

*Laboratoire de Sciences Cognitives et Affectives (SCALab) – UMR CNRS 9193
Faculté de Psychologie et Sciences de l'Education et de la Formation (PsySEF)
École doctorale Sciences de L'Homme dans la Société
Université de Lille*

La dyslexie développementale pourrait être un symptôme d'une altération du processus d'automatisation du couple perception-action

Une thèse soumise par

Luc-Marie Virlet

Pour le diplôme de

Docteur en psychologie (PhD)

Membres du Jury :

Pr Christine Assaïante	Université d'Aix-Marseille	Rapporteuse
Pr Jérémie Gaveau	Université de Bourgogne	Rapporteur & Président
Pr Séverine Casalis	Université de Lille	Examinatrice
Pr Aude Charollais	CHU de Martinique	Examinatrice

Membres de la direction de thèse :

Dr. Cédric Bonnet	Université de Lille	Directeur
Pr. Patrick Berquin	CHU Amiens-Picardie	Co-Directeur
Dr Laurent Sparrow	Université de Lille	Co-Encadrant

Soutenance publique des travaux de thèse le 12 novembre 2025
Salle des Colloques à la maison de la Recherche, Pont de Bois, Villeneuve d'Ascq.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier en premier lieu Laurent Sparrow, Cédric Bonnet et Patrick Berquin pour l'encadrement de cette thèse : Laurent pour son accueil de ce sujet qui d'un coup ne semblait plus si inintelligible mais devenait un sujet scientifique à tester expérimentalement, et pour son soutien et son enthousiasme permanents. Cédric pour sa patience à essayer de m'inculquer la forme nécessaire à l'expression de la science, pour sa faculté à ouvrir notre sujet à la coopération internationale et pour sa disponibilité. Patrick pour sa persévérance à essayer de m'inculquer la modération, et pour son accompagnement dans cette transition partielle de clinicien à chercheur. Je tiens à les remercier tous les trois et à leur dire mon admiration pour leur présence sans faille tout au long de ces 7 années, ainsi que les membres de mon comité de suivi de thèse, Laurent Madelain et Muriel Boucart. Je tiens également à remercier tout particulièrement les rapporteurs, Christine Assaïante et Jérémie Gaveau, ainsi que Séverine Casalis et Aude Charollais examinatrices, membres de mon jury, qui ont très aimablement accepté de se pencher sur une thèse avec une approche transversale, et légèrement disruptive, exercice toujours délicat. Je souhaite aussi les remercier pour les discussions que nous avons pu entretenir, pendant la thèse ou à propos du manuscrit. Elles ont été pour moi une source de réflexion, d'ouverture et d'inspiration.

Je remercie enfin toutes les personnes qui ont fait de ces années de thèse ce qu'elles ont été, au niveau recherche comme au niveau personnel. D'abord les membres du laboratoire SCALab qui par leur accueil, leur efficacité, leur bienveillance, et leur curiosité ont rendu cette thèse si facile à vivre, que ce soit l'équipe administrative avec Sabine Emmanuelle Fournier et Sabine Pierzchala, les différentes équipes de direction du laboratoire, ainsi que les membres de l'équipe ADAPT, avec un accessit particulier à l'équipe langage pour son exceptionnelle ouverture et pour sa rigueur scientifique associée à une grande bienveillance qui me semble au final une marque de fabrique du laboratoire SCALab. Que de rencontres, que d'échanges en sept ans ! Je vous en remercie, mais ne pouvant en faire une liste exhaustive, je me suis résolu à effectuer un balayage impressionniste... avec quelques notes de couleurs d'un tableau lumineux des nombreux doctorants ou post doc rencontrés, je remercie Laura Caton pour son accueil, Yann-Romain Kechabia mon co-doctorant pour ses temps d'échanges et son soutien, Camille Cornut pour son enthousiasme, Matthieu Bignon pour ses échanges et pour ses questions incessantes, Alicia Fasquelle pour sa force de vie, Melen Guillaume pour sa curiosité et son sens didactique,

Junior Vargas pour sa clarté et sa pugnacité, et Guillaume Chevet pour son attention et son ouverture.

Je souhaite aussi remercier les membres de l'Université d'État de Sao Paulo (Brésil) pour leur accueil exceptionnel, leur grande ouverture d'esprit, leur rigueur scientifique et leur efficience : José Baréla, Sergio Tosi Rodrigues, Gabriella Afigueiredo, Patricia Lopes Pinto da Silva et Crislaine da Silva.

Je voudrais aussi remercier les membres du DU Perception, Action, Troubles des Apprentissages : Thierry Pozzo, Charalambos Papaxanthis, ainsi qu'Alfredo Marino, Marc Janin, et tout particulièrement Patrick Quercia qui m'a entraîné dans cette incroyable aventure de la prise en charge proprioceptive des troubles DYS. Pourtant, je ne l'avais pas cru quand il m'avait prévenu que si l'on met un pied dans la recherche, on ne s'arrête plus. Mais quelle belle addiction !

J'aimerais remercier les personnalités et toutes les personnes qui m'ont écouté, soutenu, poussé et questionné. Elles se reconnaîtront. Je souhaite aussi remercier le département de médecine générale à travers Marc Bayen et Nassir Messaadi, qui m'ont permis de mener de front mon métier de médecin généraliste et ce travail de thèse.

Il est très important pour moi de remercier les familles et les enfants qui ont participé aux études et de remercier les orthophonistes, principalement : Dorothee Pollard, Delphine Douce, Florence Durieux, Anne Dépret, et Pauline Marquilly pour leur travail remarquable, sans lesquelles toutes ces études n'auraient pas pu être réalisées. And a big thank you to Mike for your help with the language of Shakespeare.

Je souhaite aussi remercier, pour leur soutien et pour leurs nombreuses actions les membres de l'association ARDYS, dont je tairais le nom pour ne pas blesser leur modestie, ou peut-être car ils sont trop nombreux..... merci particulièrement à Béatrice, Bruno, Christiane, Delphine Elisabeth, Éric, Laure, Laurent, Laurent, Maguy, Mathilde, Simon, Sophie et Véronique.

Pour terminer, je voudrais remercier les membres de ma famille, qui s'est agrandie durant ces 7 longues années, avec des petits-enfants et des valeurs ajoutées, pour leur soutien et leur patience lors de ces moments où j'étais là sans être là. Je souhaite leur dire toute mon affection et toute leur importance. Une dernière pensée très particulière à Sylvie, ma lumière.

RÉSUMÉ

La dyslexie développementale, reconnue comme un trouble de l'automatisation de la lecture est un trouble pathologique de l'apprentissage de la lecture sans cause explicative, qui résiste aux interventions. La dyslexie développementale est un handicap dont la cause reste à ce jour un mystère. La littérature est extrêmement riche et décrit de très nombreux déficits.

Une approche thérapeutique, l'intervention proprioceptive vise à corriger une dysfonction proprioceptive. Une dysfonction proprioceptive s'exprime par la présence de déficits d'intégration multisensorielle avec des conséquences perceptives, spatiales, et de la distribution du tonus musculaire, associées à une altération du sommeil paradoxal par la présence de nombreux micro-réveils. Le rapport de l'INSERM (2016) sur l'évaluation de l'intervention proprioceptive dans la dyslexie développementale n'a pas pu conclure et suggérait la réalisation de travaux complémentaires.

La théorie phonologique d'un déficit cognitif unique considère que les déficits sensorimoteurs observés sont des comorbidités qui résultent d'un manque de pratique de la lecture. Les théories sensorimotrices des théories temporelles, magnocellulaires et cérébelleuses considèrent que les déficits sensorimoteurs sont impliqués dans les processus d'automatisation de la lecture dans la dyslexie développementale.

Les troubles de l'automatisation de la lecture de la dyslexie développementale sont-ils dus à un déficit des processus d'automatisation sensorimoteurs, ou sont-ils indépendants des processus d'automatisation sensorimoteurs ?

Dans la première partie nous présentons les différents déficits et théories de la dyslexie développementale, dont la variété et la diversité font évoquer un dysfonctionnement cérébral global. Nous évoquons le rôle de la proprioception dans le couple perception-action impliqué dans les processus d'automatisation, avant de présenter les manques et nos objectifs.

Dans la deuxième partie, nous étudions expérimentalement l'effet de l'intervention proprioceptive sur la lecture orale et silencieuse dans la dyslexie développementale. Nous étudions l'effet de l'intervention proprioceptive sur les déficits sensorimoteurs indépendants de la lecture.

1) Nos résultats : confortent l'intérêt de l'intervention proprioceptive dans la dyslexie développementale. Pour l'accès lexical ils montrent en cas d'intervention proprioceptive un niveau similaire vis-à-vis des normo-lecteurs ($F(1,25) = 1.91, p = 0,18$) ce qui n'est pas le cas

sans l'ajout d'une intervention proprioceptive ($F(1.25) = 13.34, p = 0,002$). De même les valeurs sont similaires pour l'effet de fréquence des mots de haute fréquence, en cas d'intervention proprioceptive vis-à-vis des normo-lecteurs ($F(1.25) = 1.19, p > 0.28, \eta^2 = 0.05$), ce qui n'est pas le cas en cas d'absence d'intervention proprioceptive ($F(1.25) = 14.3, p < 0.0009, \eta^2 = 0.57$), cela reflète une amélioration de l'automatisation de la lecture. 2) Nos résultats montrent l'effet de l'intervention proprioceptive dans les différentes étapes des processus d'automatisation du couple perception-action. 3) Nos résultats montrent la présence d'un dysfonctionnement cérébral global sous la forme d'un système dynamique chaotique de complexité non optimale chez les dyslexiques (Kruskal-Wallis ($X^2 = 33,74, p < 0,0001, \epsilon^2 = 0,141$), avec en cas d'intervention proprioceptive l'apparition d'un niveau de complexité similaire aux normo-lecteurs ($p = 0,119$), ce qui n'est pas le cas en cas d'intervention orthophonique seule ($p < 0,0001$).

Malgré leurs limites, nos résultats semblent valider et confirmer l'implication des processus d'automatisation sensorimoteurs dans la dyslexie, avec la confirmation d'un lien de causalité de l'effet de stimulation proprioceptive sur l'amélioration des compétences de lecture des enfants dyslexiques. Ces résultats ouvrent des pistes de compréhension et d'intervention sur la dyslexie développementale et doivent être répliqués et confrontés expérimentalement.

ABSTRACT

Developmental dyslexia is a pathological disorder affecting the learning of reading with no explanatory cause, which resists intervention and is recognised as a disorder of reading automation. Developmental dyslexia is a disability whose cause remains a mystery to this day. The literature is extremely rich and describes a wide range of deficits.

One therapeutic approach, proprioceptive intervention, aims to correct proprioceptive dysfunction. Proprioceptive dysfunction manifests itself in the form of multisensory integration deficits with perceptual and spatial consequences and alterations in muscle tone distribution, associated with impaired REM sleep due to numerous micro-awakenings. The INSERM report (2016) evaluating proprioceptive intervention in developmental dyslexia was unable to reach a conclusion and suggested that further work be carried out.

The phonological theory of a single cognitive deficit considers that the sensorimotor deficits observed are comorbidities resulting from a lack of reading practice. The sensorimotor theories of temporal, magnocellular and cerebellar theories consider that sensorimotor deficits are involved in the processes of reading automation in developmental dyslexia.

Are reading automation disorders in developmental dyslexia due to a deficit in sensorimotor automation processes, or are they independent of sensorimotor automation processes?

In the first part, we present the various deficits and theories of developmental dyslexia, whose variety and diversity suggest a global brain dysfunction. We discuss the role of proprioception in the perception-action couple involved in automation processes, before presenting the gaps and our objectives.

In the second part, we experimentally study the effect of proprioceptive intervention on oral and silent reading in developmental dyslexia. We study the effect of proprioceptive intervention on sensorimotor deficits independent of reading.

Our results: 1) confirm the value of proprioceptive intervention in developmental dyslexia, as they show a similar level of lexical access to that of normal readers in cases of proprioceptive intervention ($F(1,25) = 1.91, p = 0.18$), which is not the case without the addition of

proprioceptive intervention ($F(1.25) = 13.34$, $p = 0.002$). Similarly, the values are similar for the frequency effect of high-frequency words, in the case of proprioceptive intervention compared to normal readers ($F(1.25) = 1.19$, $p > 0.28$, $\eta^2 = 0.05$), which is not the case in the absence of proprioceptive intervention ($F(1.25) = 14.3$, $p < 0.0009$, $\eta^2 = 0.57$), reflecting an improvement in reading automation. 2) Our results show the effect of proprioceptive intervention in the different stages of the perception-action automation process. 3) Our results show the presence of global brain dysfunction in the form of a chaotic dynamic system of suboptimal complexity in dyslexics (Kruskal-Wallis ($X^2 = 33.74$, $p < 0.0001$, $\epsilon^2 = 0.141$), with the appearance of a level of complexity similar to that of normal readers in the case of proprioceptive intervention ($p = 0.119$), which is not the case with speech therapy intervention alone ($p < 0.0001$).

Despite their limitations, our results seem to validate and confirm the involvement of sensorimotor automation processes in dyslexia, with confirmation of a causal link between proprioceptive stimulation and improved reading skills in dyslexic children. These results open up new avenues for understanding and intervening in developmental dyslexia and need to be replicated and tested experimentally.

PUBLICATIONS et COMMUNICATIONS

Communication écrite :

- Virlet L., Sparrow L., Barela J., Patrick Berquin P., Bonnet C. (2024). Proprioceptive intervention improves reading performance in developmental dyslexia: an eye-tracking study. *Research Developmental Disabilitee*.
<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2024.104813>
- Virlet, L., Sparrow, L., Berquin, P., & Bonnet, C. (2024, juillet). 3322 Proprioceptive intervention stabilizes the chaos of a non-linear system in dyslexic children, ICP Oral Presentation, Int J Psychol, 59: 230-274. <https://doi-org/10.1002/ijop.13175>
- Virlet L. Nassir Messaadi, Laurent Sparrow, Cédric Bonnet. Labilité référentielle d'origine centrale et trouble spécifique des apprentissages du langage et des apprentissages (Prévalence, coefficient de corrélation) Neurophysiologie Clinique :49 ;6, p419, déc 2019

Communication orale :

- Virlet L., Barela J., Sparrow L., Afigueiredo G., M Guillaume M., Berquin P., Bonnet C. Proprioceptive intervention stabilizes the chaos of a non-linear dynamic system in dyslexic children. ICP, Prague 2024.
- Virlet L., Barela J., Figueiredo J., Sparrow L. Berquin P. Bonnet C. Le contrôle moteur influence la vitesse de lecture chez les enfants dyslexiques. Étude Pilote. SOFPEL 29^o Congrès, Rouen, 2023
- Virlet L. Multisensory integration and automation of lecture, UNESP Barau, Université d'état de Sao Paulo, Brésil Aout . 2023
- Virlet L. Sparrow L. Bonnet C. Correction of altered cross-modal processing correlates with improved reading ability in dyslexic children. A pilot study. European Congress of Psychology Ljubljana juillet 2022.
- Virlet L. Sparrow L. Bonnet C. Randomized comparative study of the management of dyslexia: speech therapy, versus, Proprioceptive and Speech therapy SENP Lausanne, mars 2022.
- Virlet L. Sparrow L. Bonnet C. Effet de l'obtention d'une stabilisation référentielle d'un syndrome de déficience posturale sur les mécanismes d'automatisation de la lecture des enfants dyslexiques. SOFPEL 27^o congrès, Lille, décembre 2021

- Virlet L. Sparrow L. Bonnet C. Evaluation of the proprioceptive management of dyslexia developmental. Randomised Study, 32 congress of International Congress of Psychology Prague, 2020+21, Juillet 2021.
- Virlet L. Randomized comparative study of the management of dyslexia: speech therapy, versus, Proprioceptive and Speech therapy SENP Lausanne, Postponed mars 2022.
- Virlet L. Labilité référentielle d'origine centrale et trouble spécifique des apprentissages du langage et des apprentissages. (Prévalence, coefficient de corrélation) SOFPEL 26°congrès, Montréal Canada, 2019

Poster commenter :

- Virlet L., Barela J., Figueiredo J., Sparrow L., Bonnet C., Patrick Berquin P. Taches de Maxwell, contrôle moteur, vitesse de lecture chez les enfants dyslexiques. Étude pilote. 33° Congrès de la Société Française de Neurologie Pédiatrique, Rennes 2024
- Virlet L., Barela J., Figueiredo J., Sparrow L. Berquin P., Bonnet C. Taches de Maxwell, contrôle moteur chez les enfants dyslexiques. Étude pilote. Étude Pilote. SOFPEL 29° Congrès, Rouen, 2023
- Virlet L. Sparrow L., Bonnet C. In dyslexic children, the addition of proprioceptive treatment improves reading ability. Randomised pilot study. Psycholinguistique In Flanders, Ghent (Belgique) 2023
- Virlet L. Sparrow L. Bonnet C. In dyslexic children, the proprioceptive therapy improves cross-modal processing and reading abilities. 22e Conférence of the European Society for Cognitive Psychology, Lille Juin 2022.
- Virlet L. Sparrow L. Bonnet C. Evaluation of the proprioceptive management of developmental dyslexia: A randomised Study, Annual Meeting 2021, Society for the Scientific Study of Reading, Lancaster University, UK, Juillet 2021
- Virlet L. Sparrow L. et all, Étude préliminaire comparative randomisé de la prise en charge de la dyslexie : Proprioceptive et orthophonique versus orthophonique. Preuve de supériorité. 30°congrès de la société française de neurologie pédiatrique, Toulouse janvier 2020.
- Sparrow L. Virlet L. et all, Remédiation proprioceptive et orthophonique de la dyslexie : évaluation par mesure oculométriques. 30°congrès de la société française de neurologie pédiatrique, Toulouse janvier 2020.

FINANCEMENTS

Ce travail a été soutenu par la Fédération de recherche en sciences visuelles et cultures (FR CNRS 2052 SCV) et par une aide financière de l'Agence nationale de la recherche française dans le cadre du programme Investissement d'avenir (référence : ANR-21-ESRE-0030 – Equipex+ Continuum).

Ce travail a été soutenu par une bourse CAPES-COFECUB (ID CAPES-COFECUB : Ma 1005 / 23 ; ID Campus France : 49556YD).

Pour l'étude PROPHODYS l'achat des lunettes et des semelles nécessaires à ce travail a été financé par des dons de l'association « Collectif PEPS », aujourd'hui dissoute.

TABLES DES MATIERES

Introduction, avant-propos.....	18
PARTIE 1 : INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	20
Chapitre 1- Les différents déficits observés dans la dyslexie développementale.	26
a- Déficit phonologique.....	26
b- Déficits temporels.....	26
c- Déficit des contrastes magnocellulaires.....	27
d- Déficit de l'automatisation ou déficit cérébelleux.....	27
e- Déficits attentionnels	28
f- Déficits de la mémoire	29
g- Altérations du sommeil	31
h- Système dynamique chaotique et dyslexie développementale	33
i- Symétrie des centroïdes de Maxwell.....	33
j- Dysfonction proprioceptive.....	34
Chapitre 2- Les principales théories explicatives	34
a- La théorie phonologique.....	34
b- La théorie temporelle.....	35
c- La théorie magnocellulaire.....	36
d- La théorie cérébelleuse de l'automatisation.....	36
Chapitre 3- Rôle de la proprioception, du couple perception-action dans les processus d'automatisation et du système dynamique chaotique	37
I) Description de la proprioception	37
a- La proprioception.....	37
b- Niveau d'action de la proprioception.....	38
c- Les chaînes proprioceptives.....	39
d- La proprioception : référence spatiale et illusion.....	39
e- La proprioception : le sens premier.....	40
f- La proprio. de la représentation symbolique à la reconnaissance des lettres	40
II) Le couple Perception-Action, automatisation	42
1 ^{ère} étape : L'intégration multisensorielle.....	43
2 ^e étape : La prédiction motrice	44
3 ^e étape : Détection et correction des erreurs	44
4 ^e étape : Les schèmes moteurs et modèles internes	44
5 ^e étape : La consolidation du sommeil paradoxal.....	45
III) Système dynamique chaotique	46
Chapitre 4- Constats, manques, objectifs et hypothèses.....	47
a- Constats.....	47
b- Manques de connaissances scientifiques	50
c- Questions	52
d- Objectifs.....	52
e- Hypothèses générales.....	53
PARTIE 2 : MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE & EXPÉRIMENTATIONS	
<u>Plan méthodologique et expérimental</u>	<u>55</u>
Chapitre 5- Dysfonction proprioceptive	56
a- La dysfonction proprioceptive	56

1- Historique.....	56
2- Physiopathologie de la dysfonction proprioceptive.	56
3- Symptomatologie.....	57
4- Formes cliniques de la dysfonction proprioceptive.....	60
b- Mécanisme de l'intervention proprioceptive.....	60
d- Effets de l'intervention proprioceptive	61
Chapitre 6- ÉTUDE PROPHODYS.	63
Introduction.....	63
Méthodologie étude PROPHODYS.....	65
Résultats	76
Indice Maddox proprioceptif (IMP)	76
Indice de scotomes visuels (ISV)	77
Performance en lecture orale.....	78
Performance en lecture silencieuse, analyse des mouvements oculaires....	78
Discussion	83
Chapitre 7- ÉTUDE NOSYDYS.	90
Introduction.....	90
Méthodologie étude NOSODYS.....	93
Résultats.....	99
Analyse linéaire de la distance parcourue.....	99
Analyse non linéaire de la distance parcourue (α -DFA).	100
Discussion.....	102
Chapitre 8- ÉTUDE MAXWEL-CO-LE.	106
Introduction.....	106
Méthodologie étude MAXWELL-CO-LE.....	108
Résultats.....	114
1) Les tâches de Maxwell TM (TMO qualitatives, TMF)	114
2) Les tâches de Maxwell TMO calculées.....	115
3) Évolution du temps de lecture.....	115
Discussion.....	116
<u>PARTIE 3 : DISCUSSION GÉNÉRALE</u>	121
Hypothèse 1.....	122
Hypothèse 2.....	125
Hypothèse 3.....	126
Hypothèse 4.....	128
Modèle dynamique chaotique de la dyslexie développementale	129
Limitations de ce travail de thèse.....	132
Synthèse	134
Conclusion.....	136
Bibliographie	137
Annexes	
Annexe 1 : Virlet et al., 2024.....	172
Annexe 2 : Proprioc. et dysproprioc. de la physiologie au tableau clinique	183

<u>Liste des figures</u>	Page
Figure 1. Système multi composant cognitif, de la mémoire de travail	30
Figure 2. Couple Perception-Action et automatisation d'après Censor (2012)	45
Figure 3. Déficits observés chez les dyslexiques... couple Perception-Action	48
Figure 4. Effets de l'intervention proprioceptive sur les différentes étapes du couple perception-action	49
Figure 5. Intervention proprioceptive	61
Figure 6. Intervention proprioceptive	69
Figure 7. Manœuvre de Convergence Podale (MCP) d'après Gaggey.	72
Figure 8. Test de Maddox Proprioceptif (Quercia et al., 2015)	73
Figure 9. Maddox Perceptif	74
Figure 10. Valeurs individuelles de l'indice Maddox Proprioceptif (IMP)	76
Figure 11. Valeurs individuelles de l'indice de Scotomes visuels (ISV)	77
Figure 12. Exemple de mouvement oculaire représentatif	78
Figure 13. Moyenne et erreur standard de la DPF	79
Figure 14. Moyennes et erreurs standard de la durée du regard	80
Figure 15. Moyenne et erreur standard de l'amplitude des saccades	81
Figure 16. Moyenne et erreur standard de la DR, de l'effet de fréquence	82
Figure 17. Système Liberty 240/8-8 System	94
Figure 18. Lunette Core Pupil Labs de face et de Profil.	95
Figure 19. Pupil Labs CORE, porté (image libre de droit)	95
Figure 20. Tâches de fixations d'une croix, fond d'écran	96
Figure 21. Tâches de visualisation libre ou de recherche d'objets	97
Figure 22. Positionnements des pieds selon la recommandation de McIlroy & Maki	97
Figure 23. Représentation de la distance parcourue d'un capteur, par la ligne verte.	98
Figure 24. Analyse linéaire de la distance parcourue en cm (à gauche) en et analyse non linéaire (α -DFA) (à droite)	101
Figure 25. Test de Worth	109
Figure 26. Observation au Fovéascope de la Tache de Maxwell gauche	110
Figure 27. État de symétrie des Taches de Maxwell et dyslexie	110
Figure 28. Manœuvre de convergence podale	111
Figure 29. Lentille floutée	111
Figure 30. TMF à l'état de base avec une asymétrie du tonus musculaire	111

Figure 31. Œil Droit lentille flouté : Symétrisation de la distribution du tonus musculaire, car crée une asymétrie des TMF.	112
Figure 32. Œil Gauche lentille flouté : Symétrisation de la distribution du tonus musculaire, car crée une asymétrie des TMF	112
Figure 33. Temps de lecture en ms en pré et post test (à gauche), réduction du temps de lecture en pourcentage (à droite)	115
Figure 34. Effet de l'intervention proprioceptive sur les différentes étapes du couple Perception-Action.	127
Figure 35. _Modèle dynamique non-linéaire de la dyslexie développementale.	130

<u>Liste des tables</u>	Page
Tables 1. Questionnaire d'évaluation du risque de dyslexie développementale chez les enfants.	59
Tables 2. Flow, and Experimental groups (ProPhoDys)	66
Tables 3. Caractéristiques des groupes de participants (ProPhoDys)	67
Tables 4. Évaluation des performances en écart-type de l'indice C du test de l'Alouette R.	77
Tables 5. Tableau descriptif par groupe (NOSODYS)	93
Table 6. Résultats du Contrôle moteur à la MCP (à gauche), et de la TMF (à droite), pour les participants normo-lecteurs et dyslexiques.	114
Table 7. Résultats des TMF Observées, pour les participants normo-lecteurs et dyslexiques.	114

Liste des abréviations et de leurs significations (ou leurs traduction)

AS : Amplitude des Saccades

BF : Basse Fréquence

CER : Comité d'Éthique de la Recherche

CIM-10 : Classification Internationale des Maladies, 10^e révision

DFA : Detrended Fluctuation Analysis, analyse des fluctuations tendantielles

DFT : Durée de Fixation Totale

DPF : Durée Première Fixation

DR : Durée du Regard

DSM-V: Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, 5e revision

EEG : électroencéphalogramme

FCI : Fixation d'une croix sur une image fond

FCW : Fixation d'une croix sur un écran blanc

FFDys : Fédération Française des DYS

HF : Haute Fréquence

HVL : Hétérophorie Verticale Labile

IMP : Indice Maddox Proprioceptif

INSERM : Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale

ISV : Indice Scotomes Visuels

LTM : Mémoire à long Terme

MCP : Manoeuvre de Convergence Podale

MCP 3D : Manœuvre de Convergence Podale suivant les 3 dimensions dans l'espace.

