ce protocole DDMR peut comporter certaines limites. La première limite que l'on peut évoquer concerne la question de l'impact de possibles effets retests. En effet, une augmentation très conséquente de 45 mois de l'âge de lecture est obtenue entre le test 1 (AL=8 ans 1 mois) et le test 6 (AL= 11 ans 10 mois). Or, la répétition d'un test tous les 3 mois, peut entraîner un effet retest et par conséquent biaiser l'interprétation des résultats. Cependant, ce gain semble ici réellement lié aux entraînements pour plusieurs raisons. Tout d'abord, l'âge de lecture (8 ans 1 mois) est resté identique pendant la phase contrôle entre le test 1 et 2 alors que le gain dû à l'effet retest est généralement plus important à la deuxième passation qu'à la troisième passation à un intervalle de temps de trois mois (Scharfen et al., 2018). De plus, une étude montre que le gain dû à l'effet retest se stabilise après trois mois (Bartels et al., 2010). Ensuite, le gain d'efficacité obtenu à la lecture de textes non significatifs, DeltaText 3 et 4, est également très supérieur au gain d'efficacité obtenu à la lecture des DeltaText 1 et 2, alors que l'effet retest est contrôlé par la présentation de 4 textes différents. Aussi, nous notons que les gains obtenus en lecture de textes non significatifs sont équivalents aux gains obtenus en lecture de textes significatifs. Et il faut souligner que la présentation de deux textes différents (Mouette aux tests 1, 3, 5 /Pingouin aux tests 2, 4, 6) tous les 4 mois, diminue également le risque de l'effet retest. Enfin, une normalisation des procédures de lecture de mots réguliers, irréguliers et pseudomots, réévaluées à la fin de l'intervention, confirme les résultats obtenus pour la lecture de textes.

La seconde limite concerne la question du groupe contrôle. En effet, la comparaison avec un groupe témoin de LD recevant un entraînement non spécifique (i.e en mathématiques) est normalement nécessaire pour contrôler la spécificité des effets des entraînements. De plus, un groupe témoin de LD sans entraînement est également nécessaire pour contrôler les possibles effets Hawthorne. Cependant, un entraînement non spécifique pendant 16 mois, pouvant être assigné aléatoirement, n'était pas éthiquement envisageable et augmentait le risque de refus de participation à l'étude. De plus, les gains obtenus avec un entraînement non spécifique dans un groupe témoin avec un contrôle « inter-sujet » peuvent être supérieurs ou inférieurs aux gains d'un groupe témoin avec un contrôle « intra-sujet » et conduire à une surestimation ou à une sous-estimation de la taille de l'effet (McArthur et al., 2015). Par conséquent, nous avons choisi de comparer la pente des gains de la phase 3 (2 mois après l'intervention intensive) à la pente des gains de la phase 1 (2 mois sans intervention intensive). Autrement dit, nous avons fait le choix d'un contrôle « intra-sujet » pour évaluer les gains non liés au traitement tout en respectant les exigences éthiques et scientifiques dans un contexte de faisabilité clinique.

En conclusion, l'originalité de ce protocole expérimental DDMR est de proposer des entraînements intensifs adaptés au profil cognitif et au profil de lecture de chaque lecteur dyslexique. Nous avons ainsi répondu aux exigences scientifiques par le *design* expérimental de l'essai clinique randomisé et aux exigences cliniques par la prescription individuelle de soin fondée sur l'expertise des orthophonistes. Nous espérons que cette approche interventionnelle multimodale curative permettra d'améliorer l'efficacité des remédiations des troubles de la lecture mais aussi de limiter les prises en charge longues et coûteuses, reflet d'une réalité clinique actuelle. Les analyses statistiques de l'étude de groupe permettront de vérifier si l'effet est généralisable sur un grand échantillon, avec des praticiens différents, à des âges différents et dans des contextes différents, pour une conception et un dosage de l'intervention définis en termes de

méthodologie et d'intensité. Ce travail de recherche s'inscrit dans une démarche de prévention et de soin en santé publique, chez l'enfant et l'adolescent présentant un trouble spécifique du langage écrit.