OI : Observation libre de l'image

QIT : _Quotient Intellectuel Total

SEI : Recherche d'objets dans une image

ST : Speech Therapy (Intervention orthophonique)

TDAH : Trouble du Déficit de l'Attention avec ou sans Hyperactivité

TDC : Trouble Développementale de la Coordination

TMF : Taches de Maxwell Fonctionnelles

TMO : Taches de Maxwell Observées

PST : Proprioceptive & Speech Therapy (Intervention orthophonique & Proprioceptive)

Introduction et avant-propos

La dyslexie développementale est un trouble pathologique de l'apprentissage de la lecture caractérisé par sa résistance aux interventions, elle est reconnue comme un trouble de l'automatisation de la lecture. La dyslexie est l'incapacité de développer des procédures automatiques d'identification des mots écrits, cette difficulté, inattendue vu l'âge et les autres habiletés cognitives des dyslexiques, n'étant pas la conséquence de troubles sensorimoteurs, pour l'International Dyslexia Association (2005) (Inserm, 2007). La cause de la dyslexie à ce jour est un mystère. La littérature est extrêmement riche avec plus de 11 903 publications sur PubMed en 60 ans avec les mots-clés « Developmental dyslexia » (21/06/25). La littérature met en évidence chez les personnes avec une dyslexie développementale de nombreux déficits, et de nombreux débats théoriques existent, avec quatre théories principales, qui vont de la présence d'un déficit cognitif unique à la présence de déficits sensori-moteurs pour expliquer les troubles de l'automatisation. L'objet de ce travail de thèse, est d'évaluer l'intérêt de l'intervention proprioceptive qui vise à corriger une dysfonction proprioceptive chez les dyslexiques développementaux. Une dysfonction proprioceptive s'exprime par la présence de troubles de l'intégration multisensorielle avec des conséquences perceptives, spatiales, et de la distribution du tonus musculaire, associés à une altération du sommeil paradoxal. L'intervention proprioceptive vise à corriger ces troubles d'intégration multisensorielle et l'altération du sommeil paradoxal que présenteraient les patients avec une dyslexie développementale. Des études semblent indiquer l'utilité de l'intervention proprioceptive pour améliorer la lecture dans la dyslexie développementale. Mais le rapport de l'INSERM de l'évaluation de l'intervention proprioceptive dans la dyslexie développementale (Gueguen et al., 2016) n'a pas définitivement tranché sur le bénéfice certain de cette intervention proprioceptive et suggérerait la réalisation de travaux complémentaires, d'où ce travail de thèse.

Dans la première partie nous présentons les différents déficits étudiés à ce jour chez les patients avec une dyslexie développementale, dont l'ampleur et la diversité font évoquer un dysfonctionnement cérébral global. Nous présentons ensuite les différentes théories principales de la dyslexie développementale et nous définissons plus particulièrement la dysfonction proprioceptive chez les dyslexiques ainsi que l'intervention proprioceptive. Puis nous évoquons l'implication du couple perception-action dans les processus d'automatisation avant de présenter les manques et nos objectifs. Les déficits sensorimoteurs observés sont-ils le produit d'un déficit cognitif unique de la conscience phonologique, ou sont-ils impliqués dans les processus d'automatisation de la lecture ?

Dans la deuxième partie, nous étudions expérimentalement l'effet de l'intervention proprioceptive sur la lecture des sujets avec une dyslexie développementale. Puis nous étudions l'effet de l'intervention proprioceptive chez les personnes ayant une dyslexie développementale sur les déficits sensorimoteurs indépendants de la lecture. Nous caractérisons ensuite ce dysfonctionnement cérébral global avant d'écrire la discussion générale. Dans la discussion nous aborderons des éléments expérimentaux et scientifiques qui conforteront ou non l'intérêt de l'intervention proprioceptive dans la dyslexie développementale, et qui permettront d'essayer de donner un sens aux multiples déficits observés dans la dyslexie développementale et d'appréhender un éclairage sur les mécanismes de l'intervention proprioceptive. De là, et malgré les limites nous proposerons un modèle.

Pour faciliter la lecture de ce mémoire, quand nous parlerons des personnes, des sujets, des participants ou des patients ayant une dyslexie développementale, nous utiliserons le seul terme « dyslexique », quand nous parlerons du trouble nous utiliserons les termes « dyslexie développementale ».

-

PARTIE 1 : INTRODUCTION GÉNÉRALE

La dyslexie développementale est un trouble pathologique de la lecture reconnu comme un handicap du fait de sa résistance à toute intervention (scolaire ou rééducative) (Snowling et al., 2020 ; Snowling & Hulme, 2024 ; Toffalini et al., 2021), sans cause explicative d'ordre sensoriel visuel ou auditif, d'ordre neurologique, psychiatrique, environnemental ou éducationnel, qui survient chez des enfants d'intelligence normale.

À ce jour la dyslexie développementale impacte la vie de 2 à 15% d'une classe d'âge en fonction de la langue. Elle est reconnue comme un trouble de l'automatisation de la lecture (Nicolson & Fawcett, 1990 ; Smith-Spark & Gordon, 2022). L'automatisation de la lecture consiste à passer d'un processus conscient de décodage, coûteux en attention et lent, à un processus rapide inconscient, sans coût attentionnel et que je ne peux pas inhiber. Par exemple lorsque la lecture est automatisée, si nous voyons un mot nous ne pouvons pas « ne pas le lire ». La dyslexie serait donc l'incapacité de développer des procédures automatiques d'identification des mots écrits, cette difficulté, inattendue vu l'âge et les autres habiletés cognitives des dyslexiques, n'étant pas la conséquence de troubles sensorimoteurs, pour l'International Dyslexia Association (2005) (Inserm, 2007). Une autre notion est importante, c'est celle de la comorbidité. Par exemple, la présence d'une dyslexie développementale avec un Trouble Développementale de la Coordination (TDC) est de l'ordre de 27% des cas (Marchetti et al., 2022). Cependant en cas de présence d'un TDC la comorbidité avec une dyslexie développementale varie de 56 à 70% (O'Hare & Khalid, 2002 ; Regehr & Kaplan, 1998), ce qui est largement supérieur au pourcentage attendu de comorbidité en cas d'indépendance entre la dyslexie développementale et la TDC. Ce constat pose immédiatement la question de la présence dans la dyslexie développementale d'un déficit cognitif unique ou d'un déficit multiple posé par Pennington (2006).

La dyslexie développementale a été identifiée par Oswald Berkhan en 1881 (Berkhan, 1917). Depuis sa première évocation en 1877 par Adolf Kussmaul médecin allemand sous le terme de la « Wortblindheit » (Cécité des mots) (cité dans Johnson et al., 2009) la cause de la dyslexie développementale reste un mystère et fait l'objet de nombreuses recherches et débats. Elle fut dénommée « dyslexie » par le Dr Rudolf Berlin en 1887 (Berlin, 1887 ; Wagner, 1973), devant l'absence de lésions neurologiques impliquées contrairement à l'alexie décrite par Broca (Tate et al., 2014). Dès 1880, Oswald Berkhan (1917) évoqua la notion de déficience congénitale de la lecture. Le premier cas clinique fut décrit par Pringle Morgan en 1897, devant l'observation d'une discordance entre les capacités de lecture et l'intelligence du sujet en l'absence de troubles sensoriels. Ce qui révoquait une problématique de débilité. La dyslexie

fut très rapidement décrite non pas comme un trouble sensoriel de la vision, mais comme un trouble de la perception visuelle d'origine centrale (Hinshelwood, 1917 ; Behan, 2001).

La principale contribution du Dr Samuel Orton dans le domaine de l'éducation, en cas de dyslexie développementale, a été le concept d'enseignement "multisensoriel", qui intègre des stratégies d'apprentissage kinesthésiques (basées sur le mouvement) et tactiles (basées sur les sens) à l'enseignement de concepts visuels et auditifs (Gillingham & Stillman, 1946). Secondairement la dyslexie développementale fut considérée comme un trouble de perception auditive, support de la théorie d'un déficit phonologique de la dyslexie développementale (Vellutino, 1979, 1987).

La définition de la dyslexie la plus utilisée est la DSM-5 (APA, 2013, version 2022). La DSM-5 définit la dyslexie développementale comme des troubles spécifiques du langage et des apprentissages du langage écrit (APA, 2013, version 2022) :

- Ces troubles sont affirmés par des outils d'évaluation standardisés révélant des scores déficitaires en référence aux normes attendues pour l'âge ;
- Ils sont spécifiques, ne pouvant pas être entièrement expliqués ni par une autre pathologie sensorielle (surdité, vision), neurologique (lésions cérébrales innées ou acquises), intellectuelle ou psychiatrique (troubles du développement de la personnalité, de la sphère émotionnelle et/ou comportementale), ni par un manque d'apport socioculturel ;
- Ils sont durables, persistant depuis au moins 6 mois en dépit d'une prise en charge individualisée et d'une adaptation pédagogique ciblée ; ils persistent tout au long de la vie ;
- Ils sont présents dès les premières étapes du développement, mais ils peuvent se manifester plus tardivement (lorsque l'enfant n'arrive plus à mettre en place des stratégies de compensation de son trouble) ;
- Ils interf  rent de façon significative avec la réussite scolaire, le fonctionnement professionnel ou les activités de la vie courante.

Il existe d'autres définitions telles que la définition de consensus de la dyslexie adoptée par « The International Dyslexia Association » (Lyon et al., 2003) « *La dyslexie est un trouble spécifique de l'apprentissage d'origine neurobiologique. Elle se caractérise par des difficultés à reconnaître les mots avec précision et/ou fluidité et par de faibles capacités d'orthographe et de décodage. Ces difficultés résultent généralement d'un déficit de la*

composante phonologique du langage qui est souvent inattendu par rapport à d'autres capacités cognitives et à l'efficacité de l'enseignement en classe. Les conséquences secondaires peuvent inclure des problèmes de compréhension de la lecture et une expérience réduite de la lecture qui peut entraver l'enrichissement du vocabulaire et des connaissances de base ». Cette définition fait l'objet d'un nouveau cycle de réflexion, proposé par l'association internationale de la dyslexie, présenté dans la revue *Annal of Dyslexia* (2024). En effet, elle ne prend pas en compte, entre autres, les notions de persistance, de comorbidité, ou d'automatisation qu'il serait peut-être pertinent d'introduire. (Odegard et al., 2024 ; Snowling & Hulme, 2024).

Entre physiologistes, psychologues ou linguistes, il existe des variations sémantiques ou de traduction pour aborder l'étude des mécanismes impliqués dans l'apprentissage de la lecture des enfants dyslexiques. Pour éviter toute confusion dans la suite du texte nous parlerons de « trouble » pour les pathologies cliniques de dyslexie développementale, de trouble développemental de la coordination etc. et nous parlerons de « déficit » en cas de différence significative expérimentale entre les sujets ayant une dyslexie développementale et les normo-lecteurs. Exemple de déficit : visuel, auditif, proprioceptif, de la mémoire de travail, de double tâche, attentionnel etc. Cette différence est importante, car elle permet par exemple de distinguer un enfant dyslexique avec des déficits attentionnels, d'un enfant dyslexique avec la présence comorbide de Troubles De l'Attention avec ou sans Hyperactivité (TDAH).

Une deuxième difficulté sémantique est la notion de « spécifique ». Dans un premier temps, elle fut utilisée pour préciser que la difficulté n'était pas liée à un défaut sensoriel, d'intelligence ou de défaillance éducative ou affective, mais bien spécifiquement à un défaut des mécanismes d'apprentissage de la lecture. Dans un deuxième temps, elle fut utilisée dans les définitions, dont celle de l'Organisation Mondiale de la Santé de la CIM-10 (WHO, 1992), non pas en référence à une difficulté d'apprentissage, mais spécifiquement à la difficulté de l'apprentissage de la lecture, par « opposition » aux autres apprentissages tels que la dyscalculie, la dyspraxie, etc. Elle serait alors secondaire à un double besoin : 1) médical d'identifier et de préciser une pathologie, 2) scientifique de circonscrire l'approche sur un aspect précis tel que la lecture, ou les fonctions mathématiques. Nous utiliserons le terme « spécifique » dans la notion première d'un trouble spécifique à l'apprentissage, c'est-à-dire hors de toute cause explicative d'un trouble sensoriel, neurologique, psychiatrique, psychologique, éducationnel ou de déficit intellectuel.

La troisième difficulté vient du terme « conscience » dans l'expression de la « conscience phonologique », qui évoque alors les processus cognitifs de représentation

symbolique. Pourtant, pour Sprenger-Charolles c'est une traduction incorrecte du terme « aware » car l'anglais distingue la notion « aware », et « conscious », ce qui ne serait pas le cas du français. « Phonemic awareness » serait la capacité d'isoler les phonèmes dans un item (Sprenger-Charolles, 2017), ce qui définit plus une capacité, ou habileté, mais cela n'évoque donc pas la notion de conscience d'un processus cognitif des représentations symboliques, le terme « habileté phonologique » est donc plus approprié.

Une autre difficulté sémantique est la notion de « boucle phonologique » du modèle multi composant de la mémoire de travail de Baddeley (2012), qui renvoie à la notion de conscience phonologique d'une représentation symbolique. Pourtant Hitch & Baddeley ont proposé que la mémoire à court terme soit une composante de la mémoire de travail et ils précisaient « *Nous avons caractérisé la mémoire à court terme comme une « **boucle articulatoire** » dans laquelle l'information stockée se décompose rapidement, mais peut-être rafraîchie par une répétition subvocale. Nous avons supposé que la répétition d'une petite charge de mémoire dans cette « boucle phonologique » (comme on l'appelle maintenant) ... » (Hitch & Baddeley, 2024). Le propos de Hitch & Baddeley est clair, la boucle phonologique est un processus articulatoire sensorimoteur. Ils précisent plus loin que la fonction principale de la mémoire tampon est de fournir un pont entre les flux rapides de données perceptives ou motrices et les représentations internes. Je ne peux m'empêcher personnellement de me poser la question de la différence, en tant que processus cognitif, entre la représentation interne d'une fonction verbale et la représentation du corps en action du schéma corporel et des modèles internes d'une fonction motrice (Assaiante, 2022).*

D'autant que la lecture est une exaptation de seulement 5 000 ans du fonctionnement du cerveau (Iacoboni, 2008), tandis que le développement cérébral porte sur plus de 400 millions d'années.

La dernière difficulté sémantique dans l'étude de la dyslexie est de faire la part entre ce qui est un processus (mécanisme impliqué) et ce qui est un produit (un symptôme). Par exemple le débat sur la définition du développement moteur : soit le développement moteur peut-être défini comme un changement dans le temps du comportement moteur, l'accent est mis alors sur la performance motrice (c'est-à-dire le produit), soit le développement moteur peut-être défini comme un processus, l'accent est mis alors sur les mécanismes sous-jacents du changement. Dans le cadre du développement moteur, la définition devrait inclure à la fois le produit et le processus de changement (Clark & Whittall, 1989).

Laprevotte et al., (2017) a repris la question posée par Pennington (2006) de savoir si les troubles de la perception visuelle et auditive sont des causes ou des comorbidités de la dyslexie développementale. « *Les deux sens étant fortement impliqués dans la lecture, les théories*

cognitives soutiennent que les déficiences sensorielles sont des comorbidités résultant d'un manque de pratique de la lecture. Les théories sensorielles soutiennent pour leur part que ce sont les déficiences de perception sensorielles qui sont à l'origine des difficultés de lecture ».

La théorie cognitive de la conscience phonologique d'un déficit unique considère que les déficits sensorimoteurs observés sont des comorbidités qui résultent d'un manque de pratique de la lecture (Goswami, 2015 ; Ramus et al., 2003). Les théories sensorimotrices temporelles, magnocellulaires et cérébelleuses considèrent que les déficits de perception sensorimoteurs sont impliqués dans les processus d'automatisation de la lecture à l'origine des difficultés de lecture chez les dyslexiques.

Les principales théories explicatives de la dyslexie développementale au regard des processus du contrôle moteur peuvent être distribuées en produit pour la théorie phonologique, ou un processus pour les théories temporelles, magnocellulaires et cérébelleuses.

Mais les principales théories décrites dans la dyslexie développementale n'intègrent pas de nombreux déficits ou altérations observés chez les dyslexiques tels que les déficits de l'attention, les déficits de la mémoire, les altérations du sommeil, la présence de système dynamique chaotique en phase instable, et la dysfonction proprioceptive.

Les processus d'intégration multimodale, ou d'intégration multisensoriels semblent jouer un rôle important, car ils sont abordés par les théories temporelles, magnocellulaires, attentionnelles et dans la dysfonction proprioceptive et, comme nous le verrons, ils sont l'une des deux cibles de l'action de l'intervention proprioceptive.

La question sous tendue est de savoir si les troubles de l'automatisation de la lecture de la dyslexie développementale sont dus à un déficit des processus d'automatisation sensorimoteurs décrits par les neurophysiologistes qui reflètent l'évolution du développement cérébral, ou est-ce que les troubles de l'automatisation de la lecture sont indépendants des processus d'automatisation sensorimoteurs, ce qui sous-entend de décrire les nouveaux processus mis en place pour développer et automatiser la lecture. Ce que nous pouvons résumer par la question suivante :

La lecture est-elle une évolution par exaptation des processus sensorimoteurs, ou un bond de l'évolution indépendant des processus connus ? Cette dernière hypothèse serait étonnant au regard de la théorie motrice de la perception de la parole (Liberman & Mattingly, 1985).

Mon approche dans ce travail de thèse porte sur l'interrogation de l'existence d'une dichotomie entre les fonctions cognitives langagières et les fonctions sensorimotrices. Elle s'inscrit plus dans un continuum de la cognition incarnée (Price et al., 2012 ; Thompson, 2010 ;

Versace et al., 2018). La cognition incarnée conçoit l'esprit comme indissociable du corps et de ses interactions avec l'environnement. D'où l'importance du rôle des interactions corps-environnement et des mécanismes sensorimoteurs dans la mise en place des processus cognitifs. Pour Thompson (2010), la cognition émerge de l'interaction entre le corps, l'environnement et le cerveau, impliquée dans la formation de nos pensées et de nos perceptions. De plus Price et al., (2012) montre que les variables corporelles peuvent affecter entre autres les émotions. Enfin Versace et al. (2018) souligne l'interdépendance entre la perception et l'action dans la construction de notre réalité cognitive.

Chapitre 1- Les différents déficits observés dans la dyslexie développementale

Nous avons réalisé une revue succincte et non exhaustive de la littérature des faits significatifs observés chez les sujets avec une dyslexie développementale qui sont tous sources de débats.

a- Déficit phonologique

Le déficit phonologique de la dyslexie développementale (Bishop & Adam, 1990 ; Snowling et al., 1986) est un déficit de l'habileté phonologique des sujets en dehors de la lecture, en particulier de leurs capacités de segmentation phonémique et de la mémoire phonologique à court terme « la boucle phonologique », mais aussi de dénomination rapide des mots. Une altération de leur habileté phonologique viendrait altérer leur capacité à utiliser la voie phonologique de la lecture (Sprenger-Charolles, 2017). La voie phonologique de décodage est décrite dans le modèle de double voie de la lecture, associée à la voie directe lexicale. Elles furent toutes deux déterminées par l'étude de dyslexie acquise chez l'adulte avec des lésions organiques (Colthaert et al., 2002 ; Rapcsak et al., 2009). L'étude du déficit phonologique dans la dyslexie développementale découle du constat d'échec du transfert en pratique clinique des différentes théories (perceptives, transfert inter hémisphérique...). Elle découle aussi du constat que l'alphabétisation dépend du langage (Vellutino, 1979) et que seul un enseignement correctif direct et précoce pourrait aider les enfants dyslexiques. Cela en pratiquant un tutorat individuel intensif de lecture, équilibré avec des approches holistiques/sens et analytiques/phonétique et associé à un programme d'enrichissement du langage (Vellutino, 1987).

b- Déficits temporels

Les déficits temporels de la dyslexie développementale mettent en évidence l'altération des capacités de discrimination auditive d'ordre temporel (Tallal, 1973), ce qui bien évidemment ne peut qu'impacter la reconnaissance des phonèmes du langage oral nécessaire à la conscience phonologique. Les tâches de jugement d'ordre temporel chez les dyslexiques n'impliquent pas seulement les stimuli auditifs, mais aussi les stimuli d'ordre visuel, d'ordre tactile (Laasonen et al., 2001, 2002), ou d'ordre rythmique (Bégel et al., 2022). Le paradigme de jugement d'ordre temporel permet d'étudier les déficits attentionnels temporels et spatiaux chez ces sujets (Liddle et al. 2009). Chez eux, les symptômes de déficit attentionnel altèrent le traitement temporel et cela, quel que soit l'hémisphère dans lequel les stimuli sont présentés, ce qui peut s'expliquer aussi bien en termes de difficulté générale de la tâche qu'en termes de facteurs temporels (Skottun et al. 2010).

c- Déficit des contrastes magnocellulaires

Les déficits magnocellulaires (Stein, 2001) ont pour conséquence des difficultés de perception des contrastes, qu'ils soient visuels ou auditifs, avec un impact sur les mécanismes d'intégration multisensorielle, des percepts visuels des graphèmes nécessaires à la reconnaissance des lettres et des percepts auditifs de la reconnaissance des phonèmes pouvant impacter les mécanismes de la lecture des dyslexiques. L'étude post mortem de personnes dyslexiques par Galaburda et al., (1985, 1994, 2002) a montré des anomalies anatomiques des relais sensoriels magnocellulaires au niveau thalamique.

d- Déficit de l'automatisation ou déficit cérébelleux

Nicholson & Fawcett (1990) ont mis en évidence lors de conditions de doubles tâches chez les adultes dyslexiques qu'ils avaient de moins bons résultats d'équilibre en station debout. Une explication plausible de ces résultats est que, contrairement aux témoins, les dyslexiques doivent investir des ressources conscientes importantes pour contrôler l'équilibre, et que leurs performances sont donc affectées par toute tâche secondaire qui a pour conséquence de détourner l'attention de la tâche principale. Ce besoin de "compensation consciente" suggère que, pour les dyslexiques, la capacité d'équilibre moteur est mal automatisée. Il est donc possible que de nombreux déficits de lecture des enfants dyslexiques ne soient que les symptômes d'un déficit d'apprentissage plus général, à savoir l'incapacité à automatiser complètement les compétences.

L'implication de déficits cérébelleux lors de tâches d'automatisation a été montrée chez des adultes dyslexiques lorsqu'ils entreprenaient des tâches connues pour impliquer normalement une activation cérébelleuse. L'analyse par tomographie, par émission de positons, montre alors chez les adultes dyslexiques une activation cérébrale significativement plus faible ($p < 0.01$) que chez les témoins dans le cortex cérébelleux droit et dans le gyrus cingulaire gauche lors de l'exécution de la séquence pré-apprise, et dans le cortex cérébelleux droit lors de l'apprentissage de la nouvelle séquence (Nicolson et al., 1999).

e- Déficits attentionnels

L'étude des mécanismes attentionnels impliqués dans la dyslexie développementale est un sujet extrêmement vaste, en cours d'exploration, mais central du fait de sa transversalité que ce soit structurellement ou fonctionnellement (Kershner, 2021). L'attention est impliquée dans les processus d'intégration multisensorielle (Froesel et al., 2021 ; Kershner, 2021 ; Vitteck et al., 2022) dont la présence chez les dyslexiques de scotomes visuels induits par des sons ou par des vibrations (Quercia et al., 2020). En effet, l'intégration multisensorielle dépend de l'action en cours, de l'état émotionnel, et des capacités attentionnelles du sujet qui vont moduler les voies neurologiques d'intégration multisensorielle au niveau du pulvinar (Cappe et al., 2012 ; Kershner, 2020 ; Froesel et al., 2021). Une altération de l'attention va donc perturber les mécanismes d'intégration multisensorielle qui sont à la source de la perception nécessaire au fonctionnement cérébral, dont les processus phonologiques et de la lecture. L'attention est particulièrement impliquée dans les mécanismes de traitement des informations visuelles précédemment décrits, et dans les troubles visuo-attentionnels chez les dyslexiques, tels que les troubles du déplacement de l'attention visuelle (Facoetti et al, 2003), ou les troubles de l'empan visuo-attentionnel (Bosse et al, 2007). L'attention aurait un rôle central sur la mémoire à court terme du fait du rôle du superviseur attentionnel, qui alloue l'attention portée aux différentes sous-mémoires de la mémoire de travail (Hitch, Allen & Baddeley, 2024). L'attention dépend entre autres de la qualité du sommeil (Yang et al., 2025). Par exemple, la présence d'un syndrome de hautes résistances des voies aériennes supérieures qui provoque de nombreux micro-réveils lors du sommeil paradoxal a pour conséquence une altération de l'attention, de la mémoire procédurale et des apprentissages (Guilleminault & Pelayo, 1998). Les difficultés attentionnelles chez les dyslexiques, se déclinent dans de nombreuses fonctions cognitives, d'ordre visuel, auditif, spatial, temporel, etc. À noter, lors de tâches expérimentales de congruence de mots, il y a une manifestation plus large des différences neurocognitives de type

attentionnel, qu'une simple différence dans le traitement phonologique chez les dyslexiques par rapport aux normo-lecteurs (Egan et al., 2023).

f- Déficits de la mémoire

Les déficits de la mémoire chez les dyslexiques sont impliqués à différents niveaux que ce soit la mémoire de travail ou la mémoire à long terme procédurale (implicite).

Le double rôle de la mémoire de travail : en premier son rôle d'interface entre les représentations internes, verbales de la mémoire à long terme et les informations perceptives et motrices, en second son rôle dans la mise en place de l'automatisation des processus d'apprentissage.

La mémoire de travail fut principalement étudiée par une approche verbale du rôle de la mémoire à court terme dans la cognition par Baddeley & Hitch (1974) avec la proposition d'un modèle multi composant de la mémoire de travail (Baddeley et al., 2019). Dans un premier temps, ce modèle propose un composant d'une mémoire à court terme caractérisé par une boucle articulatoire de stockage de données à court terme pouvant être rafraîchie par une répétition subvocale (Hitch, Allen & Baddeley, 2024). Cette boucle articulatoire fut ensuite dénommée « boucle phonologique », ce qui porte à confusion en occultant son aspect articulatoire donc son aspect sensorimoteur. Dans un second temps, il propose un composant de la mémoire à court terme avec le calepin visuo-spatial. La boucle articulatoire et le calepin visuo-spatial sont considérés comme des composants séparés, ainsi que les composants moteurs, tactiles, et kinesthésiques. Mais ces derniers n'ont pas fait l'objet d'une recherche approfondie (Baddeley et al., 2011 ; Liu et al., 2022). Le dernier élément est le superviseur central (ou exécuteur central) qui distribue les ressources attentionnelles limitées aux différentes sollicitations de la mémoire de travail. Un élément complémentaire a été ajouté : la mémoire tampon (Baddeley, 2000). La mémoire tampon est le pivot central en mettant en lien les informations perceptives et motrices avec les représentations internes de la mémoire à long terme, soit de façon indépendante quand les fonctions sont automatisées, soit sous la dépendance de la répartition des capacités attentionnelles du superviseur central en cas de situation inédite ou non automatisée. La mémoire tampon permet à la cognition de manipuler les différentes représentations internes ou verbales (Hitch, Allen & Baddeley, 2024).

Les dyslexiques présentent une altération de la boucle « phonologique » de la mémoire de travail. Ils présentent aussi une déficience du superviseur central en cas de surcharge dynamique de mise à jour de la mémoire, ce qui est interprété comme une déficience des processus d'automatisation qui impliquent la mémoire implicite (Smith-Spark et al., 2003). Il

existerait au niveau de la mémoire de travail un lien entre les troubles sensorimoteurs et les processus phonologiques, en cas de sortie sensorimotrice altérée cela viendrait altérer la boucle articulatoire des processus phonologiques (Hughes, 2025).

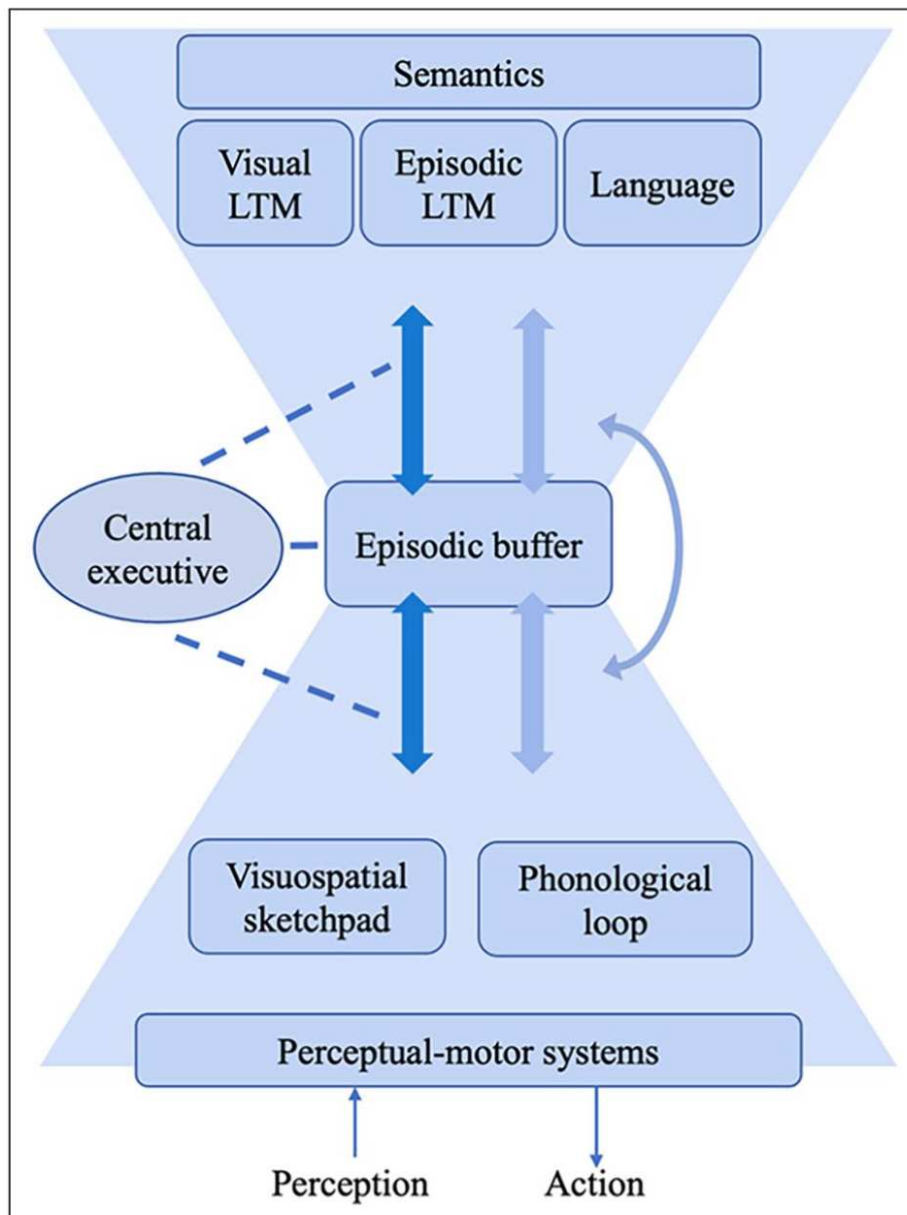


Figure 1. De Hitch, Allen & Baddeley, 2024, CC : Système multi composant cognitif de la mémoire de travail située entre la mémoire sémantique à long terme et les sous-systèmes perceptivo-moteurs dont la mémoire tampon épisodique est le pivot central. Le superviseur central est représenté comme une ressource distincte qui peut être déployée de diverses manières pour interagir avec de nombreuses parties du système. Les flèches claires et foncées indiquent respectivement les processus implicites et explicites.

La mémoire de travail n'est pas impliquée uniquement dans les processus langagiers, elle est aussi impliquée dans les processus sensoriels, comme la vision, mais aussi dans les informations motrices nécessaires pour le contrôle du comportement à court terme et l'apprentissage des compétences (Hillman et al., 2024). Les dyslexiques adultes sans trouble

phonologique présentent un déficit du superviseur central de la mémoire de travail sans atteinte de la boucle phonologique (Sela et al., 2012). Les dyslexiques présentent effectivement un déficit de doubles tâches par la mise en surcharge de la mémoire de travail par une tâche de contrôle moteur de maintien de l'équilibre, pendant la réalisation d'une tâche de lecture (Vieira et al., 2009), ce qui de facto signifierait que les deux tâches sont en compétition pour utiliser des ressources communes du superviseur central. La mémoire de travail a une capacité limitée. Si les tâches demandent trop de ressources, elle favoriserait l'exécution d'une tâche au détriment de l'autre tâche. Les déficits de doubles tâches permettent donc de montrer l'absence de l'automatisation d'une ou des deux tâches réalisées (Nicolson & Fawcett, 1990). La mémoire de travail est aussi impliquée dans les autres apprentissages tels que l'apprentissage du langage oral (Desmottes et al., 2016). Vis-à-vis du déficit de la mémoire de travail chez les dyslexiques, se pose la double question de la présence d'une déficience des capacités propres de la mémoire de travail ou d'une surcharge de la mémoire de travail secondaire à un défaut d'automatisation des tâches en cours. L'étude Vieira et al., (2009), en montrant la correction des capacités de doubles tâches en cas d'intervention proprioceptive chez les dyslexiques, est en faveur d'un déficit de l'automatisation des tâches effectuées et non pas d'une réduction des capacités de la mémoire de travail, ce qui confirme les travaux de Smith-Spark et al., (2003).

La mémoire procédurale (implicite) à long terme est impliquée dans les déficits de l'automatisation de la lecture chez les dyslexiques (Nicolson & Fawcett, 1990) selon la théorie cérébelleuse. La mémoire procédurale est la mémoire des mécanismes, des actions, du mouvement des schèmes moteurs, des modèles internes, tout ce qui permet l'amélioration de notre anticipation. La mémoire procédurale ou implicite est le support de l'automatisation. La consolidation de la mémoire procédurale est altérée chez les enfants avec une dyslexie développementale (Hedenius et al., 2021). Pour Biotteau et al., (2016) l'altération de la mémoire procédurale expliquerait la présence de nombreuses comorbidités présentes dans les troubles neurodéveloppementaux. À noter que la mémoire procédurale à long terme dépend du sommeil paradoxal (Karni et al., 1994) que nous évoquons dans le paragraphe suivant.

g- Altérations du sommeil

Le rôle du sommeil et de ses différentes phases semble impliqué dans les apprentissages tels que les apprentissages procéduraux visuo-perceptifs (Ballan et al., 2022). Chez les enfants, ce sont les travaux princeps de Guillemainault & Pelayo (1998) qui ont montré le rôle du syndrome de haute résistance des voies aériennes supérieures lors du sommeil paradoxal, avec la présence de nombreux micro-réveils associés à des troubles des apprentissages (Gorgoni et

al., 2020). Lors du sommeil paradoxal, la présence de nombreux micro-réveils viendrait perturber le processus de transfert ou de consolidation de la mémoire procédurale (implicite) à court terme vers la mémoire à long terme (Karni et al., 1994 ; Hedenius et al., 2021 ; Luongo et al., 2021). Par exemple le rôle du sommeil paradoxal dans l'apprentissage d'une seconde langue (Thompson et al., 2021). Le sommeil paradoxal serait une fenêtre de plasticité cérébrale intense, essentielle à la neurogenèse chez le très jeune enfant et à l'automatisation des habiletés perceptives, motrices et cognitives, incluant la lecture et l'écriture (Lokhandwala & Spencer, 2022). La recherche fondamentale révèle le rôle important du sommeil paradoxal dans la construction de l'architecture neuronale et synaptique (Zhou et al., 2021). Chez les dyslexiques il existerait un lien entre le stress généré par un sommeil altéré et la réduction des mécanismes de développement des dendrites au profit de mécanismes de consolidation de résistance au stress (Bieder et al., 2020). Malheureusement, les simples ronflements primaires s'accompagnent significativement de troubles neurodéveloppementaux chez les enfants en école primaire (Brockmann et al., 2011).

Le sommeil de l'enfant est structuré en cycles successifs avec des phases de sommeil lent (léger et profond) et de sommeil paradoxal. Le sommeil lent est essentiel à l'élimination des toxines issues du métabolisme cérébral diurne et influence directement les capacités attentionnelles (Xie et al., 2013). Le manque de sommeil porte atteinte à l'apprentissage, à la mémoire mais une bonne nuit de sommeil pourrait inverser ces déficiences (Rasch & Born, 2013). L'un des grands mystères du sommeil est de savoir comment il remplit ces fonctions réparatrices. L'une de ses fonctions concernerait l'élimination des déchets du cerveau par le biais de changements dans la dynamique des fluides déclenchés par le sommeil. Le liquide céphalo-rachidien pénètre dans le parenchyme cérébral par les voies péri-artérielles, entraînant la convection du liquide interstitiel qui élimine les déchets toxiques de l'espace interstitiel du cerveau et s'écoule le long des voies péri-veineuses (Xie et al., 2013). En outre, le débit sanguin cérébral et le volume sanguin diminuent pendant le sommeil à ondes lentes provoquant une inversion temporaire de la direction du flux du liquide céphalo-rachidien dans les troisièmes et quatrièmes ventricules (Fultz et al., 2019). Ces oscillations hémodynamiques induites par le sommeil lent facilitent potentiellement l'élimination des déchets, en permettant au liquide céphalo-rachidien et au liquide interstitiel de se mélanger (Fultz et al., 2019).

h- Système dynamique chaotique et dyslexie développementale

Des travaux récents chez les dyslexiques suggèrent la présence significative d'un système dynamique chaotique en phase instable lors de la lecture, comparativement aux normo-lecteurs. Ces observations concordantes entre elles chez les dyslexiques ont été réalisées par des approches différentes : soit par l'analyse de tracés EEG (Lina et al., 2020 ; Tene Koyazo et al., 2025) soit par l'analyse des mouvements oculaires lors de la lecture (Iaconis et al., 2023, Meo et al., 2024). L'étude de l'état de stabilité ou de complexité des phases d'un système dynamique chez les dyslexiques permettrait d'envisager de caractériser la présence d'un déficit cérébral global et d'entrevoir une approche fonctionnelle de la dyslexie développementale. Les systèmes dynamiques chaotiques sont impliqués dans les systèmes biologiques et ils ont la particularité de changer de phase de façon immédiate à la suite de la modification de l'état initial du système. L'évaluation de l'état de complexité des systèmes chaotiques peut être révélatrice de l'état de santé, de son évolution, voire de l'efficacité d'une intervention. Ce que nous allons développer brièvement dans la partie III du Chapitre 4.

i- Symétrie des centroïdes de Maxwell

Le statut de symétrie des centroïdes de Maxwell au niveau de la rétine serait corrélé à la présence de dyslexie développementale chez les jeunes adultes (Le Floch & Ropars, 2017). Les centroïdes de Maxwell sont caractérisés par la présence uniquement de cônes verts et rouges, et par l'absence de cônes bleus. D'après les auteurs, le statut de symétrie des centroïdes des taches de Maxwell est retrouvé chez les dyslexiques adultes, tandis que les normo-lecteurs présenteraient une asymétrie des centroïdes de Maxwell. Ce statut de symétrie s'accompagnerait d'un encombrement visuel chez les dyslexiques. Les auteurs ont proposé une démarche originale pour réduire l'encombrement visuel (Bertoni et al., 2019) en agissant sur le transfert interhémisphérique au niveau du corps calleux par l'utilisation de fréquences lumineuses comprises entre 60 et 120 Hz (Le Floch & Ropars, 2017, 2023). L'étude d'un cas clinique chez un enfant dyslexique montre l'efficacité d'une fréquence à 82 Hz pour améliorer la lecture au niveau des normo-lecteurs (Le Floch & Ropars, 2023). Cette approche a ouvert un nouveau débat (Franceschini et al., 2025 ; Lapeyre et al., 2024. Naudet et al., 2024). Une autre étude a étonnamment utilisé des fréquences basses de 10 et de 15 Hz (Lubineau et al., 2023) sans support théorique et ne montre pas d'effet sur la lecture des dyslexiques. La symétrie des taches de Maxwell provoquerait l'absence de saillance nécessaire à l'émergence d'une référence spatiale unique et stable, indispensable à la coordination des hémisphères, ce qui

induirait un encombrement visuel et une instabilité du lien entre les deux hémisphères avec l'apparition d'un fonctionnement dynamique chaotique du cerveau.

j- Dysfonction proprioceptive

La dysfonction proprioceptive fut initialement décrite sous la forme d'un tableau clinique d'algie chronique secondaire à une dysperception des références spatiales du corps (Da Cunha & Da Silva, 1986). Puis comme un déficit d'intégration multisensorielle avec la présence d'une labilité de la référence spatiale (Quercia et al., 2015), de déficits perceptifs (Quercia et al., 2020) et d'une altération de la distribution tonique (Quercia et al., 2005). La dysfonction proprioceptive s'exprime sous trois formes cliniques : i) la forme musculaire ou douloureuse ii) la forme pseudo vertigineuse, iii) la forme perceptive associée à des troubles du sommeil avec pour critères secondaires la présence de troubles neurodéveloppementaux dont la dyslexie développementale (Da Cunha & Da Silva, 1986 ; Da Cunha, 1987). Cependant, la dysfonction proprioceptive est corrigible par une prise en charge dénommée « intervention proprioceptive » qui rétablirait les capacités d'automatisation (Vieira et al., 2009), et améliorerait les capacités de lecture des dyslexiques (Quercia, et al., 2007).

Au chapitre 3, nous décrivons la dysfonction proprioceptive chez les dyslexiques, puis l'intervention proprioceptive et l'effet de l'intervention proprioceptive chez les dyslexiques, et au chapitre 4, le rôle de la proprioception pour mieux appréhender les mécanismes éventuellement impliqués dans la dyslexie développementale.

Chapitre 2- Les principales théories de la dyslexie développementale

a- La théorie phonologique

Les défenseurs de la théorie phonologique lui confèrent un aspect causal repris dans la définition de la dyslexie développementale de Lyon et al., (2003). Pourtant dès 2004, Colthaert constatait « *Nous concluons qu'aucune étude n'a fourni de preuves sans équivoque de l'existence d'un lien de causalité entre la compétence en matière de conscience phonologique et la réussite dans l'acquisition de la lecture et de l'orthographe* » (Castle & Colthaert, 2004). Si la rééducation phonologique est efficace sur les déficits de compétence phonologique des enfants faibles lecteurs et des enfants dyslexiques, il n'existe pas de preuve du transfert de cette efficacité à la lecture pour les enfants dyslexiques (Pennington, 2006 ; Torgesen et al., 1992).

Ceci va à l'encontre d'un éventuel lien de causalité entre la présence de déficits phonologiques et la présence de troubles pathologiques de la lecture chez les dyslexiques (Pennington, 2006). Une autre difficulté de la théorie phonologique de la dyslexie développementale est l'absence d'explication de déficits sensorimoteurs présents autres que ceux liés à la lecture, tels que le déficit de perception des mouvements lents chez les dyslexiques (Laprevotte et al., 2021) ou la présence de comorbidité, telle que les TDC (Pennington, 2006 ; Marchetti et al., 2022). La théorie phonologique n'aborde pas la question de savoir pourquoi il existe un déficit phonologique, pourtant la présence d'une altération de l'influx des percepts visuels et auditifs nécessaires à la mise en place des habiletés phonologiques, sans atteinte des structures neurologiques fonctionnelles, a été mise en évidence (Boets et al., 2013). Comment expliquer par la théorie phonologique d'un trouble cognitif unique, la présence de précurseurs neuroanatomiques préscolaires de la dyslexie développementale dans les cortex sensoriels primaires et dans les fonctions exécutives, alors que les anomalies du réseau de lecture lui-même n'ont été observées qu'à partir de l'âge de 11 ans, après l'apprentissage de la lecture (Clark et al., 2014). Et comment expliquer la présence de déficits articulatoires qui viennent affecter l'accès aux phonèmes (Marchetti et al., 2023) chez les dyslexiques ? La théorie phonologique de la dyslexie développementale n'apporte pas d'éléments d'explication des mécanismes impliqués dans l'automatisation de la lecture. L'approche causale de la théorie phonologique d'un déficit cognitif unique de la dyslexie développementale n'est donc pas démontrée.

b- La théorie temporelle

La théorie temporelle part du constat de la présence de déficits temporels qui bien évidemment ne peuvent qu'impacter la reconnaissance des phonèmes du langage oral nécessaire aux habiletés phonologiques. La théorie temporelle tente d'expliquer les déficits des habiletés phonologiques. Mais la mise en évidence des troubles temporels est expérimentale, sans transfert en test clinique pertinent. Cependant, il en découle des thérapies qui s'appuient sur le rythme. Une étude récente sur l'effet de stimulation auditive rythmique chez les dyslexiques, présentée au colloque scientifique de la Fédération Française des DYS (FFDys, 14.03.2025) montre une amélioration des habiletés phonologiques ($p=0.007$, et, $p=0.004$), malheureusement sans transfert à la lecture ($p=0.72$) (Platonova et al., 2025). Il n'y a donc pas encore de lien de causalité prouvé entre la théorie temporelle et les troubles de la lecture des dyslexiques. Une autre des difficultés de la théorie temporelle c'est l'absence d'explication à la présence des troubles temporels chez les dyslexiques.

c- La théorie magnocellulaire

Pour Stein (2022), l'atteinte des voies magnocellulaires expliquerait chez les dyslexiques l'altération des systèmes de traitement visuel temporel et auditif chez les dyslexiques nécessaires pour séquencer avec précision l'ordre des lettres dans un mot et pour le séquençage auditif des sons des mots. « *Ces deux déficits combinés peuvent donc expliquer leurs problèmes d'acquisition du principe phonologique* » (Stein, 2022). Stein réfute ainsi l'approche univoque de la théorie phonologique, qui ne permet pas d'aborder les différents processus pouvant expliquer le trouble phonologique, ni les différents champs possibles d'intervention. Suivant l'approche magnocellulaire, trois types d'interventions semblent pertinentes : soit par l'entraînement sensoriel, soit par l'utilisation de filtres colorés (Denton & Meinld, 2016 ; Razuk et al., 2018) avec des résultats contradictoires en fonction des auteurs, soit par une supplémentation alimentaire en acide gras oméga 3, qui permettrait d'optimiser le fonctionnement des neurones magnocellulaires. Il existerait un lien de corrélation entre le niveau de lecture et le taux d'oméga trois dans le sang (Borasio et al., 2023), sans qu'il soit montré un lien de causalité entre le taux sanguin d'oméga 3 et la dyslexie développementale. La théorie magnocellulaire montre l'existence de liens significatifs entre la présence de déficits magnocellulaires et la dyslexie développementale qui font l'objet de débats.

d- La théorie cérébelleuse de l'automatisation

La théorie cérébelleuse (Nicolson et al., 1999 ; Stoodley & Stein, 2013) apporte les éléments conceptuels et anatomiques nécessaires au contrôle moteur du mouvement et à son automatisation qui implique la mémoire procédurale chez les dyslexiques (Nicolson & Fawcette, 2011). Comme nous le verrons dans le paragraphe de la théorie motrice de la perception, le mouvement implique l'anticipation des conséquences du mouvement à venir et ses conséquences (Jeannerod, 2001). Il implique la détection des erreurs permises par la comparaison du mouvement prédit de la copie d'efférence (Helmholtz, 1866) et le retour sensoriel du mouvement effectué. La détection des erreurs est essentielle pour mettre en place des corrections et ainsi adapter les modèles internes nécessaires à l'instauration d'un apprentissage et de son automatisation. Pour que la correction et l'adaptation des modèles interne se fasse, la prédiction motrice seule ne suffit pas. Il faut que le mouvement soit réalisé pour que le modèle interne soit modifié (Rowe & Boe, 2024). L'approche cérébelleuse agirait suivant la théorie de la phonologie articulatoire (Browman & Goldstein, 1986 ; Griffiths & Frith, 2002), qui définit les gestes articulatoires à la fois en unité de représentation mentale et en unité d'action dans le programme articulatoire de production. Ce double rôle du geste évite

une interface entre la phonologie (perception et représentation abstraite) et la phonétique (émission par la réalisation articulatoire). Ceci va dans le sens de la théorie motrice de la perception de la parole (Liberman & Mattingly, 1985). L'approche cérébelleuse pourrait aussi impacter l'anticipation et la précision du contrôle extra rétinien à haute résolution du déplacement du regard, avec les signaux rétinien nécessaires pour interpréter l'entrée de fixation sur la rétine indispensable à la lecture (Chen et al., 2022 ; Zhao et al., 2023). Le contrôle moteur par la recherche d'erreurs au niveau cérébelleux implique la mémoire de travail dans les tâches non automatisées (Smith-Park et al., 2007) nécessaires à la correction des erreurs et à la création ou à l'adaptation des modèles internes pour anticiper les conséquences des actions à venir. La théorie cérébelleuse rend compte des mécanismes pouvant être impliqués dans les troubles de l'automatisation de la lecture. Mais la théorie cérébelleuse n'ouvre pas de voie thérapeutique évidente et ne peut donc pas démontrer l'existence d'un lien de causalité entre des troubles cérébelleux et la dyslexie développementale.