Abréviations : DDMR (dyslexie développementale et méthode de remédiation), LD (lecteur dyslexique), DCSJ (déficit cognitif sous-jacent), DRA (dénomination rapide automatisée), VA (visuo-attentionnel), IM (intermodalitaire), PHO (phonologique), LDB (ligne de base).

Financements approbations éthiques et remerciements

L'Association nationale de la recherche et de la technologie (ANRT), le laboratoire d'anthropologie et de psychologie clinique, cognitives et sociale (LAPCOS) et la société GNOSIA financent ce projet par le biais d'une convention industrielle de formation par la recherche (CIFRE n° 2018/1089). Le laboratoire LPC à Aix-Marseille Université et les Hôpitaux Pédiatriques de Nice CHU- Lenval financent également cette étude. Une approbation éthique a été validée par le Comité de protection des personnes et par le Comité d'éthique pour la recherche non interventionnelle de l'Université Côte d'Azur. Sur la base de la Déclaration d'Helsinki et du décret de la loi Jardé relatif aux recherches impliquant la personne humaine (décret n° 2016-1537 du 16 novembre 2016), un formulaire de consentement éclairé écrit est signé par les parents de chaque participant. L'essai clinique a été enregistré sur le site ClinicalTrials.gov le 18 Juillet 2019, sous la référence NCT4028310. Le protocole d'étude a été soumis à publication dans la revue *BMC Pediatrics* le 13 février 2021 (Harrar Eskinazi et al., soumis pour publication). Les auteurs ne déclarent aucun conflit d'intérêt.

Nous remercions Angélique et sa maman qui nous ont autorisés à publier ces résultats. Nous remercions tous les parents et tout particulièrement les orthophonistes qui participent à cette étude. Leur implication et leur motivation permettent 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 Colliat-Dangus, Emilie Coudougnan, Sabrina Courant, Gaëlle Darrot, Agnès De Buttet, Charlotte Desmons, Nathalie De Vauchier, Louise Duloquin, Martine Etard, Camille Fajon, Charlotte Forst, Lola François, Mélanie Gely, Marie Laure Grand, Sylvie Hammerli-Peter, Fanny Hocquet, Laurence Jacquin, Christine Kalck, Carole Lacuentra, Marine Ladoul, Ludivine Lebel, Marion Le Bozec, Mélissa Lecoq, 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, Julie Nothelie, Clara Pastor, Jennifer Pignon, Manon Py, Charlotte Pycke, Claire Saint Gaudin, Catherine Scheubel-Clerjaut, Odile Tromelin, Ludivine Verlot-Mory, Marine Versio.

Nous remercions le Dr Hervé Caci, MD PhD (DRCI des Hôpitaux Pédiatriques de Nice-CHU-Lenval), le Dr Dominique Donzeau, attachée de recherche clinique et Julie Nothelie, ingénieure d'étude pour leur aide et leur précieux conseils dans la mise en place et le bon déroulement logistique de cet essai clinique. Nous remercions Edgard Alavoine, Franck Medina et Lionel Vincelas pour leur aide dans la gestion des supports informatiques. Nous remercions Sylviane Valdois, Rachel Zoubrintzky, Nathalie Bedoin, Grégory Collet, Willy Serniclaes et Franck Ramus pour leurs précieux conseils.