Chapitre 3- Rôle de la proprioception, du couple perception-action dans les processus d'automatisation et du système dynamique chaotique

I) Description de la proprioception

a- La proprioception

La proprioception fut décrite par Sherrington (1906) avec la description du réflexe myotatique. Elle analyse le sens de la position de la vitesse, ainsi que la direction du mouvement. La proprioception utilise des capteurs musculaires, intra tendineux, ligamentaires, des récepteurs cutanés tactiles, les informations visuelles et les récepteurs vestibulaires qui jouent le rôle de centrale gravito inertielle (Berthoz, 1997) nécessaire à la construction d'un référentiel stable, associé au schème moteur qui permet d'anticiper les conséquences de l'action, et de stabiliser la perception visuelle en cas de mouvement.

La proprioception est un sens méconnu et diffus, c'est un sens intéroceptif qui permet d'interroger et de connaître l'état du corps nécessaire à la création d'un référentiel spatial, à la connaissance de la direction et de la vitesse des mouvements des segments corporels dans l'espace, à la régulation du tonus musculaire et à la construction du schéma corporel.

La proprioception participe au codage de l'orientation de tous les organes sensoriels extéroceptifs indispensables à situer spatialement les différents éléments de l'environnement. Tous les sens extéroceptifs dépendent de la proprioception qui serait le sens premier (Roll, 2003).

Mais surtout, la proprioception participe aux mécanismes d'automatisation sensori-motrice nécessaires aux apprentissages par son implication dans les étapes de la perception et de l'automatisation du couple perception-action (Censor et al., 2012).

b- Niveau d'action de la proprioception

Les signaux proprioceptifs lors de l'action sont donnés par les muscles agonistes des muscles activés pour l'action, qui en décrivent la trajectoire, la vitesse et la direction. La proprioception ne fonctionne jamais de façon isolée, mais toujours en couple, avec 3 modèles intriqués assurant un lien permanent entre extéroception et intéroception, auquel il faut ajouter les neurones miroirs :

- Localement : La proprioception est couplée à une surface sensible adjacente et la fonction proprioceptive est ainsi indissociable de l'information donnée par l'organe sensoriel lui-même (Zhao et al., 2023). En pratique clinique, on utilise essentiellement 4 couples sensoriels et proprioceptifs : 1) rétine et muscles oculaires, 2) muqueuse buccale antérieure et certains muscles de l'oralité, 3) oreille interne et muscles sous-occipitaux, 4) surface plantaire et proprioception des capsules articulaires du pied. Notez que les informations proprioceptives oculaires et celles provenant du couple oral empruntent toutes deux la voie trigéménée.

- À distance : les chaînes musculaires lient sensoriellement des muscles coopérants pour la même action et les organes sensoriels extéroceptifs qui y sont liés. Il existe un couplage entre la proprioception oculaire et cervicale pour le codage spatial : ainsi une modification proprioceptive expérimentale au niveau des muscles oculaires droits supérieurs, des muscles trapèzes et des extenseurs des membres inférieurs donne la même illusion de déplacement du regard (Roll et al., 1991). Ce couplage à distance s'ajoute au couplage local entre la rétine (glissement rétinien de l'image) et la proprioception des muscles droits supérieurs.

- Au niveau central : Par le couple perception-action et l'automatisation (Censor et al., 2012) qui comporte cinq étapes : 1) L'intégration multisensorielle en fonction de l'action en cours sous la dépendance de l'état de stress et des capacités attentionnelles (Cappe et al., 2012). Les conséquences de l'intégration multisensorielle sont perceptives, d'ordre spatial et influencent le contrôle tonique. 2) L'anticipation et la prédiction sensorimotrice d'après les

données intégrées et les modèles internes. 3) La décision qui lance les commandes de l'action vers les effecteurs et les copies d'efférence vers le cervelet. 4) Le contrôle au niveau du cervelet de l'action prédite (la copie d'efférence et l'action réalisée par le biofeedback pour déterminer les erreurs et leurs corrections). 5) L'adaptation des modèles internes, et leur mémorisation à long terme lors du sommeil paradoxal, pour améliorer les capacités d'anticipation futures. Nous décrirons dans le chapitre 5 l'implication du couple perception-action dans les processus d'automatisation.

- Au niveau cellulaire : Les motoneurones miroirs ou neurones miroirs (Di Pellegrino et al., 1992) qui lient, dans des motoneurones, la capacité de produire un mouvement et de « s'allumer » quand un autre produit le même mouvement ou ensemble de mouvements, tel que le sourire et de ressentir l'émotion produite au plus profond de l'être, mais pas seulement les émotions. *« La découverte des neurones miroirs, chez plusieurs espèces animales, a montré que les informations multimodales sur les actions, les émotions, les sensations et les messages de communication des autres sont reportées sur les substrats neuronaux de l'observateur qui se consacre à ces processus à la première personne. »* (Bonini et al., 2022).

c- Les chaînes proprioceptives

L'ensemble des informations issues des muscles, depuis ceux des pieds, qui ancrent le corps sur le sol, jusqu'à ceux des yeux, qui ouvrent le corps sur le monde, est indispensable à la connaissance, à chaque instant, de notre position dans l'espace. Elles sont dénommées chaînes proprioceptives par Roll et al., (1991). Les chaînes musculaires lient *sensoriellement* des muscles coopérants pour la même action et les organes sensoriels extéroceptifs qui y sont liés. Il existe un couplage entre la proprioception oculaire et cervicale pour le codage spatial : ainsi une modification proprioceptive expérimentale, au niveau des muscles oculaires droits supérieurs, des muscles trapèzes et des extenseurs des membres inférieurs donne la même illusion de déplacement du regard (Roll et al., 1991). Ce couplage à distance s'ajoute au couplage local entre la rétine (glissement rétinien de l'image) et la proprioception des muscles droits supérieurs (Zhao et al., 2023).

d- La proprioception : référence spatiale et illusion

L'utilisation de leurres mécaniques vibratoires va donner des illusions de mouvement (Roll & Vedel, 1982). L'utilisation de leurres mécaniques vibratoires situés au niveau des

chevilles donne l'illusion que le sol se rapproche si les yeux sont ouverts, et provoque un mouvement de bascule antérieur du corps lorsque les yeux sont fermés. Donc l'utilisation de leurres influence la référence spatiale utilisée par le cerveau (Roll et al., 1991), et modifie le contrôle moteur de la distribution du tonus musculaire, mis en évidence par le corps penché et maintenu en avant lors que les yeux sont fermés.

La proprioception nécessite une centrale gravito inertielle représentée par le système vestibulaire qui permet de créer un référentiel centré sur la gravité. La création de ce référentiel gravitaire nécessite aussi l'utilisation d'informations visuelles pour pallier les limites du système. La proprioception et le système vestibulaire permettent la stabilisation du regard par les réflexes vestibulo-oculaires et elles permettent de stabiliser l'image sur la rétine (Roll & Roll, 1987 ; Zhao et al., 2023), ce qui implique des mécanismes d'anticipation d'une extrême précision. La proprioception joue donc un rôle majeur dans la création d'un référentiel spatial (sensorimoteur et de représentation) nécessaire à la prédiction et à l'anticipation d'un mouvement et de ses conséquences. La proprioception permet aussi le calcul et l'anticipation de la position absolue de la rétine (Zhao et al., 2023), élément probablement indispensable à la lecture et à son apprentissage.

e- La proprioception : le sens premier

Roll considérait la proprioception « *comme un sens premier, celui qui donne sens à nos autres sens* ». « *Le corps constituant en quelque sorte le mètre étalon de nos perceptions* » (Roll, 2003). La proprioception participe au codage de l'orientation de tous les organes sensoriels extéroceptifs. En effet, à quoi cela me sert-il de voir, si je ne sais pas où se trouve ce que je vois ? Tous les sens extéroceptifs dépendent de la proprioception qui serait le sens premier (Roll et al., 2003).

f- La proprioception : de la représentation symbolique à la reconnaissance des lettres

La proprioception participe à la représentation symbolique. Le recueil et le codage par une électrode de l'influx proprioceptif des différents couples musculaires antagonistes nécessaires au mouvement pour réaliser un carré ou un triangle donne les informations vectorielles du mouvement. L'application de patrons de vibration des différents couples musculaires impliqués permet de percevoir symboliquement et consciemment les figures (Bergenheim et al., 2000). De même, l'application sur les muscles de patrons de vibration, enregistrés lors de la réalisation de mouvements de la main pour écrire des lettres, provoque

l'illusion de l'écriture de ces lettres, sans que le sujet bouge. Le sujet pouvait identifier verbalement les lettres vibrées et les dessiner. Ce qui suggère que la perception musculaire joue un rôle dans la cognition de haut niveau (Gilhodes & Roll, 2001).

« La sensibilité proprioceptive pourrait être un sens premier indispensable à l'émergence de la conscience de soi en tant qu'être capable d'action. De sorte que nos actions, connues de nous, seraient à même de donner du sens à nos cinq autres sens dont elles déterminent la maturation fonctionnelle, l'exercice et la mise à jour. » Roll (2003). Pour De Ajuriaguerra la compréhension et la production du langage utilisent des composants communs, *« les processus de compréhension et de production du langage ont trop en commun pour dépendre de mécanismes différents... je conclus que la perception et la production partagent quelques composants... »*. *« La perception ne peut pas être séparée complètement ni de la motricité oculaire, ni de la cognition, ni de la vie affective du sujet »* (De Ajuriaguerra cité par Berthoz, 1997).

La proprioception n'est pas un sens extéroceptif, c'est un sens intéroceptif essentiel à la connaissance de l'état du corps nécessaire à l'anticipation de tout mouvement. En effet comment réaliser un mouvement si je ne connais pas ma position initiale ? La proprioception est aussi l'élément indispensable à tous les autres organes extéroceptifs en permettant de donner leur situation vis-à-vis du corps et leur direction, ce qui permet de situer spatialement la source observée. La proprioception est aussi impliquée dans les nombreux processus d'intégration multisensorielle, avec une pondération en faveur de la proprioception vis-à-vis des informations visuelles qui s'accroît avec l'âge entre 7 et 13 ans (King et al., 2010). Une altération de la proprioception peut venir altérer le processus d'automatisation tant au niveau de l'intégration multisensorielle, de l'anticipation, de la prédiction, mais aussi du contrôle du mouvement au niveau du cervelet, de la correction des erreurs à l'adaptation des modèles internes de la mémoire procédurale de court terme puis sa consolidation à long terme. Une altération de la proprioception peut donc avoir un impact majeur sur les processus d'automatisation. À noter dans les rares cas de désafférentation proprioceptive complète (4 sujets au niveau mondial) le contrôle du mouvement ne peut se faire que par la vue. Dans ce cas, marcher nécessite le contrôle visuel permanent des pieds, ce qui rend la marche impossible dans la vie courante (Sarlegna et al., 2006). Cependant, lors des rêves, le patient fonctionne comme si le retour sensoriel était intact. Il garde en mémoire la capacité de son contrôle proprioceptif des mouvements (Chauhan et al., 2022).

La proprioception est donc un sens essentiel dans le couple perception-action et l'automatisation. La dysfonction proprioceptive peut donc jouer un rôle dans les troubles de

l'apprentissage de la lecture des dyslexiques. Plusieurs travaux vont dans ce sens, certains montrent la présence d'une dysfonction proprioceptive chez les dyslexiques, et d'autres montrent qu'une intervention proprioceptive adaptée permettrait d'améliorer les troubles de la lecture des dyslexiques.

II) - Couple perception-action, automatisisation et représentation interne

Pour mieux comprendre le rôle de la proprioception et de la dysfonction proprioceptive dans la dyslexie développementale, il faut les resituer dans le travail des neurophysiologistes sur la théorie motrice de la perception (Anokhin, 1974 ; Bernstein, 1967 ; Desroué, 2022 ; Viviani et al., 1997) qui montrent entre autres que la perception et les apprentissages moteurs ne sont qu'un même mécanisme (Censor et al., 2012). La proprioception n'est qu'un élément des processus sensorimoteurs de la perception et des apprentissages moteurs, mais c'est un élément essentiel, car il permet de connaître l'état du corps. *« La perception n'est pas seulement une interprétation des messages sensoriels : elle est contrainte par l'action, elle est simulation interne de l'action, elle est jugement et prise de décision, elle est anticipation des conséquences de l'action »* d'après Alain Berthoz (1997). La théorie motrice de la perception décrit un couple perception-action sous la forme d'un cycle décrit par Bernstein (1967) avec la présence d'un comparateur à trois temps. Le premier temps de la mesure d'une erreur entre le mouvement réalisé et le mouvement prédit, le deuxième temps de la reconnaissance qu'un acte a été accompli et le passage au suivant, et le troisième temps avec une fonction d'adaptation à l'imprévu. Le cerveau percevrait, à un cycle de 40 Hz, par la synchronisation des prises d'informations multisensorielles (intéroceptives et extéroceptives), temporelles de l'état du corps et de l'environnement. Cette prise d'information permet d'assurer la cohérence entre l'état du corps, l'environnement et l'action en cours (Llinas & Ribary, 1993). Pour Whitall & Clark (2018) le couple perception-action est un mécanisme sous-jacent et une contrainte du développement moteur. Ceci dans le sens où le traitement continu des sensations, la planification et l'exécution des mouvements sont la façon dont le cerveau produit des mouvements orientés vers un but. La compréhension de ce mécanisme serait utile pour appréhender le développement moteur typique et atypique (Whitall & Clark, 2018), et ce d'autant que l'évaluation du couple perception-action pourrait prédire la maturité de la représentation du corps dans les troubles neurodéveloppementaux (Fontan et al., 2022). Le couple perception-action du contrôle moteur et l'automatisation sont un seul processus (Censor et al., 2012). Le couple perception-action du contrôle moteur comporte des étapes d'intégration multisensorielle, d'anticipation, de prédiction, de décision, de réalisation avec la production de

commandes motrices et de leurs copies (copie d'efférence), de détection des erreurs, de correction puis d'adaptation des modèles internes et de leur mémorisation. Le développement perceptif et moteur du nourrisson ne serait pas le développement de deux systèmes d'entités indépendantes, mais se développerait de manière dépendante suivant le couple perception-action (Schmuckler, 1993).

1ère étape du couple perception-action : L'intégration multisensorielle

L'intégration multisensorielle est un processus complexe qui implique des structures sous-corticales telles que le colliculus supérieur et des structures corticales (Wallace et al., 1998, 2006). Les voies neurologiques au niveau du pulvinar de l'intégration multisensorielle (inhibition ou renforcement des informations sensorielles) dépendent de l'état émotionnel, de l'état attentionnel et de l'intention (Cappe et al., 2012). En l'absence de stress, ou de déficit de l'attention, l'intégration multisensorielle consiste à renforcer les informations sensorielles utiles à l'action. Une des difficultés du processus d'intégration multisensorielle est de comprendre quand les stimuli provenant de différentes modalités sensorielles sont intégrés plutôt que traités comme des entités distinctes (Murray et al., 2016). Le processus multisensoriel est hautement dynamique. Il est basé sur la pondération relative des caractéristiques du stimulus et des associations apprises, assurant à la fois la stabilité et la flexibilité des fonctions cérébrales sur un large éventail d'échelles temporelles (Murray et al., 2016). Le processus d'intégration multisensoriel comporte une dynamique à différentes échelles de temps, dont à court terme pour les apprentissages de nouvelles relations multisensorielles. Les processus multisensoriels sont fondamentaux dans l'élaboration de la perception, de la cognition, de l'apprentissage et du comportement (Murray et al., 2016). Le renforcement ou la neutralisation de données sensorielles réduisent le nombre de données perceptives à celles utiles à l'anticipation de l'action en cours (Cappe et al., 2012), à la connaissance de l'état du corps, à la construction d'une référence spatiale intrinsèque et à la connaissance de l'environnement (Bertoz, 1997). Ces différents éléments sont indispensables pour la mise en place de notre capacité d'anticipation d'une action.

Les processus multisensoriels sont omniprésents et essentiels à la construction et au maintien de représentations perceptives et cognitives précises. Le traitement multisensoriel émerge progressivement au cours du développement et il est remarquablement plastique et dynamique, non seulement au début de la vie, mais aussi à l'âge adulte. Les réseaux multisensoriels permettent une adaptation rapide non seulement aux statistiques changeantes

du monde sensoriel, mais aussi à la nature changeante des exigences des tâches cognitives et comportementales et de leur contexte (Murray et al., 2016).

2^e étape du couple perception-action : La prédiction motrice

L'anticipation de l'action à venir nécessite donc d'être capable de prédire un mouvement (Van de Walle de Ghelcke et al., 2021), ou un ensemble de mouvements ainsi que leurs conséquences. Ce qui nécessite la connaissance de l'état du corps (référence spatiale intrinsèque, état tonique, vitesse et déplacement), la connaissance des informations environnementales (dont spatiales) et de pouvoir faire référence à des situations d'actions déjà réalisées et mémorisées que sont les modèles internes. La prédiction motrice seule d'un mouvement ne permet pas d'adapter le modèle interne. L'adaptation du modèle interne nécessite la réalisation du mouvement et de son contrôle par le cervelet pour le valider puis le mémoriser (Rowe & Boe, 2024).

3^e étape du couple perception-action : Détection et correction des erreurs

En cas de réalisation de l'action prédite, une commande motrice est envoyée aux effecteurs, associée à l'envoi au cervelet de la copie d'efférence. La notion de copie d'efférence fut conceptualisée par Helmholtz en 1866. Leurs présences furent démontrées par Von Holst en 1954. La copie d'efférence est une copie de la commande motrice d'une action qui est envoyée vers le cervelet pour permettre, grâce à la mémoire de travail (Lakshminarasimhan et al., 2024), la comparaison entre le mouvement prédit de la copie d'efférence et le mouvement réalisé par le biofeedback. Cette comparaison est nécessaire à la détection des erreurs, à leur correction et à l'adaptation des modèles internes nécessaires aux apprentissages (Xiao et al., 2023 ; Latash et al., 2021). La copie d'efférence permet donc de détecter les erreurs nécessaires à l'adaptation et aux apprentissages.

4^e étape du couple perception-action : Les schèmes moteurs et modèles internes

La notion de schèmes moteurs ou de modèles internes permet de relier perception, action et mémoire. Ce sont des relations mémorisées de la perception et de l'action (Schmidt, 1975, 2003 ; Kawato et al., 1999). La mémoire prédit les conséquences de l'action. Elle permet d'améliorer l'anticipation, et permet la rapidité de l'action dont dépend notre survie. En un mot, la relation mémorisée de la perception et de l'action fait l'automatisation (Censor et al., 2012).

5^e étape du couple perception-action : La consolidation du sommeil paradoxal

Comme nous l'avons vu, le sommeil paradoxal joue un rôle majeur sur la consolidation et sur la plasticité cérébrale de la neurogenèse chez le très jeune enfant, nécessaire à l'automatisation des habiletés cognitives (Lokhandwala & Spencer, 2022).

Nous pouvons résumer les cinq étapes du couple perception-action & automatisation par le schéma suivant, figure 3 :

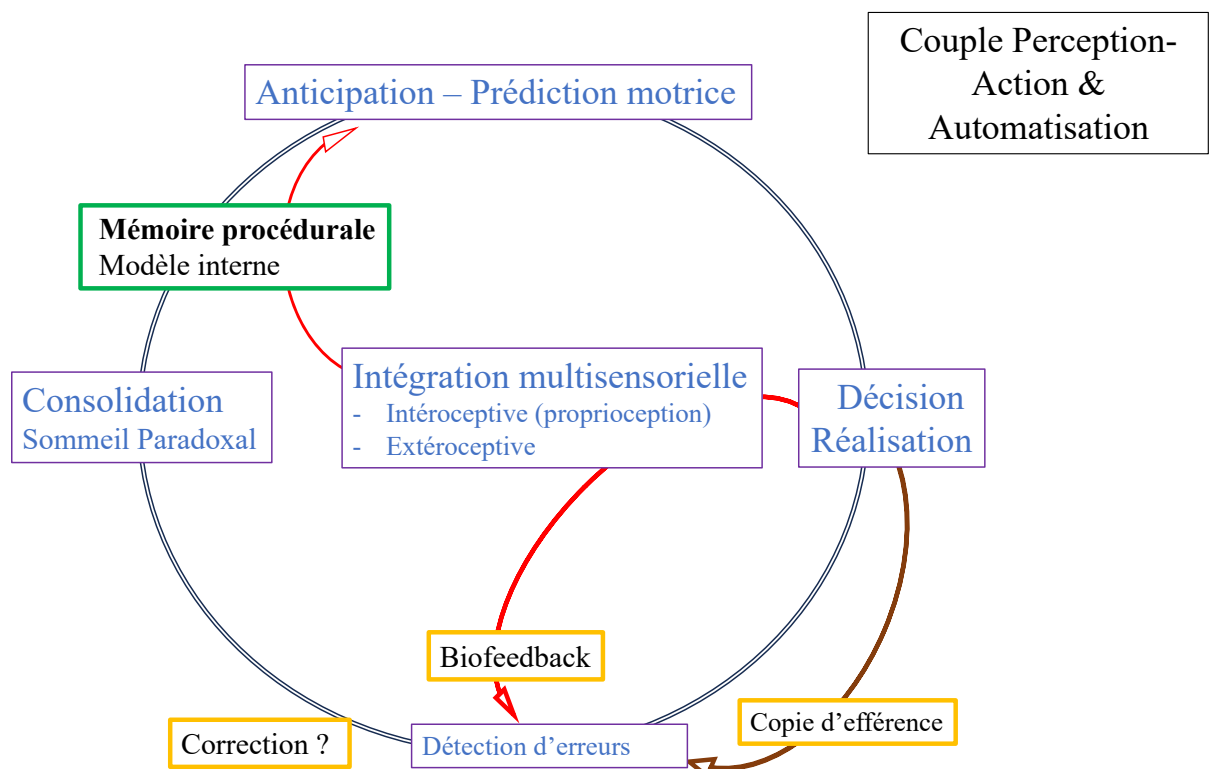


Figure 2. Couple perception-action et automatisation d'après Censor (2012)

Un dernier élément essentiel à la compréhension du lien entre la perception, l'action et les représentations internes (Assaiante et al., 2014) de la cognition incarnée fut la découverte des motoneurones miroirs (di Pellegrino et al., 1992). Le couple perception-action serait lié aux neurones miroirs qui s'activent quand le sujet réalise une action, ou quand il voit la même action être réalisée par un autre sujet (Rizzolatti et al., 2004). Ceci constituerait le socle des représentations sensori-motrices indispensable pour exercer une motricité intentionnelle, efficace et pertinente (Assaiante, 2022). Comme nous l'avons vu précédemment la phonologie articulatoire (Browman & Goldstein, 1986 ; Griffiths & Frith, 2002) définit les gestes articulatoires à la fois en unité de représentation mentale et en unité d'action dans le programme

articulatoire de production. Les motoneurones miroirs lient les aspects phonologiques des mots entrants (perception) et les aspects phonémiques sortants (articulatoire) en un seul support neurologique des représentations phonologiques et verbales (Rizzolati & Graighero, 2004). Les motoneurones miroirs permettent de comprendre l'intrication de la compréhension et de la production du langage et inversement. Ce qui est conforté par la présence privilégiée des neurones miroirs dans l'aire de Broca chez l'homme (Kotz et al., 2010), et dans les aires du langage gestuel chez les primates non humains et humains (Meguerditchian et al., 2013). L'aire de Broca est l'aire de la production articulatoire qui s'active aussi lors de la perception des mots, pour Kotz et al., (2010) "*l'un des nombreux rôles fonctionnels de l'aire de Broca est de faire correspondre les stimuli phonologiques à un répertoire de mots et non à des "assemblages de phonèmes" sans signification individuelle* » ... Ce résultat est renforcé par la présence de l'effet d'action sensorimotrice sur la perception des sons (Fadigua et al., 2002). Les motoneurones miroirs semblent donc impliqués dans les représentations sensorimotrices (Assaiante et al., 2014) et verbales. Les motoneurones miroirs confortent la théorie motrice de la perception du langage de Libermann & Mattingly (1985). En effet, pour Thompson (2010) la cognition émerge de l'interaction entre le corps, l'environnement et le cerveau, impliquée dans la formation de nos pensées et de nos perceptions, étant donné l'interdépendance entre la perception et l'action, dans la construction de notre réalité cognitive décrite par Versace et al., (2018).

III) Système dynamique chaotique

L'état de fonctionnement du cerveau semble suivre les lois d'un système dynamique chaotique déterministe (Goldberger et al., 2002 ; Letellier et al., 2021). Les outils mathématiques d'analyse des systèmes dynamiques chaotiques (fractal, entropie) permettent d'évaluer l'état de variabilité des systèmes biologiques, en fonction de leur complexité et de leur adaptabilité. Les systèmes dynamiques chaotiques peuvent changer d'état (c'est-à-dire être stables ou stochastiques -chaotiques-) lors de faibles changements de leur état initial. Les systèmes dynamiques chaotiques peuvent présenter différents niveaux d'états en fonction de la modification de leur état initial, par exemple lors de changements des conditions expérimentales. Cette variation d'état a été décrite par le célèbre effet papillon (Li & Yorke, 1975). C'est-à-dire qu'un minuscule changement de l'état initial peut provoquer un changement de phase majeur. Un état chaotique est conforté par deux éléments : l'effet immédiat d'une minuscule modification de l'état initial et la récurrence d'une phase instable, qui peut se calculer par l'entropie ou les fractales. Cette récurrence se mesure par le niveau d'autosimilarité d'un

schéma ou d'une courbe, c'est-à-dire par la présence de structures proches pour différentes échelles. L'autosimilarité est le reflet de la complexité du système et de sa capacité d'adaptation et d'apprentissage. Une faible complexité signifie une faible capacité d'adaptation, mais une trop forte complexité altère aussi les capacités d'apprentissage par un mode robotique (Stergiou & Decker, 2011). L'écart par rapport à l'état optimal de variabilité (c'est-à-dire un mouvement sain) conduit « à des systèmes biologiques qui sont soit trop rigides et robotiques, soit bruyants et instables » (Stergiou & Decker, 2011). La méta-analyse de Da Costa montre que la présence de troubles moteurs chez les enfants est associée à une diminution de la complexité (c'est-à-dire de la variabilité) des mesures non linéaires, et que la mesure de cette complexité est un bon indicateur de l'efficacité de l'intervention chez les enfants atteints d'infirmité motrice cérébrale (Da Costa et al., 2013). L'altération de la complexité est considérée comme une diminution de l'adaptabilité et de l'apprentissage d'un système. Nous pouvons donc caractériser le fonctionnement cérébral global par l'analyse fractale de son niveau d'autosimilarité. Ceci permet l'évaluation de l'état de complexité vis-à-vis de l'état optimal de complexité mesuré dans une population saine.

Chapitre 4- Constats, manques, objectifs et hypothèses

a Constats

Nous avons vu dans un premier temps la présence chez les dyslexiques de très nombreux types de déficits d'ordre sensorimoteur qui semblent dépasser l'hypothèse d'un déficit cognitif unique de la théorie phonologique, et nous orientent sur les modèles de déficits multiples plus évocateurs d'un dysfonctionnement cérébral global (Chalmepe & Vlachos, 2025). Cela semble cohérent avec la présence d'une structure désorganisée de la matière blanche dans la dyslexie développementale (Pinar et al., 2025) et avec l'absence d'anomalies organiques (Cummine et al., 2023).

Nous constatons un parallélisme important, mais peut-être fortuit, entre les différents déficits observés et les différentes étapes du couple perception-action et de l'automatisation. Si nous reportons les déficits décrits chez les dyslexiques sur le schéma du couple perception-action et automatisation (Figure 4), nous constatons la présence de nombreux déficits d'intégration multisensorielle et attentionnelle qui correspondent à la 1^{ère} étape d'intégration multisensorielle du couple perception-action. Ensuite une étude montre une altération de la prédiction motrice de la 2^{ème} étape du couple perception-action, mais lors de tâches de décharge, cette altération de prédiction serait aussi présente, uniquement en cas de comorbidité (Cignetti et al., 2018). Puis de nombreuses études indiquent la présence de déficits des doubles tâches de

la mémoire de travail situés à la 3^{ème} étape de détection des erreurs du couple perception-action. Pour la 4^{ème} étape, nous pouvons le constater indirectement par l'altération des processus d'automatisation chez les dyslexiques, tels que les déficits du contrôle moteur, ou les déficits de la lecture. En revanche, pour la 5^{ème} étape du couple perception-action des études récentes suggèrent la présence d'anomalies du sommeil et des processus de la neurogenèse du sommeil paradoxal impliqués dans la plasticité cérébrale, dont la mise en évidence de facteurs génétiques.

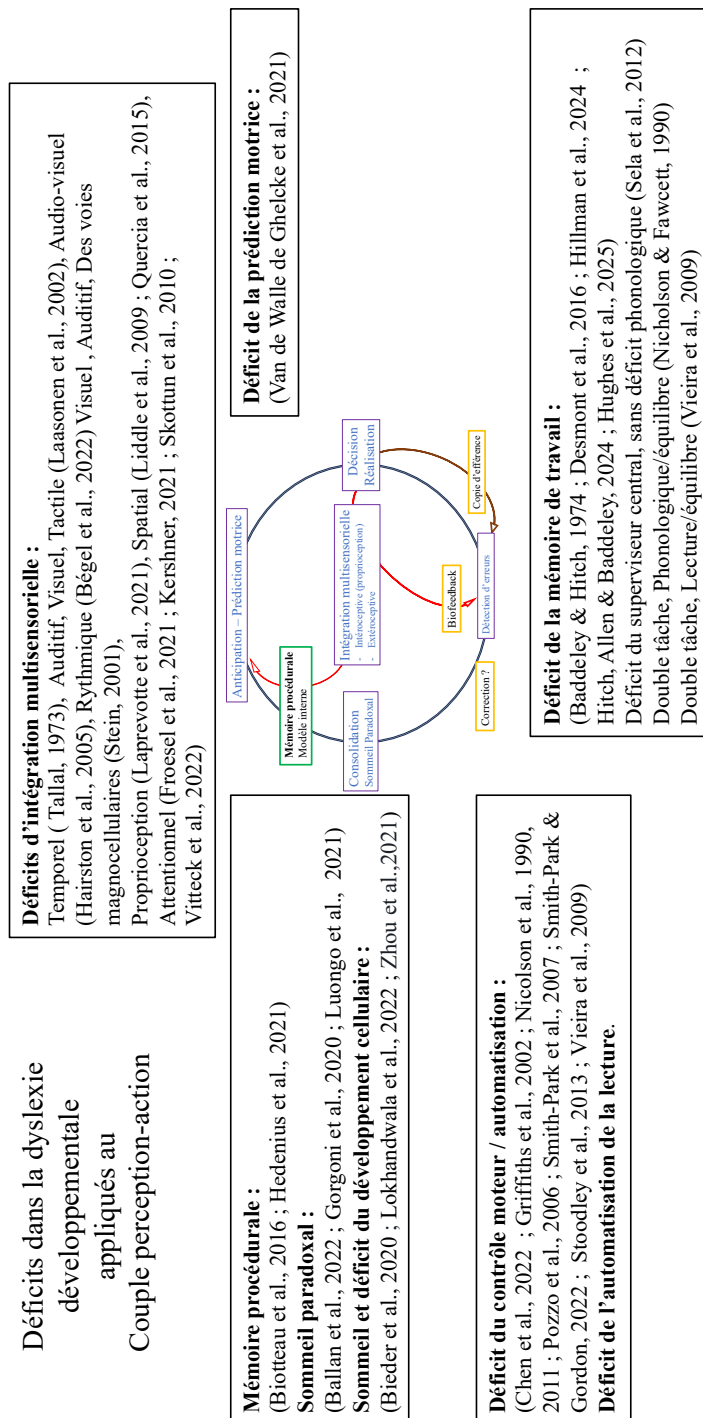


Figure 3. Déficits observés chez les dyslexiques au regard du couple perception-action.

Nous pensons que les deux axes d'action de l'intervention proprioceptive s'inscrivent dans la 1^{ère} et 3^{ème} étape du couple perception-action pour le processus d'intégration multisensorielle et pour le biofeedback nécessaire à la détection des erreurs, ainsi que dans la 5^{ème} étape de la consolidation lors du sommeil paradoxal. Dans la figure 5 nous avons indiqué vis-à-vis du couple perception-action les effets de l'intervention chez les dyslexiques. L'intervention proprioceptive permettrait de corriger les troubles attentionnels et d'intégration multisensorielle de la première étape. L'intervention proprioceptive corrigerait les déficits de doubles tâches de la mémoire de travail impliqués dans la détection des erreurs de la 3^{ème} étape. L'intervention proprioceptive corrigerait aussi la 4^{ème} et 5^{ème} étape mise en évidence par l'amélioration de la lecture et du contrôle moteur qui nécessite d'avoir adapté et consolidé les modèles internes.

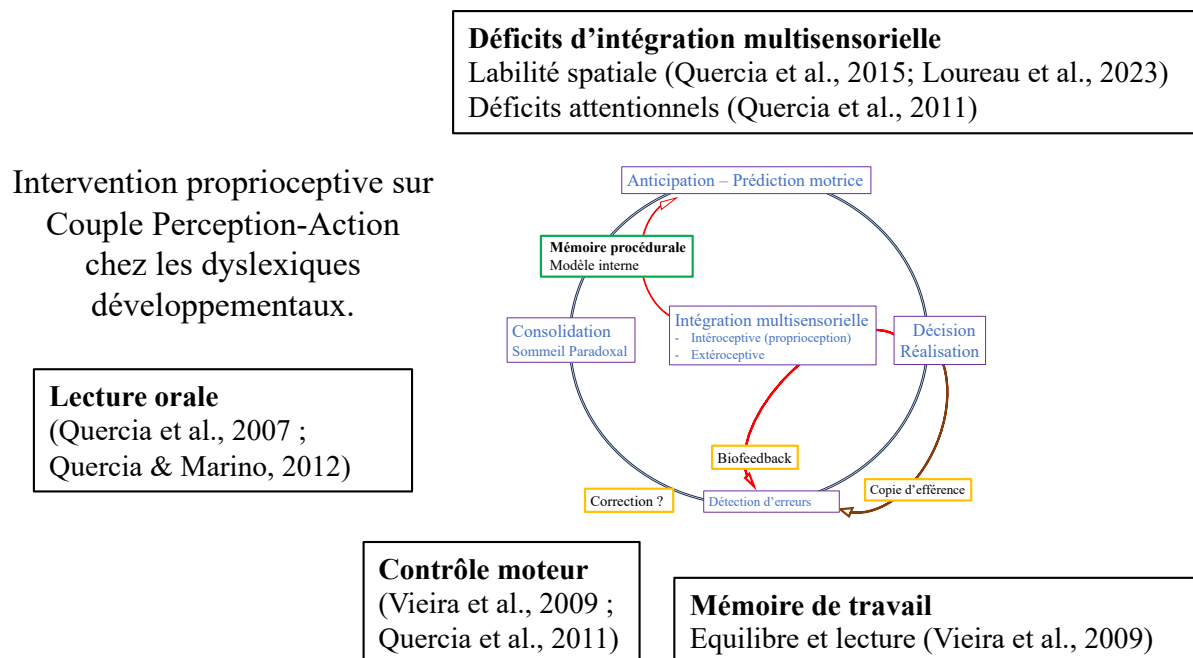


Figure 4 Effet de l'intervention proprioceptive sur les différentes étapes du couple perception-action.

La disproportion entre la petitesse des stimulations sensorimotrices utilisées et la multitude et l'importance des effets constatés de l'intervention proprioceptive, associée à la présence d'un dysfonctionnement cérébral global, évoque une action de l'intervention proprioceptive sur un système dynamique chaotique par une bascule d'une complexité non optimale à une complexité optimale. D'autant qu'il y a une convergence des théories des systèmes dynamiques chaotiques et des théories du contrôle moteur du couple perception-action du développement (Kugler et al., 1980 ; Sternard, 2000).

La majorité des déficits constatés chez les dyslexiques pourrait être liée à un déficit du processus d'automatisation sensorimoteur, soit en tant qu'étape de ce processus (intégration multisensorielle, attention, mémoire de travail, détection des erreurs, consolidation au long terme), soit en tant que sortie de ce processus (altération du contrôle moteur, altération des capacités de segmentation phonologique, altération de l'automatisation de la lecture). Le statut de symétrie des tâches de Maxwell ne semble pas impliqué en tant qu'étape ou sortie du processus d'automatisation, mais la symétrie des tâches de Maxwell expliquerait peut-être ce dysfonctionnement cérébral global. Le déficit des voies magnocellulaires pourrait être impliqué dans les trois, c'est-à-dire dans le dysfonctionnement cérébral global, dans les étapes ou dans la sortie du processus d'automatisation.

Des travaux montrent les effets bénéfiques d'une intervention proprioceptive sur les mécanismes de la lecture orale (Quercia et al., 2007 ; Quercia & Marino, 2012 ; Sampaio et al., 2009). L'étude en double aveugle de Quercia (et al., 2007) a validé la présence d'un lien de causalité entre l'intervention proprioceptive et l'amélioration de la lecture chez les dyslexiques. D'autres études montrent les effets bénéfiques d'une intervention proprioceptive sur l'attention (Quercia et al., 2011) et sur les déficits des doubles tâches et de la mémoire de travail des mécanismes d'automatisation (Vieria et al., 2009). D'autres travaux ont montré que les dyslexiques avaient besoin de l'utilisation d'informations sensorielles plus saillantes lors des tâches de contrôle moteur (Barela et al., 2014 ; Razuk & Barela, 2014 ; Razuk et al., 2020 ; Masulli et al., 2018) ce qui renforce la notion de troubles d'intégration multisensorielle.

L'intervention proprioceptive semblerait agir sur les déficits d'intégration multisensorielle d'ordre tonique, perceptif et spatial. Que l'intervention proprioceptive devrait agir sur la lecture orale, sur la lecture silencieuse (notamment sur les mécanismes sensorimoteurs et oculomoteurs de la lecture), sur les mécanismes d'automatisation de la lecture et sur les processus cognitifs de l'accès lexical.

L'intervention proprioceptive devrait améliorer le contrôle moteur lors de tâches d'équilibre en station debout, ce qui nous permettrait peut-être de caractériser l'état de fonctionnement cérébral lors du contrôle moteur.

b- Manque de connaissances scientifiques

Le premier manque de connaissance est de lever les paradoxes des définitions sur les notions de résistance et de causalité. A priori la dyslexie développementale est un trouble spécifique des apprentissages qui résiste aux interventions ce qui explique qu'elle soit reconnue comme un handicap. Pourtant la définition de consensus (Lyon et al., 2003) établit un lien de

causalité avec la présence d'un déficit des habiletés phonologiques sans que ce lien de causalité ne soit démontré (Pennington, 2006). Pourtant même si le constat est quotidien, il n'y pas d'élément de preuve d'une résistance des troubles pathologiques de la lecture à l'intervention orthophonique. Nous ne savons pas si le retard pathologique de la lecture de la dyslexie développementale est dépendant ou indépendant de l'intervention orthophonique.

Un deuxième manque de connaissance en cas de dyslexie développementale est de savoir s'il existe des déficits sensorimoteurs qui puissent être indépendants du manque de pratique de la lecture. Si ces déficits existent, nous ne savons pas s'ils sont dépendants des interventions orthophoniques ou proprioceptives, c'est-à-dire s'ils sont dépendants d'un déficit des habiletés phonologiques ou d'un déficit sensorimoteur.

Même si la dyslexie développementale est reconnue comme un déficit de l'automatisation de la lecture, ce terme n'est pas repris dans les définitions de la dyslexie développementale, et nous avons peu d'éléments de preuve de ces déficits de l'automatisation. Nous ne savons pas si ce déficit de l'automatisation est un processus sensorimoteur ou non. Même si l'étude de Vieiria (et al., 2009) semble montrer un lien de dépendance des déficits de doubles tâches à l'intervention proprioceptive, nous n'avons pas de confirmation de ce lien de dépendance, et nous ne savons pas s'il existe un lien de dépendance avec une intervention orthophonique.

Vis-à-vis du lien de causalité (Quercia et al., 2007) de l'effet de l'intervention proprioceptive, sur l'amélioration de la lecture dans la dyslexie développementale, nous constatons de nombreux manques, 1) l'amélioration de la lecture orale et des compétences orthographiques permise par l'intervention n'a pas été confirmée, 2) nous ne savons pas si l'intervention proprioceptive améliore la lecture silencieuse, ce qui permet de contrôler les facteurs articulatoires, 3) nous ne savons pas si les déficits pathologiques en lecture orale et en lecture silencieuse sont dépendants d'une intervention proprioceptive.

- Il n'existe pas d'évaluation de l'effet de l'intervention proprioceptive sur différents déficits présentés tels que les déficits d'intégration multisensorielle, les déficits de contrôle moteur dépendant ou indépendant de la lecture, les déficits cognitifs de l'accès lexical et sémantique.

- Nous ne savons pas si l'intervention proprioceptive permet la bascule d'une complexité non optimale à une complexité optimale du système dynamique chaotique. Nous ne savons pas si l'effet de l'intervention proprioceptive est immédiat, car une bascule d'un système dynamique chaotique est caractérisée par deux éléments : le changement de sa complexité et l'effet immédiat au changement de son état initial. Nous ne savons pas non plus si l'état de

complexité des systèmes dynamiques dans la dyslexie développementale est dépendant de l'intervention orthophonique ou de l'intervention proprioceptive.

c- Questions

Pour finir, nous pouvons résumer la problématique de l'intérêt éventuel de l'intervention proprioceptive dans la dyslexie développementale à deux questions :

- Pouvons-nous confirmer la présence d'un lien de causalité de l'effet de l'intervention proprioceptive sur l'amélioration des capacités de lecture des dyslexiques. C'est-à-dire, les troubles de la lecture de la dyslexie développementale résistent-ils à une intervention orthophonique et/ou à une intervention proprioceptive ?
- Les dyslexiques présentent-ils des altérations des processus sensorimoteurs de l'automatisation, et ces troubles sont-ils dépendants d'une intervention orthophonique ou proprioceptive ? Si nous pouvons répondre oui à ces deux questions, nous apporterons alors un éclairage sur le rôle des processus sensorimoteurs dans la dyslexie développementale, et nous confirmerons l'intérêt de l'intervention proprioceptive dans la prise en charge des dyslexiques.

d- Objectifs

A : L'objectif principal de ce travail est d'étudier si une intervention proprioceptive améliore la lecture orale et silencieuse des enfants dyslexiques, ainsi que les processus impliqués (sensorimoteur, cognitif et d'automatisation). De montrer donc qu'il existe dans la dyslexie développementale un lien de causalité, (ou de dépendance en fonction des méthodologies) entre l'effet de l'intervention proprioceptive et l'amélioration des compétences en lecture.

B : Les objectifs secondaires sont d'étudier la résistance à l'intervention orthophonique chez les dyslexiques, donc l'absence de lien de dépendance entre la dyslexie développementale et l'intervention orthophonique. Ensuite d'évaluer si la dyslexie développementale est secondaire à l'altération du couple perception-action du processus d'automatisation sensorimoteur, et de caractériser la présence d'un éventuel dysfonctionnement cérébral global.

e- Hypothèses générales

Hypothèse 1 : Chez les dyslexiques, il existerait des liens de causalité entre l'intervention proprioceptive, et l'amélioration de la lecture silencieuse, de la lecture orale, du contrôle oculomoteur, de l'accès lexical, et de l'automatisation de la lecture. Ces liens de causalité (ou de dépendance) n'existeraient pas pour l'intervention orthophonique seule.

Hypothèse 2 : Chez les dyslexiques, il existerait des liens de dépendance entre l'intervention proprioceptive et le contrôle moteur indépendant des tâches de lecture. Ces liens de dépendance n'existeraient pas pour l'intervention orthophonique seule.

Hypothèse 3 : Chez les dyslexiques, les différents processus d'automatisation et les différentes étapes testé du couple perception-action de l'automatisation seraient altérées et elles présenteraient un lien de dépendance à une intervention proprioceptive.

Hypothèse 4 : Les dyslexiques présenteraient un dysfonctionnement cérébral global qui serait caractérisé par un système dynamique chaotique avec une complexité non optimale qui présenterait un lien de dépendance à l'intervention proprioceptive.