Références bibliographiques

- Baneath, B., Boutard, C., & Alberti, C. (2006). *Chronosdictées: Tools for evaluating orthographic performance, with and without time constraints* (Orthoéditions).
- 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>
- 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., & 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.
- 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), 695–703. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.11.003>
- 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>
- 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>
- 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>
- 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), 7939–7944. <https://doi.org/10.1073/pnas.0904402107>
- Breznitz, Z. (1997). Enhancing the Reading of Dyslexic Children by Reading Acceleration and Auditory Masking. *Journal of Educational Psychology*, *89*(1), 103–113.
- 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>
- 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>
- 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>
- 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. *ANAE. Approche Neuropsychologique Des Apprentissages Chez l'enfant*, *29*(148), 257–263.
- De Cara, B., & Plaza, M. (2010). *Les outils informatisés d'aide à la lecture: Un bilan des recherches*. 7.
- 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>
- Facoetti, A., Trussardi, A., Ruffino, M., Lorusso, M. L., Cattaneo, C., Galli, R., Massimo, M., & Zorzi, M. (2009). Multisensory Spatial Attention Deficits Are Predictive of Phonological Decoding Skills in Developmental Dyslexia. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *22*, 1011–1025. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21232>
- Fiassa, C., & Nader-Grosbois, N. (2016). *De la perception à l'estime de soi: Concept, évaluation et intervention* (De Boeck Supérieur).
- Fluss, J., Bertrand, D., Ziegler, J., & Billard, C. (2009). *Troubles d'apprentissage de la lecture: Rôle des facteurs cognitifs, comportementaux et socio-économiques*.
- Fostick, L., & Revah, H. (2018). Dyslexia as a multi-deficit disorder: Working memory and auditory temporal processing. *Acta Psychologica*, *183*, 19–28. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2017.12.010>
- 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>
- Franceschini, S., Bertoni, S., Giancesini, T., Gori, S., & Facoetti, A. (2017). A different vision of dyslexia: Local precedence on global perception. *Scientific Reports*, *7*(1), 17462. <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), e89900. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0089900>
- 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>
- Guelfi, J., & Crocq, M. (2015). *DSM-5: Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux (5e éd.) (version internationale) (Washington, DC, 2013). Traduction française par JD Guelfi et al. A. Crocq et al.* (Elsevier Masson).
- Haft, S. L., Myers, C. A., & Hoefft, 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>
- 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)
- Harrar Eskinazi, K., De Cara, B., Leloup, G., & Faure, S. (2019). Apports des technologies numériques dans l'aide à l'apprentissage de la lecture. In *L'apprentissage de la lecture* (Nathan, pp. 307–315).
- Harrar Eskinazi, K., De Cara, B., Leloup, G., Nothelier, J., Caci, H., Ziegler, J., & Faure, S. (2021).

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. *Article Submitted for Publication*.

Harrar Eskinazi, K., Nothelier, J., & Versio, M. (2020). *Naming Speed*.

HAS. (2017). *Améliorer le parcours de santé d'un enfant avec troubles spécifiques du langage et des apprentissages ?* Haute Autorité de Santé. 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

Keïta, L., Bedoin, N., Burack, J. A., & Lepore, F. (2014). Switching between global and local levels: The level repetition effect and its hemispheric asymmetry. *Frontiers in Psychology*, 5. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00252>

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>

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), 61–76. <https://doi.org/doi:10.1002/rrq.038>.

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>

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. (2020). Positive effects of GraphoGame reading intervention in French: The importance of initial reading level and engagement. *Article Submitted for Publication*.

Lassault, J., & Ziegler, J. C. (2018). Les outils numériques d'aide à l'apprentissage de la lecture. *Langue française*, 199(3), 111. <https://doi.org/10.3917/lf.199.0111>

Launay, L., Maeder, C., Roustit, J., & Touzin, M. (2018). *Evaléo 6-15: Évaluation du langage écrit et du langage oral*. 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). <https://doi.org/10.15761/NNS.1000118>

Lebel, L., Gamot, L., & Leloup, G. (2018). *Protocole expérimental d'entraînement du lexique orthographique chez des enfants tout-venant scolarisés en CE2*. Université de Lille 2.

Lecocq, P. (1998). *E.co.s.se: A test of syntactico-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.

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), 60–83. <https://doi.org/10.1007/s11881-021-00222-4>

Lobier, M. (2008). *Design of a software program for the rehabilitation of visuo-attentional span disorders*.

Lobrot, M. (1967). *ORLEC: battery to measure reading and spelling*. bureau d'études et de recherches.