PARTIE 2 : MÉTHODOLOGIE GÉNÉRALE & EXPÉRIMENTATIONS

Méthodologie générale

La dysfonction proprioceptive

L'intervention proprioceptive

Plan expérimental

Nous avons réalisé trois études :

- a. L'étude Prophodys** est un essai randomisé contrôlé. C'est une étude prospective interventionnelle longitudinale, avec réalisation d'un prétest et d'un post-test à 9 mois pour valider ou invalider la présence d'un lien de causalité de l'ajout d'une intervention proprioceptive sur l'amélioration des compétences en lecture silencieuse, chez des enfants dyslexiques. L'utilisation de l'analyse des mouvements oculaires lors de la lecture silencieuse permet de contrôler les processus articulatoires impliqués dans la lecture orale.
- b. L'étude Nosodys** est une étude prospective observationnelle ponctuelle contrôlée, entre des enfants dyslexiques ayant bénéficié dans leur antécédent ou non d'une intervention proprioceptive, et des enfants normo-lecteurs. Pour évaluer chez les dyslexiques la présence de troubles du contrôle moteur indépendants de la lecture, la complexité de leur système dynamique chaotique, et pour évaluer la présence d'un éventuel lien de dépendance entre ces éléments et l'intervention proprioceptive.
- c. L'étude des taches de Maxwell** est une étude prospective, observationnelle et interventionnelle ponctuelle chez des enfants dyslexiques et des enfants normo-lecteurs, réalisée au Brésil en collaboration avec l'université d'État de Sao Paulo (projet CAPES-COFECUB). Nous avons évalué un lien de corrélation entre l'état de symétrie des taches de Maxwell et la distribution tonique. Nous avons évalué l'effet de la correction de la distribution tonique sur la vitesse de lecture des enfants dyslexiques, c'est-à-dire que nous avons recherché un éventuel effet immédiat du changement de l'état initial du système dynamique chaotique permis par l'intervention proprioceptive

Chapitre 5- Dysfonction proprioceptive chez les dyslexiques

a- La dysfonction proprioceptive

1- Historique

Les bases de la dysfonction proprioceptive furent posées par le Dr Martin Da Cunha et son équipe, par l'observation chez les patients douloureux chroniques de contractures musculaires secondaires à des troubles de la localisation spatiale par le cerveau, avec une implication importante du système visuel (Da Cunha, 1987 ; Da Cunha & Da Silva, 1986). Il décrit un syndrome toujours d'actualité avec la présence de signes perceptifs, de signes spatiaux et de signes musculaires que ce soit au niveau symptomatique, clinique ou paraclinique. Sa prise en charge proposait initialement un travail de recalibration de son positionnement dans l'espace par des exercices de marche, de position debout (avec contrôle dans un miroir, avec les yeux fermés puis ouverts) associés à un travail de respiration diaphragmatique et à l'utilisation d'une position d'endormissement pour améliorer le sommeil paradoxal. Secondairement, des leurres sensoriels, à visée proprioceptive furent utilisés par action réflexe, sous forme de semelles proprioceptives avec l'utilisation d'éléments pour améliorer sa position dans l'espace suivant le principe des chaînes proprioceptives (Roll et al., 1991). Puis la prise en charge préconisait l'utilisation de prismes actifs par action sur les muscles obliques inférieurs proposé par le Dr Orlando Da Silva (1987). Puis des leurres à visée trigéminal ou faciale, par la pose de plots sur les incisives proposés par le Dr Alfredo Marino et M. Philippe Villeneuve (Marino, Villeneuve & Gaggey, 1999 ; Marino & Quercia, 2007 ; Quercia & Marino, 2017). La description initiale de cette dysfonction proprioceptive incluait la dyslexie développementale dans les critères secondaires (Da Cunha, 1987).

2- Physiopathologie de la dysfonction proprioceptive

Une altération de la proprioception décrite dans la dysfonction proprioceptive impacte les différentes étapes du couple perception-action. En cas de dysfonction proprioceptive, il existe en premier des troubles d'intégration multisensorielle (Hairston et al., 2005 ; Wallace & Stevenson, 2014) et leurs conséquences sur la localisation spatiale et le contrôle moteur qui sont aux centres du tableau clinique :

- D'ordre perceptif : La présence de scotomes visuels induits par des sons ou des vibrations (Quercia et al., 2020), ou la présence d'un déficit proprioceptif de la détection des mouvements lents (Laprevotte et al., 2021)

- D'ordre spatial : La présence d'une Hétérophorie Verticale Labile (HVL) (Quercia et al., 2015), qui correspond à une hétérolocalisation (Quercia, 2008).
- D'ordre tonique : Une asymétrie de la distribution du tonus musculaire lors du regard droit devant (Gagey, 1988).

3- Symptomatologie

Il existe une riche symptomatologie clinique qui doit comporter des signes perceptifs, spatiaux et musculaires, associés à des symptômes d'altération du sommeil. L'absence d'un de ces éléments doit faire évoquer un diagnostic différentiel et rechercher une cause à ces troubles des apprentissages. La présence de troubles d'intégration multisensoriels fut antérieurement décrite et développée par Ayres (1963 ; 1972). Mascherreti et al., (2020) a montré que le gène ROBO1 est impliqué dans les déficits de la lecture des dyslexiques par le biais du traitement temporel multisensoriel visuel et auditif rapide. Et plus récemment, Mascherreti et al., (2024) a montré que la délétion intronique dans l'intron 2 du gène DCDC2 englobant l'ensemble du READ1 a été associée chez les dyslexiques à une altération de la perception visuelle des mouvements des voies magnocellulaires. Cliniquement, la présence de trois types de signes d'altération de l'intégration multisensorielle doit être retrouvée :

- 1) La présence de signes perceptifs mis en évidence par la présence de scotomes visuels, soit directionnels déclenchés par la variation des axes visuels au synoptophore (Da Cunha & Da Silva, 1986 ; Quercia et al, 2005), soit secondaires à des stimulations tactiles par l'utilisation de vibrations, ou par des stimulations auditives (Quercia et al., 2020).
- 2) La présence de signes spatiaux (Meng et al., 2022 ; Pulliam et al., 2023) mis en évidence par la présence d'HVL. Les HVL furent découvertes par suite des travaux de Matheron (2007), (Matheron et al., 2005 ; Matheron & Kapoula, 2011) qui a montré la présence d'hétérophorie verticale chez les patients douloureux chroniques, améliorés par des interventions manuelles. Le caractère labile de cette hétérophorie verticale, en fonction de variations des stimuli sensorimoteurs chez les dyslexiques, fut mis en évidence par Quercia (2015) puis confirmé (Virlet et al., 2019 ; Loureau et al., 2023). Cette labilité référentielle de l'hétérophorie verticale ne correspondrait pas à un changement de position de l'œil, mais correspondrait à un changement de perception de la position des yeux par le système nerveux central. Cette HVL serait donc liée à une hétérolocalisation spatiale, donc à un trouble de la perception spatiale dépendante de la proprioception. Elle fut mise en évidence expérimentalement par

l'utilisation d'un oculomètre, pour la comparaison de la perception de la position de l'œil par les sujets et la mesure objective de cette position par un oculomètre entre de jeunes normo-lecteurs et de jeunes dyslexiques (Quercia, 2008).

- 3) La présence de signes cliniques d'altération multisensoriels qui sont les déséquilibres de la distribution du tonus musculaire, avec la présence d'attitudes scoliotiques et de contractures musculaires asymétriques. Ces asymétries de la distribution du tonus musculaire furent mises en évidence par différents tests cliniques tels que la recherche d'une asymétrie de la rotation et de l'extension du rachis cervical lors de manœuvres du segment céphalique (Da Cunha, 1987). On utilise aussi pour cela le test posturo dynamique (Janin et al., 2016) et la manœuvre de convergence podale qui permet d'évaluer la distribution du tonus musculaire en position allongée, en fonction de différentes stimulations sensorimotrices codifiées. Ces trois groupes de signes cliniques et para cliniques correspondent à des troubles d'intégration multisensorielle, qu'ils soient d'ordre perceptif, spatial ou tonique.

Un quatrième groupe de signes cliniques est en rapport avec la présence de micro-réveils pendant le sommeil paradoxal, en cas de syndrome de haute résistance des voies aériennes supérieures (Bahamman et al., 1999), recherché par un questionnaire d'évaluation du risque d'être dyslexique chez les enfants âgés de 8 à 12 ans (Quercia et al., 2025).

Table 4. Questionnaire for calculating the risk of dyslexia. A score above 80 multiplies this risk by 21.

FOR EACH SYMPTOM, INDICATE THE NUMBER CORRESPONDING TO THE FREQUENCY 1 = Never, 2 = Occasionally (1 or 2 times/month), 3 = Sometimes (1 to 2 times/week), 4 = Often (3 to 5 times a week), 5 = Every day.	
15 Questions for PARENTS (after examining the child's sleep for at least 3–4 h of continuous sleep)	SCORE
The child jerks or moves body parts when falling asleep.	
The child has agitated daydream scenes when falling asleep.	
The child moves his legs a lot when he sleeps or often changes position during the night or kicks the bed covers.	
You have observed that your child sleepwalks	
Your child has nightmares (terrors) that he can't remember the next morning.	
He has great difficulty waking up in the morning	
The child feels unable to move around, feels very tired when waking up in the morning.	
The child is sleepy during the day (falls asleep easily in the car, quiet, ...)	
The child salivates a lot at night or there are traces of drool on the pillow in the morning.	
Child complains of a headache in the morning	
The child breathes with its mouth open while sleeping	
The child still pees or often gets up at night to go to the toilet.	
The child has trouble remembering lessons learned the night before (even though he knew them the night before).	
The child tends to be a little sleepy at times at school	
The child has an abnormal head position while sleeping (head tilted back and in extension).	
19 Questions to be answered by the CHILD	
Muscular dimension	
Do you feel tired even if you haven't exerted yourself physically or mentally?	
Is it hard for you to stand by and do nothing?	
Do you get a headache after school?	
Do you have recurring lower or upper back pain?	
Do your legs ever hurt?	
Is it hard for you to stare at a text (or a person) up close?	
Do you ever see double when you're tired, after reading a text?	
Do you get out of breath quickly when you exert yourself (for example, as soon as you run)?	
Can you see blurred up close after reading a few lines (with your glasses, if you have them)?	
Spatial dimension	
Is it difficult for you to walk on something narrow (a beam, for example)?	
Is it difficult for you to catch an object on the first try—a ball, for example?	
Do you fall easily or twist your ankles?	
You bite your tongue or cheeks when you eat.	
Do you bump into simple obstacles (doorframes for example, ...) as if you didn't perceive the space around you properly?	
Perceptive dimension	
Do you feel like you're reading without understanding what you're reading?	
Do you find it hard to concentrate for long?	
When someone speaks to you, do you feel like you don't really understand what you're hearing?	
When you read, you have the impression that you can't see properly: you skip words, you miss line breaks, ...	
It's hard for you to express an idea when you're talking, and you have trouble constructing your sentences properly?	
TOTAL SCORE—Enter the SUM of the scores for all 34 questions	

Table 1. Questionnaire d'évaluation du risque de dyslexie développementale chez les enfants (Quercia et al., 2025)

4- Formes cliniques de la dysfonction proprioceptive

Selon l'importance des signes, on distingue trois grandes formes cliniques :

- Forme musculaire ou douloureuse : les troubles du contrôle moteur dominant, avec une posture et un tonus asymétrique entraînant des douleurs musculaires diurnes. S'y ajoutent des troubles respiratoires nocturnes de type d'apnées ou de syndromes de haute résistance, qui sont secondaires à une dystonie diaphragmatique.
- Forme spatiale ou pseudo vertigineuse : le patient a beaucoup de difficultés à se situer dans l'espace qui l'entoure, surtout quand il est en mouvement,
- Forme cognitive ou perceptive : dominée par les troubles d'intégration multisensorielle. C'est dans cette forme que se trouvent les patients avec troubles d'apprentissage, toujours accompagnés de troubles du sommeil lors du sommeil paradoxal qui permet la consolidation de la mémoire procédurale.

Quand la sensorialité orale est très perturbée, on parle de syndrome de dysperception orale. L'examen constate des troubles de déglutition, des anomalies orthodontiques et d'importants troubles du sommeil.

b- Mécanisme de l'intervention proprioceptive

L'intervention proprioceptive (Da Cunha & Da Silva, 1986 ; Quercia et al., 2007, Quercia & Marino, 2012 ; Quercia & Marino 2017) vise à corriger cliniquement les troubles d'intégration multisensorielle (toniques, perceptifs et spatiaux) et à réduire les micro-réveils induits par le syndrome de haute résistance des voies aériennes supérieures (Bahamman et al., 1999). La correction des troubles d'intégration multisensorielle se fait par l'utilisation de trois types de leurres sensoriels, ou stimulations sensorimotrices : 1) par l'utilisation de prismes actifs, agissant sur les muscles obliques inférieurs, voire sur les obliques supérieurs, par la modification du tonus musculaire du muscle agoniste du muscle ciblé, ce qui provoque une décontraction de ce muscle par action réflexe et la modification de la proprioception que cela induit sur la branche 1 du nerf trijumeau, 2) par l'utilisation de stimulations buccales nommées Alphs (Figure 2) qui agissent sur la branche 2 ou 3 du nerf trijumeau ou sur les fibres sensorielles du nerf facial, en fonction de leur position, 3) par l'utilisation d'éléments proprioceptifs intégrés dans des semelles proprioceptives qui agissent par l'intermédiaire de la sole plantaire sur les chaînes proprioceptives décrites par Roll & Roll (1987) qui, bien qu'à distance, stabilisent les hétérophories verticales labiles (Loureau et al., 2023).

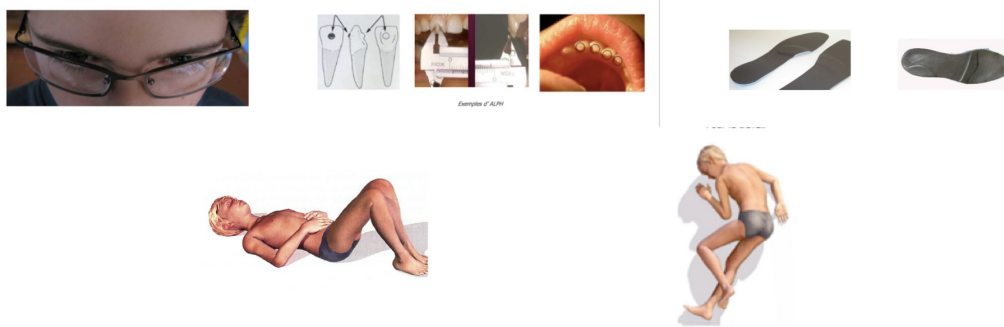


Figure 2. Intervention proprioceptive en haut, les prismes actifs (à droite), Les Alphas (au milieu), et les orthèses plantaires proprioceptives (à gauche). En bas les exercices de respiration diaphragmatique et la position d'endormissement (Quercia & Marino, 2017).

L'intervention proprioceptive implique aussi l'utilisation d'exercices de reprogrammation proprioceptive par des exercices de la marche le long d'une ligne, des exercices de maintien de la position debout et assise, associés à l'utilisation d'un pupitre incliné à 30°.

Le dernier axe de l'intervention proprioceptive vise à limiter les micro-réveils pour favoriser le transfert au long terme de la mémoire procédurale lors de la phase de sommeil paradoxal. Avec l'utilisation de deux types d'exercices à visée diaphragmatique. En premier, des exercices de respiration diaphragmatique durant 5 minutes avec un cycle respiratoire de 10 secondes, en position allongée.

En second, l'utilisation d'une position d'endormissement pendant une minute qui favorise la respiration diaphragmatique par le jeu de la gravité. Avec la réalisation de 6 respirations diaphragmatiques de 10 secondes.

d- Effet de l'intervention proprioceptive chez les dyslexiques

L'intervention proprioceptive chez les dyslexiques agirait à de nombreux niveaux que ce soit à des niveaux perceptifs et spatiaux de bas niveau cognitif (Hétérophorie Verticale labile), à des niveaux sensorimoteurs (équilibre), à des niveaux intermédiaires (attentionnel, automatisation) et à des niveaux cognitifs supérieurs (la lecture).

L'efficacité de la prise en charge proprioceptive de la lecture d'enfants dyslexiques a été évaluée par une étude en double aveugle longitudinale de six mois entre des enfants recevant des prismes actifs, et des enfants placebo recevant une correction de confort. À six mois, le test de l'Alouette montrait un effet significatif avec une amélioration de 67% de l'âge de lecture pour le groupe traité contre une amélioration de 8% de l'âge de lecture pour le groupe placebo, ainsi que l'amélioration des décisions orthographiques (Quercia et al., 2007). Une autre étude, présentée oralement, évaluait l'évolution de la lecture au test Timé 3 à trois mois chez des

enfants dyslexiques avec une intervention proprioceptive. La progression moyenne de la lecture des enfants dyslexiques avec une localisation spatiale stabilisée était significativement supérieure à celle des enfants dyslexiques avec une localisation spatiale qui reste labile ($p=0,005$). Les premiers progressaient de 6,48 mois, les seconds accentuaient leur retard de 2,8 mois d'âge de lecture (Quercia & Marino, 2012).

La présence d'une HVL c'est-à-dire d'une instabilité de la localisation spatiale a permis de distinguer les enfants dyslexiques, des enfants normo-lecteurs (Quercia, et al 2005 ; Virlet et al., 2019). Une intervention proprioceptive partielle par la seule utilisation de prismes actifs a permis de corriger l'HVL en la stabilisant dans 93% des cas (Quercia et al., 2015). Cette stabilisation est permise aussi pour des stimulations à distance au niveau de la sole plantaire (Loureau et al., 2023). L'altération de l'attention des enfants dyslexiques est corrigée par une intervention proprioceptive lors de tâches d'équilibre en comparaison avec des enfants normo-lecteurs (Quercia et al., 2011). L'intervention proprioceptive permet aussi de corriger les capacités de doubles tâches de déficit de la mémoire de travail vis-à-vis des enfants normo-lecteurs. Ces résultats mettent en évidence la correction des déficits de l'automatisation sensorimotrice présente chez les dyslexiques (Vieira et al., 2009). D'autres travaux ont montré que les dyslexiques nécessitaient l'utilisation d'informations sensorielles plus saillantes lors de tâches de contrôle moteur (Barela et al., 2014 ; Masulli et al., 2018 ; Razuk & Barela, 2014 ; Razuk et al., 2020) ce qui est en accord avec la cible de l'intervention proprioceptive de corriger les troubles d'intégration multisensorielle.

Chapitre 6- ÉTUDE PROPHODYS

L'intervention proprioceptive améliore les performances de lecture dans la dyslexie développementale : Une étude oculométrique.

Annexe 1 : Virlet et al., 2024

Introduction

Les interventions classiques chez les enfants atteints de dyslexie développementale se sont concentrées sur l'amélioration des capacités de lecture (phonétique, orthographe et instructions morphologiques (Toffalini et al., 2021), essentiellement sans tenir compte des autres déficits. Cependant, ces enfants ne présentent pas seulement de faibles capacités de lecture. Ils sont souvent peu performants dans les tâches sensorimotrices (Nicolson et al., 1999), le contrôle postural (Barela et al., 2011 ; Viana et al., 2013 ; Razuk & Barela, 2014), le traitement des différences visuomotrices (De Freitas et al., 2014) avec un couplage sensoriel et moteur déficient (Barela et al., 2011 ; Viana et al., 2013) et une prédiction motrice déficiente (Van de Walle de Ghelcke et al., 2021). Un dysfonctionnement proprioceptif a également été observé (Da Cunha & Da Silva, 1986 ; Laprevotte et al., 2021 ; Quercia et al., 2007) en association avec un trouble de l'intégration multisensorielle d'ordre spatial (Roll et al., 1991 ; Quercia et al., 2015) et perceptif (Quercia et al., 2020). Lorsque la proprioception est altérée, y compris dans la dyslexie développementale, le tonus musculaire est généralement asymétrique et la posture se détériore progressivement (Barela et al., 2011 ; Viana et al., 2013 ; Razuk & Barela, 2014). Cela peut expliquer des tensions musculaires, notamment au niveau des globes oculaires, qui se traduisent au niveau oculaire par un manque de convergence ou par une instabilité de la perception visuelle (Quercia et al., 2020). Enfin, les processus d'accès lexical (Rayner, 1998), qui se mettent en place à la suite de l'acquisition d'informations visuelles, sont plus susceptibles d'échouer si le percept visuel est dégradé ou instable. Cela pourrait expliquer pourquoi la précision, la fluidité, le décodage, la reconnaissance et même la compréhension sont tous affectés. Les interventions chez les enfants atteints de dyslexie développementale doivent donc se concentrer non seulement sur les troubles de la lecture, mais aussi sur ces autres aspects.

Ces dernières années en France, un groupe de chercheurs et de cliniciens ont proposé de réaliser une intervention globale, appelée intervention proprioceptive (Quercia et al., 2007 ; Quercia et Marino, 2017), qui vise à corriger les troubles de l'intégration multisensorielle spatiale. C'est-à-dire principalement la stimulation trigéminale et le travail sur la respiration diaphragmatique (Quercia et al., 2015) au lieu de se focaliser sur les problèmes d'écriture et de lecture. Cette

intervention a été examinée par un récent rapport de l'INSERM qui a conclu qu'elle était sûre, bien tolérée, sans effets indésirables et qu'elle devrait être testée plus avant (Gueguen et al., 2016). À notre connaissance, aucune étude publiée n'a expliqué la qualité de la lecture en termes de mouvements oculaires et de troubles proprioceptifs. Certaines études ont examiné les mouvements oculaires chez des enfants atteints de dyslexie développementale (Handler et al., 2011 ; Committee on Children With Disabilities American Academy of Pediatrics (AAP) and American Academy of Ophthalmology (AAO) American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus (AAPOS), 1998), mais pas, à notre connaissance, avec une approche proprioceptive. Quelques autres études se sont penchées sur les interventions visuelles sans résultats convaincants chez les enfants atteints de dyslexie développementale, mais sans approche proprioceptive (Handler et al., 2011 ; Committee on Children With Disabilities American Academy of Pediatrics (AAP) and American Academy of Ophthalmology (AAO) American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus (AAPOS), 1998). C'est pourquoi nous avons mené cette expérience pour tester l'efficacité d'une intervention proprioceptive en complément de la thérapie orthophonique. Nous avons enregistré les mouvements oculaires (Aghababian & Nazir, 2000) pour mesurer la vitesse de lecture silencieuse avant et après les interventions. Sachant que les enfants atteints de dyslexie développementale rencontrent des difficultés à lire à haute voix, nous avons préféré leur demander de ne pas parler, et l'analyse des mouvements oculaires a donc été nécessaire pour suivre leur lecture.

L'objectif de cette étude était d'évaluer les effets de l'intervention proprioceptive à la fois sur les performances de lecture silencieuse et sur ses composantes sensorimotrices, cognitives et d'automatisation permis par l'analyse des mouvements oculaires et sur les performances de la lecture orale chez les enfants atteints de dyslexie développementale.

Notre hypothèse principale (H1) était qu'il existerait un lien de causalité entre l'ajout d'une intervention proprioceptive et l'amélioration de la lecture chez les dyslexiques en comparaison à l'intervention orthophonique de référence seule. L'hypothèse nulle h_0 : il n'y a pas de différence des compétences de la lecture entre l'ajout ou non de l'intervention proprioceptive. En cas de rejet de l'hypothèse nulle, l'hypothèse h_1 est : il existe un lien de causalité entre l'ajout de l'intervention proprioceptive et l'amélioration de la lecture des dyslexiques.

Nos hypothèses secondaires étaient :

Hypothèse secondaire A (H2A) : Il n'existerait pas de lien de dépendance entre l'intervention orthophonique et l'amélioration de la lecture des dyslexiques. Avec pour l'hypothèse nulle h_0 :

Il n'y a pas de différence du niveau de lecture orale et silencieuse en pré-test et post-test pour l'intervention orthophonique. En cas de rejet de l'hypothèse nulle, l'hypothèse h1 est : il existe un lien de dépendance entre l'intervention orthophonique et l'amélioration de la lecture des dyslexiques.

Hypothèse secondaire B (H2B) : Il existerait un lien de dépendance chez les dyslexiques entre l'ajout d'une intervention proprioceptive et l'amélioration des processus d'intégration multisensorielle. L'hypothèse nulle h0 : Il n'y a pas d'amélioration des processus d'intégration multisensorielle entre l'ajout ou non de l'intervention proprioceptive. En cas de rejet l'hypothèse h0, nous prendrions l'hypothèse alternative h1 : Il existe un lien de dépendance entre l'ajout de l'intervention proprioceptive et l'amélioration des processus d'intégration multisensorielle.

Méthodologie de l'étude PROPHODYS

L'étude ProPhoDys est un essai clinique randomisé contrôlé. C'est une étude prospective interventionnelle, randomisée, contrôlée, longitudinale sur 9 mois de l'évaluation de l'effet d'une intervention proprioceptive sur les capacités de lecture (orale et silencieuse) chez des enfants avec une dyslexie développementale.

Participants :

En l'absence d'études antérieures sur l'évaluation de l'utilité de l'intervention proprioceptive dans la lecture silencieuse, nous avons utilisé les données de la lecture orale pour évaluer la taille de l'échantillon en fonction de la puissance a priori. Pour la qualité de la lecture dans le test Alouette-R (Lefavrais, 2005), nous avons choisi d'utiliser l'indice C (nombre de mots correctement lus), car il présente la variable la plus affectée par le niveau de lecture. Pour un risque de première espèce de 0,05 et une puissance de 0,90, le nombre de participants par groupe était de 12 (calculé avec epiR package 0.9-30, Stevenson et al., 2017).

Tous les enfants de cette étude étaient de langue maternelle française, ils présentaient un diagnostic de dyslexie développementale (APA, 2013) et ils ont été invités à participer à l'étude par leurs orthophonistes. En France, le diagnostic de dyslexie développementale est posé par un orthophoniste et nécessite la présence d'un retard de lecture pathologique (déterminé par des tests standardisés tels que le test Alouette-R ou le Timé 3) qui a résisté à l'intervention orthophonique pendant plus d'un an, sans troubles auditifs ou visuels (c'est-à-dire des tests oto-rhino laryngologiques et ophtalmologiques normaux), une intelligence normale (QI>70) et l'absence de troubles psychiatriques ou neurologiques. Chaque enfant dyslexique a passé un test standard de suivi par l'orthophoniste, le test Alouette-R (Lefavrais, 2005), qui est le test

français de référence pour la lecture de texte. Lors de l'inclusion, les enfants dyslexiques ont été vus par un médecin formé aux troubles neurodéveloppementaux, qui a vérifié les critères d'inclusion des enfants atteints de dyslexie développementale, âgés de 9 à 14 ans, avec des scores déficitaires aux épreuves de lecture de plus de 2 DS, la prise en charge orthophonique depuis plus de deux ans, une vision normale ou une vision normale corrigée avec une correction inférieure à $\pm 1,5$ dioptries, et l'absence de comorbidité pour des troubles pathologiques du langage (c'est-à-dire : dysphasie), de l'attention (TDAH), de la coordination (TDC), et de troubles psychiatriques ou neurologiques. Nous avons choisi des critères d'inclusion plus stricts que les critères du DSM-V (APA, 2013) afin de nous assurer qu'il s'agissait bien d'enfants atteints de dyslexie développementale. Un organigramme de la définition et de la répartition de l'échantillon est présenté dans la Table 2. Trente-trois enfants diagnostiqués avec une dyslexie développementale ont été retenus pour participer à cette étude. Après la sélection initiale, 27 enfants atteints de dyslexie développementale ont été répartis de manière aléatoire (par tirage au sort par le sujet d'une enveloppe fermée) dans l'un des deux groupes suivants : le groupe "orthophonie" (ST) et le groupe "intervention proprioceptive et orthophonie" (PST). Cependant, seuls 19 enfants ont suivi l'ensemble de la procédure (Table 2). Il n'y avait pas de différence significative entre les deux groupes d'enfants dyslexiques pour les scores pathologiques de la lecture et pour le QIT. Le groupe des enfants normo-lecteurs est nommé groupe contrôle (C).

Table 2. Flow, and Experimental groups				
33 patients assessed for eligibility				
	Ineligible (n=8) - Not meeting inclusion criteria (n= 7) Reading greater than minus two standard deviations (n=5) Refractive disorders greater than - or + 1.5 dioptres (n=2) - Other reasons (n= 1), Included in the 3rd arm which was removed.			
25 enrolled				
25 randomized				
Assessment\Randomized	Speech therapy (n=12)		Proprioceptive and Speech-therapy (n=13)	
Index C Alouette-R Test, row	9	Noncompliant assessment of read test (n=3)	13	
Eye-Tracker, row	12		10	- No calibration oculometer (n=2) -Failure to record data (n=1)
	Speech therapy (ST) (n=9)		Proprioceptive and Speech therapy (PST) (n=10)	

Table 2. Flow, and Experimental groups

Pour comparer l'évolution de la lecture silencieuse au cours des neuf mois, nous l'avons comparée avec les mouvements oculaires d'enfants typiques du même âge chronologique avec ceux des enfants atteints de dyslexie développementale (c'est-à-dire les groupes ST et PST). Il n'y avait pas de différence significative entre les trois groupes pour l'âge et le sexe. Nous n'avons pas obtenu l'autorisation du comité d'éthique pour mesurer leur Quotient Intellectuel Total QIT. Il n'y avait pas de différence significative entre les deux groupes d'enfants dyslexiques pour le QIT. Les caractéristiques physiques et autres informations concernant les deux groupes dyslexiques et le groupe témoin sont présentées dans la Table 3.

	Dyslexic and Control Subjects		
	Speech Therapy	Proprioceptive & Speech Therapy	Control
n (girls) (ns)	9 (3)	10(3)	9 (5)
chronological age (SD) (ns)	136,3 (12,2)	143,7 (14,2)	129,5 (2,51)
QIT (ns)	100.28 ± 9.41	98.87 ± 12.6	Non déterminé

Table 3. : Caractéristiques des groupes de participants (ns : non significatif)

Pour comparer la présence de déficits d'intégration multisensorielle et l'effet de l'intervention proprioceptive, nous avons pris les résultats des groupes indépendamment de la qualité des données de l'évaluation de la lecture, mais en excluant les deux participants non pathologiques aux tests de lecture en prétest, soit 12 participants pour le groupe ST, et 13 participants pour le groupe PST.

Conditions expérimentales

Condition générale

La procédure expérimentale a été réalisée conformément à la déclaration d'Helsinki et approuvée par le comité d'éthique (Comité d'éthique et de protection des personnes du Nord-Ouest IV-français. Enregistré sur www.clinicaltrials.gov : NCT03448237). Les participants et leurs parents ont donné leur consentement éclairé par écrit avant l'expérience et ont reçu un compte rendu complet à la fin de l'étude.

L'étude ProPhoDys a été réalisée au cabinet médical du Dr Virlet au 801 route nationale à Faumont (59310) dans une pièce dédiée, avec une salle d'attente séparée, ce qui a permis

d'être proche géographiquement, car le recrutement des enfants avait été effectué par 22 orthophonistes de la Pévèle.

Matériels

Oculomètre Eyelink 1000

Nous nous sommes servis d'un oculomètre pour évaluer la lecture silencieuse par l'analyse des mouvements oculaires. Nous avons utilisé un oculomètre EYELINK 1000-SR Research (fréquence d'acquisition à 1000 Hz). Les textes étaient présentés aux sujets avec un écran plat CRT SVGA de 19 pouces (résolution de l'écran de 1024×768 pixels, taux de rafraîchissement de 60 Hz). Les sujets devaient lire deux textes en français dans un ordre randomisé. Les variables ont été calculées et obtenues grâce au logiciel d'eye-tracking Dataviewer© (SR-Research). Les saccades et les fixations ont été définies en termes de seuils de mouvement, d'accélération et de vitesse, en utilisant les critères par défaut implémentés dans le logiciel EyeLink (un seuil de vitesse de $30^\circ/\text{sec}$ et un seuil d'accélération de $8000^\circ/\text{sec}$ ont été utilisés).

Textes de lecture silencieuse

Les textes pour la lecture silencieuse contenaient 134 mots. Pour chaque mot, les valeurs de longueur, de fréquence et de prévisibilité contextuelle ont été obtenues : 10 mots étaient des mots de haute fréquence (HF) et 10 étaient des mots de basse fréquence (BF). Les fréquences des mots ont été déterminées à partir de LEXIQUE, un corpus de 14,8 millions de mots (New et al., 2001). Après avoir lu le passage expérimental, les participants devaient répondre à 5 questions pour vérifier si le texte avait été compris. Chaque question comportait 4 réponses possibles, avec une seule réponse exacte. Le choix des tests était aléatoire et contrôlé.

Variables indépendantes

- Interventions orthophoniques

L'intervention d'orthophonie fut adaptée par l'orthophoniste aux besoins de l'enfant. Elle comprenait un minimum de 25 séances sur les 9 mois.

- Intervention proprioceptive

L'intervention proprioceptive visait à corriger l'HVL pour obtenir un Maddox proprioceptif stable avec un IMP=0 (Quercia et al., 2008, 2007, 2015, 2017). L'intervention proprioceptive combinait l'utilisation de leurres somatosensoriels agissant par l'intermédiaire du nerf trijumeau (Chen et al., 2022). Nous avons utilisé des prismes actifs (Quercia et al., 2015), la

neurostimulation orale, nommée ici Alph (Marino et al., 1999 ; Marino & Quercia, 2007), des semelles (Loureau et al., 2023) et des instructions respiratoires (Bahamman, 1999) pour réduire les micro-réveils pendant le sommeil paradoxal (Guilleminault & Pelayo, 1998 ; Gorgoni et al., 2020). L'intervention proprioceptive est décrite dans l'ouvrage " Œil et Bouche, capteur rétinotrigéminal, manuel pratique " (Quercia & Marino, 2017) (Figure 6).

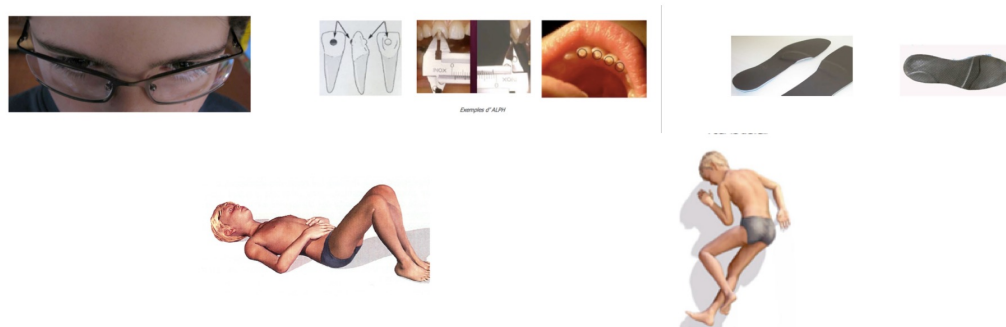


Figure 6. Intervention proprioceptive en haut, les prismes actifs (à droite), les Alphs (au milieu), et les orthèses plantaires proprioceptives (à gauche). En bas les exercices de respiration diaphragmatique et la position d'endormissement (Quercia & Marino, 2017).

Procédure

Après avoir rempli toutes les conditions requises, les enfants ont été invités à une première visite au cabinet du médecin. Leurs parents ont signé le formulaire de consentement éclairé. Les enfants ont été invités à s'asseoir dans une pièce faiblement éclairée, avec un écran plat CRT SVGA de 19 pouces (résolution de l'écran de 1024×768 pixels, taux de rafraîchissement de 60 Hz) et un eye-tracker (EyeLink 1000 - SR Research) placé sur une table devant eux. Ils ont reçu l'instruction de reposer leur tête sur une mentonnière et des instructions écrites ont été affichées sur le moniteur.

Afin de familiariser les enfants avec le dispositif expérimental et les procédures, une session d'entraînement a été réalisée avec un texte court suivi d'une série de questions, tous deux créés à l'aide d'E-PRIME 2.0 (Richard & Charbonneau, 2009 ; Schneider et al, 2012). Les participants étaient invités à lire à un rythme normal, en prêtant attention au sens du texte. Après cette phase de familiarisation, une croix de fixation est apparue dans le coin supérieur gauche et les participants étaient invités à la fixer. Lorsque la position de leurs yeux était alignée avec la croix, cette dernière disparaissait et une courte histoire en français s'affichait à l'emplacement de la croix. Lorsque les participants avaient fini de lire le texte, ils devaient fixer une autre croix dans le coin inférieur droit de l'écran. Lorsque leur regard l'atteignait, le texte disparaissait et l'essai était terminé.

Les enfants bénéficiaient ensuite d'une évaluation de leur fonction proprioceptive avec la recherche d'une altération d'intégration multisensorielle, d'ordre tonique, d'ordre spatial, et d'ordre perceptif par la recherche d'une asymétrie de la distribution du tonus musculaire par la MCP (Manœuvre de convergence podale) (Thomas & de Ajuriaguerra, 1949) puis la détermination de l'indice de Maddox proprioceptif et de l'indice de scotomes visuels.

À la suite de cette évaluation initiale, les enfants atteints de dyslexie développementale des groupes ST et PST ont bénéficié d'une rééducation orthophonique en fonction de leurs besoins, selon les Recommandations de Bonnes Pratiques (Collège Français d'Orthophonie et al., 2022) fournies par leurs orthophonistes. Cette thérapie a consisté en un minimum de 25 séances (d'une demi-heure chacune) au cours des neuf mois suivants, soit une séance par semaine, en tenant compte des vacances, conformément à la pratique française. Les orthophonistes traitent les enfants dyslexiques en les aidant à augmenter leur capacité à segmenter les mots en sons, c'est-à-dire à augmenter leur conscience phonologique. Pour y parvenir, les orthophonistes disposent d'une série d'exercices standardisés. Des exemples d'exercices couramment utilisés par les orthophonistes francophones sont présentés dans l'ouvrage de Pommée et al., (2022). Les enfants du groupe PST ont bénéficié de la rééducation orthophonique habituelle et ont également reçu une intervention proprioceptive, qui visait à corriger les troubles de l'intégration multisensorielle spatiale (Quercia et al., 2015 ; Quercia & Marino, 2012). Elle combinait l'utilisation de leurres somatosensoriels agissant sur le nerf trijumeau (Chen, 2022), des prismes actifs (Quercia et al., 2015), de neurostimulations orales (Marino et al., 1999) ; de leurres somatosensoriels agissant sur les chaînes proprioceptives par stimulation tactile avec des semelles proprioceptives (Loureau, et al., 2023) ; et d'instructions respiratoires (Bahamman, 1999). La procédure d'intervention proprioceptive pour les prismes actifs est décrite en détail dans "The distinctive vertical heterophoria of dyslexics" (Quercia et al., 2015). Après cette prescription initiale, la correction des troubles de l'intégration multisensorielle spatiale par l'intervention proprioceptive a été vérifiée à deux, quatre et six mois post-intervention. Des corrections ont été effectuées chez trois enfants, deux en adaptant les prismes et un en adaptant la stimulation neurosensorielle orale. Après la période de neuf mois, les enfants des deux groupes ont repassé le test Alouette-R, ils ont été évalués par leur orthophoniste. Ils ont également effectué à nouveau le test de lecture silencieuse avec l'enregistrement des mouvements oculaires par l'eye-tracker. La procédure était exactement la même que lors du test initial. Afin de garantir le respect de l'éthique, l'intervention proprioceptive a été mise à disposition des enfants du groupe ST à la fin de l'étude.

Variables dépendantes

Lecture orale :

Après la collecte des données, les résultats du test Alouette-R ont été utilisés pour examiner les performances de lecture des enfants. L'Indice C, c'est-à-dire le nombre de mots correctement lus pendant la période de trois minutes, a été calculé et les valeurs standardisées du test Alouette-R ont été utilisées en fonction de l'âge des enfants. Les résultats ont été calculés en termes d'écart type des performances de lecture (Lefavrais, 2005) et de gain de performance, c'est-à-dire la différence entre le pré-test et le post-test.

Test de l'Alouette-R :

Le test de l'Alouette-R (Lefavrais, 2005) sert à évaluer la lecture orale de façon standardisée. Les enfants devaient lire à haute voix un texte de 265 mots le plus rapidement possible, dans un délai de trois minutes, le texte était composé de mots réels présentés dans des phrases sans signification, mais grammaticalement et syntaxiquement correctes. Il permettait de fournir un score standardisé en fonction de l'âge du nombre de mots correctement lus en 3 minutes.

Lecture silencieuse :

Les mouvements oculaires ont été examinés à l'aide des variables suivantes (Pollatsek, Reichle & Rayner, 2006 ; Reichle et al., 1998) :

- **Durée de la première fixation (DPF)**, la durée de première fixation correspond à la durée de la fixation initiale d'un mot lorsqu'on l'aborde par la gauche, ce qui représente un indice de l'étape visuelle de bas niveau qui sous-tend la lecture et qui n'est pas affecté par la reconnaissance des mots. Une différence entre les groupes signalerait un problème de vision ou de perception.
- **Durée du regard (DR)**, elle évalue le temps de reconnaissance du mot c'est-à-dire l'accès lexical. C'est un processus cognitif. On prend la mesure de temps de fixation totale de toutes les fixations lors du premier passage du regard sur le mot, exprimé en ms. Une différence entre les groupes signalerait un problème de la reconnaissance des mots, c'est-à-dire d'accès au lexique.
- **Durée de fixation totale (DFT)** elle évalue le temps de reconnaissance du sens, c'est-à-dire l'accès sémantique. C'est un processus cognitif. On prend la mesure de la somme des

DR et la durée des rétro saccades sur le mot, lors d'un autre passage du regard sur le mot, exprimé en ms. Une différence entre les groupes signalerait un problème de compréhension.

- **L'amplitude des saccades (AS).** Elle évalue la fonction sensorimotrice du mouvement oculaire. Elle a été calculée comme la distance parcourue par l'œil entre deux fixations dans le texte. L'amplitude des saccades est exprimée en degré. Une différence entre les groupes signalerait un manque de fluidité de la lecture et de prises d'informations utiles.
- **Effet de fréquences des mots.** Les mots de basse fréquence reflètent la capacité à décoder les mots peu fréquents et permettent donc d'évaluer les mécanismes de la voie phonologique de la reconnaissance des mots. Les mots de hautes fréquences permettent d'évaluer les mécanismes d'automatisation de la lecture (Kimel et al., 2022 ; Pollatsek et al., 2006 ; Rayner et al., 2004).

La dysfonction proprioceptive :

La dysfonction proprioceptive a été évaluée par la recherche des trois éléments qui la constituent. En premier par l'évaluation de la distribution du tonus musculaire à la manœuvre de convergence podale. En deuxième par l'évaluation de la labilité référentielle par la détermination au Maddox Proprioceptif. Et en troisième par l'évaluation de la présence de scotomes visuels induits par des sons au Maddox Perceptif.

Manoeuvre de Convergence Podale (MCP)

La MCP permet d'évaluer la distribution du tonus musculaire entre les muscles impliqués dans la rotation externe des hanches (Thomas & de Ajuriaguerra, 1949 ; Mathurin, 2005) (Figure 7). La MCP a la particularité d'être reproductible en intra-examineur, mais il n'y a pas d'étude qui montre sa reproductibilité en inter-examineur. La MCP permet d'évaluer la présence d'un équilibre ou d'un déséquilibre franc de la distribution du tonus musculaire. La MCP est cotée : 1= déséquilibre de la distribution musculaire, 2= équilibre de la distribution du tonus musculaire.

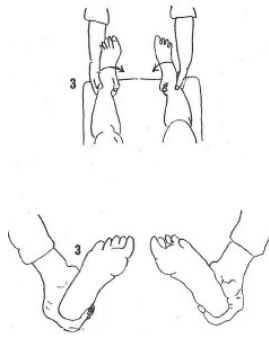


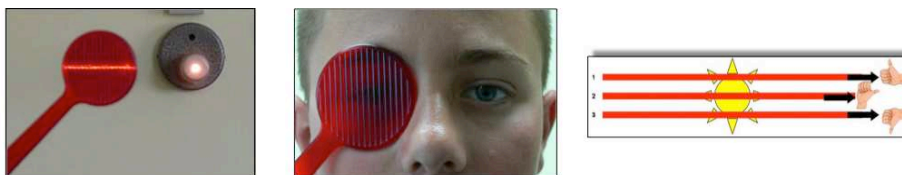
Figure 7. Manœuvre de Convergence Podale (MCP) d'après Gaggey (1988).

Les tests de Maddox

L'utilisation de la baguette de Maddox permet d'obtenir une dissociation de la fusion binoculaire (Figure 8). Le test de Maddox nécessite l'utilisation d'une lumière de 1,2 mm de diamètre, à 3,5 mètres du sujet, l'utilisation d'une baguette de Maddox composée de 17 cylindres biconvexes hyper-réfringents. L'œil situé derrière la baguette de Maddox perçoit la lumière comme une ligne rouge. L'autre œil perçoit le point lumineux. Le test de Maddox est essentiellement utilisé par les orthoptistes pour déterminer les phories verticales ou horizontales. Nous utilisons deux tests de Maddox modifiés : le test de Maddox Perceptif et le test de Maddox Proprioceptif.

a, Test de Maddox Proprioceptif :

Le test de Maddox Proprioceptif permet de déterminer la stabilité des phories verticales, donc de rechercher la présence d'une HVL. Pour le test de Maddox Proprioceptif, l'enfant voit une image dissociée du point lumineux, ce qui lui permet d'indiquer la position des deux images du même objet d'un œil par rapport à l'autre (Figure 8). Le Maddox est utilisé en position verticale, c'est-à-dire que les cylindres sont placés verticalement pour produire une ligne rouge horizontale, ce qui permet de voir la différence de hauteur (verticale) des deux images perçues par les yeux.



MP: chacun des 2 yeux fixe la même lumière, un écran rouge transformant la lumière en un trait horizontal devant l'un des 2 yeux. Lorsque la localisation spatiale visuelle est identique, le trait est au centre de la lumière (OV). Sinon il y a hétérophorie verticale (HV)

Figure 8. Test de Maddox Proprioceptif (Quercia et al., 2015)

Le test du Maddox Proprioceptif consiste à enregistrer de très faibles variations de la phorie visuelle verticale ($<0,01$ dioptrie) dans neuf conditions différentes de stimulations proprioceptives : 1) assis naturellement, 2) assis redressé, 3) manœuvre de Bielchowski droite, 4) manœuvre de Bielchowski gauche, 5) assis redressé avec la langue au palais, 6) assis redressé avec les lèvres serrées, 7) assis redressé avec la langue sur les incisives inférieures, 8) debout sans chaussures, 9) debout avec une mousse neutralisante de la semelle plantaire. Chaque variation de la phorie entre deux conditions est notée 1, la somme des variations constituant l'indice du Maddox Proprioceptif (IMP) notée de 0 à un maximum de 8. Un IMP égal ou supérieur à 1 indique la présence d'une HVL (c'est-à-dire au moins une variation). Un IMP = 0 signifie un système stable avec la présence d'une orthophorie verticale (OV) ou d'une hétérophorie verticale stable. Le test de Maddox Proprioceptif est reproductible en intra et en extra examinateur (Matheron et al., 2005, 2007 ; Quercia et al., 2015). L'intérêt du Maddox Proprioceptif est d'évaluer la proprioception oculaire et générale. En effet, nous n'avons pas la possibilité, dans l'axe vertical du regard, de faire diverger ou converger les axes des deux yeux. Il n'y a donc pas de commandes motrices pour ce type de mouvement. Cela signifie l'absence de copie d'efférence de ces mouvements vers le cervelet. Le contrôle de la position entre les deux yeux dans l'axe vertical ne peut se faire que par le retour de la proprioception oculaire, sans pouvoir utiliser l'information de copie d'efférence.

b- Le test de Maddox Perceptif

Le test de Maddox Perceptif permet de déterminer la présence de scotomes visuels induits par des sons, ou des vibrations (Figure 9). Le test de Maddox Perceptif se réalise dans une pièce à la lumière naturelle légèrement ombragée, à l'aide de sons mono et multifréquences (Quercia et al., 2020). Il évalue l'apparition de scotomes visuels décrits par le sujet lors de l'application de stimuli sonores calibrés (50 décibels).

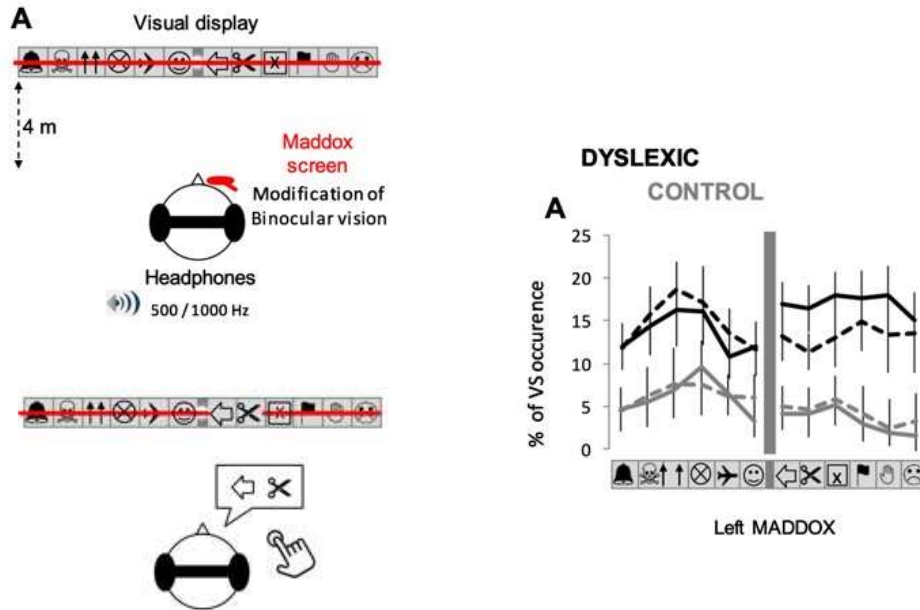


Figure 9. Maddox Perceptif, apparition de Scotomes Visuels induits par des sons, entre des enfants dyslexiques et du groupe contrôle (Quercia et al. 2020).