McArthur, G. (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., 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., 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>

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.

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>

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>

Meyer, L., & Schaadt, G. (2020). Aberrant Prestimulus Oscillations in Developmental Dyslexia Support

an Underlying Attention Shifting Deficit. *Cerebral Cortex Communications*, 1(1), tgaa006.
<https://doi.org/10.1093/texcom/tgaa006>

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>

Parker, R. I., Vannest, K. J., Davis, J. L., & Sauber, S. B. (2011). Combining Nonoverlap and Trend for Single-Case Research: Tau-U. *Behavior Therapy*, 42(2), 284–299. <https://doi.org/10.1016/j.beth.2010.08.006>

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*, 20.

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*, dys.1619. <https://doi.org/10.1002/dys.1619>

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>

Peters, J. L., De Losa, L., Bavin, E. L., & Crewther, S. G. (2019). Efficacy of dynamic visuo-attentional interventions for reading in dyslexic and neurotypical children: A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 100, 58–76. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2019.02.015>

Peyroux, E., & Seguin, C. (2018). Critères cliniques et objectifs rééducatifs. In *Rééducation cognitive chez l'enfant* (Deboeck supérieur, pp. 147–180).

Piérart, B., & Grégoire, J. (2004). *Decode and understand: The reading closure test revisited*. *Belgian calibration of Lobrot's L3*, 39(2), 87–100.

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., & Szenkovits, G. (2008). What Phonological Deficit? *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61(1), 129–141. <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), 39–60.
<https://doi.org/10.17011/ht/urn.201405281859>

Ruiz, J., Lassaut, J., Sprenger-Charolles, L., Richardson, U., Lyytinen, H., & Ziegler, J. C. (2017). *GraphoGame: Un outil numérique pour enfants en difficultés d'apprentissage de la lecture*. 11.

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.

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>

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>

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>

Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Piquard-Kipffer, A., Pourcin, L., & Leloup, G. (2018). *EVALEC: computerized diagnostic assessment battery for specific reading learning disabilities*. Happyneuron.

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>

Tarlow, K. R. (2017). An Improved Rank Correlation Effect Size Statistic for Single-Case Designs: Baseline Corrected Tau. *Behavior Modification*, 41(4), 427–467. <https://doi.org/10.1177/0145445516676750>

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>

Tulloch, K., & Pammer, K. (2019). Tablet computer games to measure dorsal stream performance in good and poor readers. *Neuropsychologia*, 130, 92–99. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2018.07.019>

Valdois, S., Bosse, M.-L., & Tainturier, M.-J. (2004). The cognitive deficits responsible for developmental dyslexia: Review of evidence for a selective visual attentional disorder. *Dyslexia*, 10(4), 339–363. <https://doi.org/10.1002/dys.284>

Valdois, S., Guinet, E., & Embs, J. L. (2017). *Evadys: Visuo-attentional span diagnostic tool*.

Happyneuron.

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 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>

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>

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>

Wechsler, D. (2014). *Echelle d'intelligence de Wechsler pour enfants: Wisc V*. ECPA, les Editions du centre de psychologie appliquée.

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>

World Health Organization. (2015). *International Classification of Diseases* (10th edition).

Ziegler, J. C., Bertrand, D., Tóth, D., Csépe, V., Reis, A., Faisca, 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*. 28.

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*, 096372142091587. <https://doi.org/10.1177/0963721420915873>

Zoubinetzky, R., Bielle, F., & Valdois, S. (2014). New Insights on Developmental Dyslexia Subtypes: Heterogeneity of Mixed Reading Profiles. *PLoS ONE*, *9*(6), e99337. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099337>

Zoubinetzky, R., Collet, G., Nguyen-Morel, M.-A., Valdois, S., & Serniclaes, W. (2019). Remediation of Allophonic Perception and Visual Attention Span in Developmental Dyslexia: A Joint Assay. *Frontiers in Psychology*, *10*, 1502. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01502>