Nous avons établi un Indice de Scotomes Visuels (ISV) allant de 0 à 1 avec un maximum de 11. L'ISV a été évalué en fonction du son mono ou multifréquence le plus faible utilisé pour obtenir des scotomes visuels. Le score était inversement proportionnel à la fréquence du son : 63 Hz (score 11), 125 Hz (10), 250 Hz (9), 500 Hz (8), 1000 Hz (7), 2000 Hz (6), 4000 Hz (5), 8000 Hz (4), bruit blanc (3), bruit rose (2), salle de classe (1), absence de scotomes (0).

Le critère principal est la variable dépendante de **la durée de regard** de l'analyse des mouvements oculaires qui permet d'analyser l'accès lexical du temps de reconnaissance des mots. Les autres variables dépendantes sont les critères secondaires.

Analyse statistique

La normalité des échantillons (test de Shapiro-Wilk) et l'homogénéité de la variance (test de Levene) ont été vérifiées pour les variables dépendantes des mouvements oculaires dans les trois groupes (PST, ST et C). En outre, des tests t de Student ont été utilisés pour examiner les performances lors de la lecture à haute voix.

Pour les données d'oculométrie, une ANOVA de 3 (groupe : PSI, ST, C) X 2 (moment du test : pré-test, post-test) a été effectuée sur chaque variable dépendante (durée de la première fixation, durée du regard et amplitude des saccades).

Indice de scotomes visuels (ISV)

La figure 11 illustre les valeurs de l'ISV pour les groupes PST et ST avant et après l'intervention. Les tests de Mann-Whitney n'ont montré aucune différence entre les groupes PST et ST avant l'intervention ($U(23)=82$, $p=0,834$), mais ont montré une différence significative après l'intervention ($U(22)=111$, $p=0,016$). En outre, les tests de Wilcoxon ont indiqué que l'ISV pour le groupe ST ne différait pas entre la pré-intervention et la post-intervention ($Z(22)=3$, $p=1$) tandis que l'ISV pour le groupe PST était significativement différent entre la pré-intervention et la post-intervention ($Z(24)=66$, $p=0,003$).

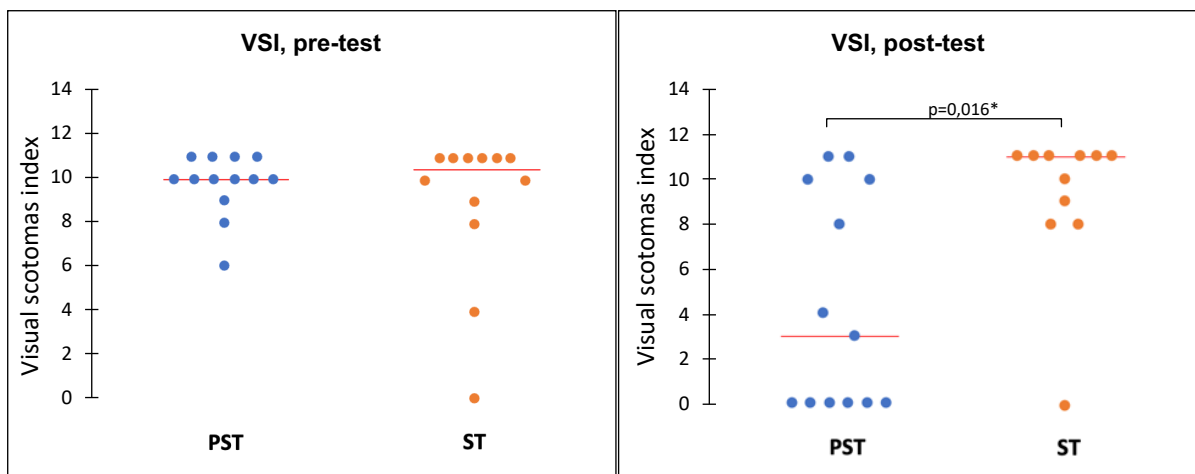


Figure 11. Valeurs individuelles de l'indice de Scotomes Visuels (ISV) pour les groupes de thérapie proprioceptive et orthophonique (PST) et de thérapie orthophonique (ST) en pré et post-test.

Performance en lecture orale

En pré-test il n'y avait pas de différence significative pour la lecture orale entre les deux groupes dyslexiques (ST et PST). En matière de gain de performance, nous avons trouvé une différence significative dans les résultats du post-test. En effet, les enfants du groupe ST avaient eu un gain de performance significativement plus faible (-0,93) que ceux du groupe PST (+1,16), avec une différence de gain de lecture de 2,09 écarts-types en faveur de l'ajout de l'intervention proprioceptive du groupe PST, $t(17) = -2,23$, $p = 0,042$, d de Cohen = 0,99 (Table 4). Ceci semble démontrer que les enfants ayant bénéficié de l'intervention proprioceptive ont amélioré significativement leur niveau de lecture mesuré par le test Alouette-R. Les enfants qui n'ont pas bénéficié de l'intervention proprioceptive ont montré des résultats qui stagnaient dans le temps.

	Speech therapy group	Proprioceptive & speech intervention group	p	d de Cohen
Pre-test	-2.83 (0.65)	-2.99 (2.22)	0,834	0,098
Post-test	-3.76 (1.8)	-1.83 (1.92)	0,05	0,967
Gain (Post-Pre)	-0.93 (1.56)	+1.16 (2.47)	0,042	0,999

Table 4. Évaluation des performances en écart type de l'indice C du test de l'Alouette R (écart-type de la moyenne).

Performance en lecture silencieuse, analyse des mouvements oculaires

L'examen initial des mouvements oculaires a montré un changement significatif dans les schémas de mouvements oculaires chez les enfants du groupe PST, mais pas chez les enfants du groupe ST. La figure 12 illustre ce schéma pendant la lecture chez un enfant du groupe PST avant et après l'intervention. Une analyse qualitative de ce participant a clairement montré que ses mouvements oculaires se sont améliorés après l'intervention proprioceptive. En fait, il a montré des durées de regard plus courtes et une plus grande amplitude des saccades, ce qui a permis une lecture beaucoup plus fluide (Figure 12).

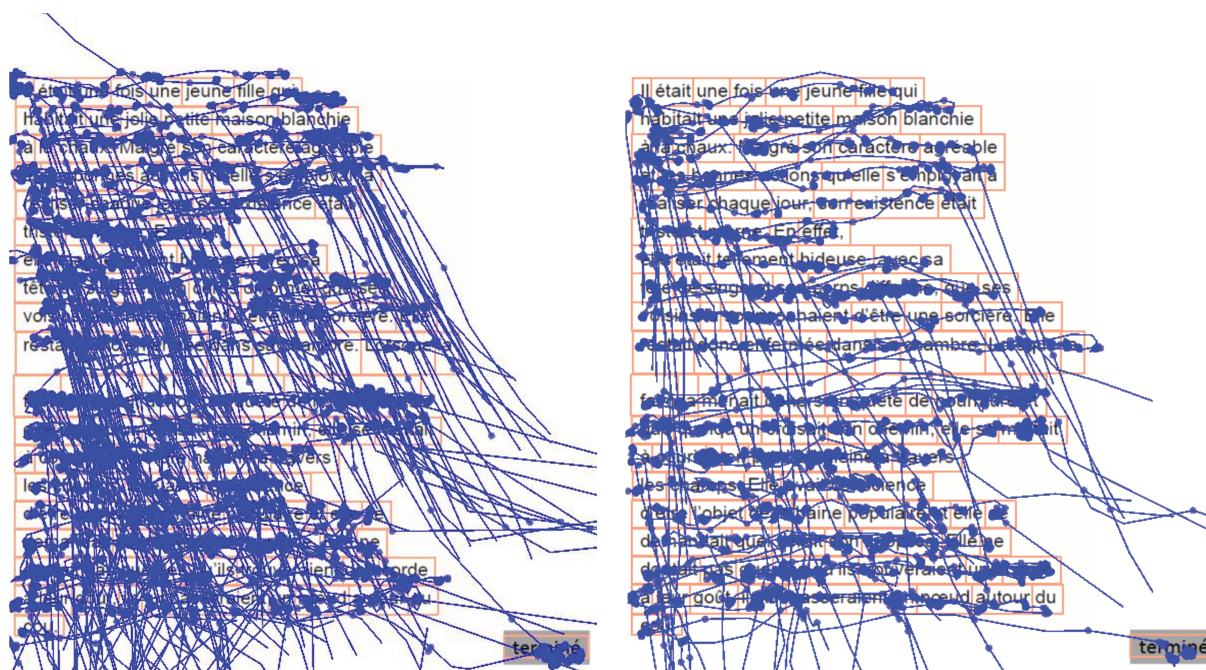


Figure 12. Exemple de mouvement oculaire représentatif d'un enfant du groupe d'intervention proprioceptive et orthophonique pendant la lecture en pré-test (côté gauche) et en post-test (côté droit) de l'intervention à 9 mois.

Durée de la première fixation

Au pré-test, la DPF était similaire entre les lecteurs dyslexiques du groupe ST (322 ms) et ceux du groupe PST (326 ms), $F(1,25) = 0,01$, $p = 0,9$, et les deux groupes ont montré une DPF significativement plus longue que les normo-lecteurs (groupe C) (235 ms), $F(1,25) = 10,16$, p

= 0,004. Au post-test, la DPF ne différait pas entre les deux groupes de dyslexiques (ST=289 ms et PSI=274 ms, $F(1,25) = 0,3$, $p = 0,58$), bien que les enfants dyslexiques des deux groupes aient présenté une DPF plus courte qu'au pré-test. Enfin, aucun des deux groupes de dyslexiques ne différait des normo-lecteurs (C) ($F(1,25) = 3,38$, $p = 0,08$) (Figure 13).

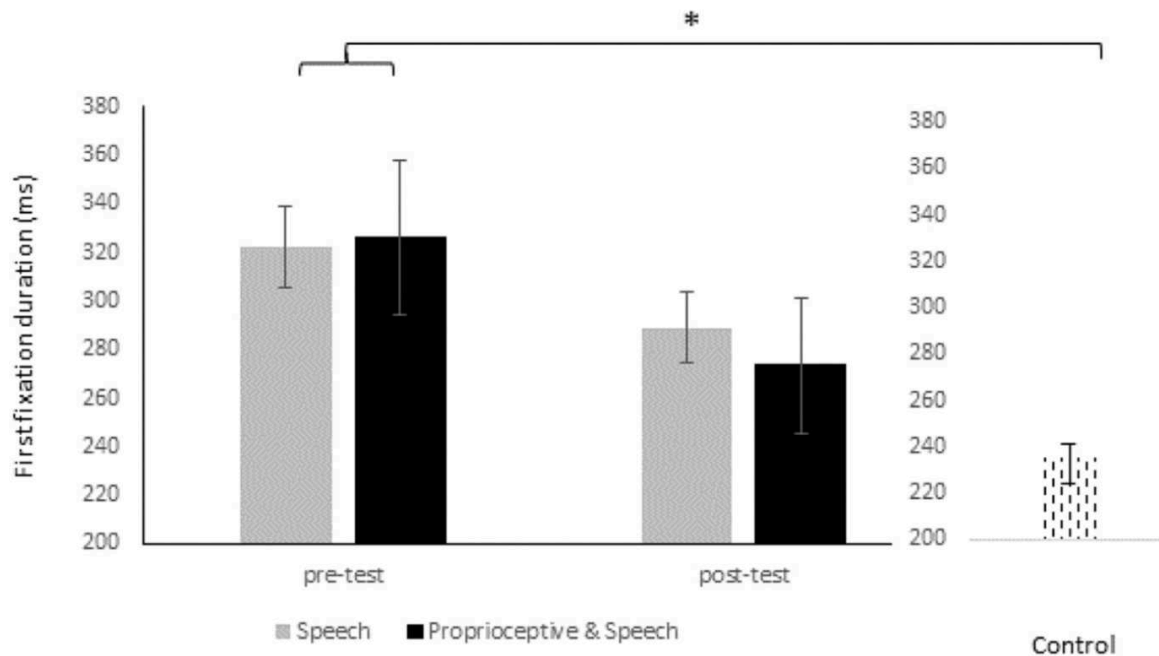


Figure 13. Moyenne et erreur standard de la DPF chez les enfants dyslexiques des groupes PST et ST, lors des évaluations pré et post-test (à gauche). Moyenne et erreur standard de la première fixation dans le groupe contrôle (à droite).

Durée du regard, critère principal

La figure 14 illustre les résultats globaux de la DR chez les enfants dyslexiques des deux groupes (ST et PST) au pré-test et au post-test, ainsi que la DR chez les normo-lecteurs (C). Au pré-test, l'écart général était similaire entre les lecteurs dyslexiques du groupe ST (556 ms) et ceux du groupe PST (539 ms), ($F(1,25) = 0,07$, $p = 0,7$), et les deux groupes présentaient un écart général significativement plus long que les normo-lecteurs (319 ms), ($F(1,25) = 18,30$, $p = 0,0002$). Au post-test, la DR était plus courte chez les enfants du groupe PST (376 ms) que ceux du groupe ST (467 ms), ($F(1,25) = 4,94$, $p = 0,03$). En outre, les enfants du groupe ST présentaient toujours une DR plus longue que les normo-lecteurs ($F(1,25) = 13,34$, $p = 0,002$), tandis que les enfants du groupe PST présentaient une DR similaire à celui des normo-lecteurs ($F(1,25) = 1,91$, $p = 0,18$) (Figure 14).

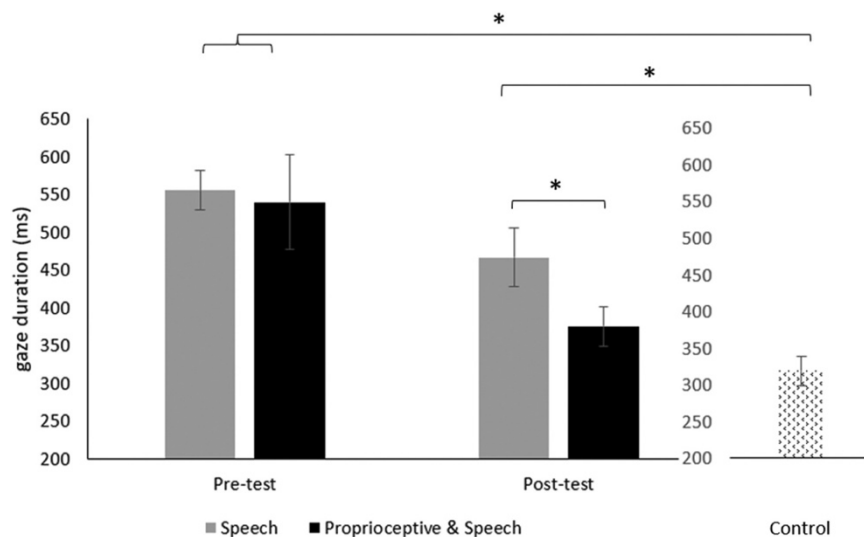


Figure 14. Moyennes et erreurs standard de la durée du regard pour les enfants dyslexiques des groupes PST et ST, lors des évaluations pré et post-test (à gauche). Moyenne et erreur standard de la durée du regard pour le groupe contrôle (à droite).

Amplitude des saccades

La figure 15 illustre l'amplitude des saccades, exprimée en degrés, dans les deux groupes d'enfants atteints de dyslexie développementale (ST et PST) avant et après le test, ainsi que chez les normo-lecteurs du groupe contrôle (C). Au pré-test, l'amplitude des saccades était similaire entre les lecteurs dyslexiques des groupes ST ($2,87^\circ$) et PST ($2,93^\circ$), ($F(1,25) = 0,11$, $p = 0,74$), et elle était significativement plus faible dans les deux groupes que chez les lecteurs normaux ($3,34^\circ$), ($F(1,25) = 18,30$, $p = 0,001$). Au post-test, l'AS était plus grande dans le groupe PST ($3,42^\circ$) que dans le groupe ST ($2,94^\circ$) ($F(1,25) = 4,94$, $p = 0,05$). Alors que les enfants du groupe ST présentaient toujours une amplitude de saccade inférieure à celle du groupe contrôle ($F(1,25) = 5,11$, $p = 0,03$). Les enfants du groupe PST présentaient une AS similaire à celle observée chez les normo-lecteurs ($F(1,25) = 0,01$, $p = 0,90$).

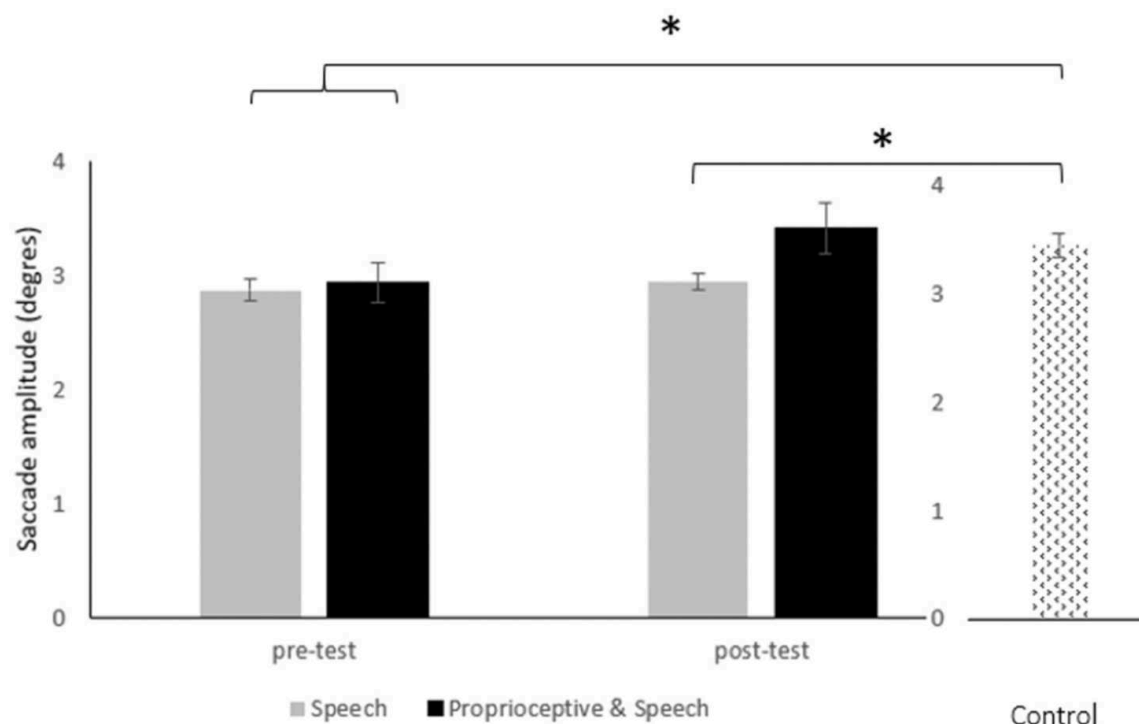


Figure 15. Moyenne et erreur standard de l'amplitude des saccades chez les enfants dyslexiques des groupes PST et ST lors des évaluations pré et post-test (à gauche). Moyenne et écart-type de l'amplitude des saccades dans le groupe contrôle (à droite).

Effet de fréquence des mots.

La figure 16 montre pour la durée du regard (l'accès lexical) les courbes à gauche pour le pré-test, et à droite pour le post-test. Dans les deux graphiques les résultats de gauche sont pour les mots de basse fréquence et ceux de droite pour les mots de haute fréquence.

Au départ, pour la durée du regard, l'effet de la fréquence est significatif pour le groupe ST, ($F(1,25)=10.32$, $p<0.004$, $\eta^2=0.41$), et pour le groupe PST ($F(1,25)=8.16$, $p<0.007$, $\eta^2=0.34$).

Les durées de regard étaient statistiquement différentes de celles des normo-lecteurs du groupe contrôle (C) : pour le groupe ST ($F(1,25)=12,25$, $p<0,002$, $\eta^2=0,49$) pour les basses fréquences ($F(1,25)=14,35$, $p<0,0008$, $\eta^2=1$) pour les hautes fréquences (Figure 16). Les durées de regard étaient statistiquement différentes de celles des normo-lecteurs du groupe contrôle (C) pour le groupe PST ($F(1,25)=5,33$, $p<0,03$, $\eta^2=0,21$) pour la basse fréquence ($F(1,25)=4,93$, $p=0,03$, $\eta^2=0,197$) pour la haute fréquence (f+).

À 9 mois, pour la durée du regard, les mots de basse fréquence concernant le groupe de normo-lecteurs du groupe de contrôle (C) sont non significatifs pour le groupe ST ($F(1,25)=3.94$, $p=0.058$, $\eta^2=0.16$) et non significatifs pour le groupe PST ($F(1,25)=0.31$, $p<0.57$, $\eta^2=0.01$). Pour la durée de regard des mots de haute fréquence vis-à-vis du groupe de normo-lecteurs du

groupe de contrôle (C) il existe une différence significative pour le groupe ST ($F(1.25)=14.3$, $p<0.0009$, $\eta^2=0.57$) et la différence est non significative pour le groupe PST ($F(1.25)=1.18$, $P>0.28$, $\eta^2=0.05$).

L'effet de la fréquence confirme ce qui a été observé précédemment : il n'y a pas plus de différences entre les mots de basse fréquence et de haute fréquence par rapport aux normo-lecteurs du groupe de contrôle (C) pour le groupe PST. Pour le groupe ST, les mots de basse fréquence ne présentent plus de différence significative et présentent une différence statistiquement significative pour les mots de haute fréquence. L'effet de fréquence est corrigé pour le groupe PST.

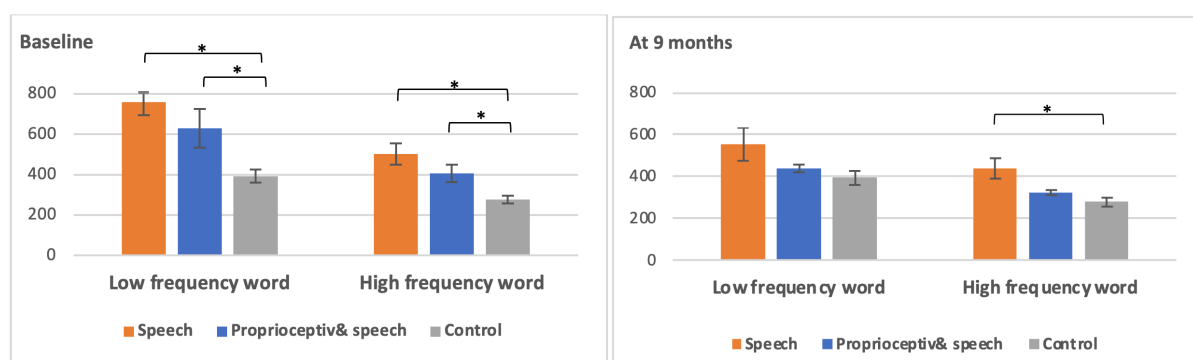


Figure 16. Moyenne et erreur standard de la durée de regard (DR) en pré et post test, pour les mots de basse fréquence à gauche dans les graphiques et pour les mots de haute fréquence, droite, exprimée en ms.

Réponses aux questions

Le taux de réponses correctes aux cinq questions après la lecture est resté statistiquement inchangé pour les groupes ST (57 % à 47 %, $t(7) = 0,9$, $p = 0,38$) et PSI (53 % à 41 %, $t(8) = 0,88$, $p = 0,39$), à la fois avant et après l'intervention. Ces résultats étaient inférieurs à ceux des normo-lecteurs qui ont obtenu un taux beaucoup plus élevé de réponses correctes (91 %, tous les $p = 0,005$), pour toutes les comparaisons d'enfants avec dyslexie développementale et les normo-lecteurs au pré-test et au post-test.

Événements indésirables

Nous n'avons pas identifié d'événements indésirables, ni constaté d'abandons de la part des enfants.

Discussion

Les résultats révèlent trois éléments i) l'ajout de l'intervention proprioceptive chez les enfants dyslexiques aurait un effet causal sur l'amélioration de la lecture silencieuse et orale avec un effet de taille fort (d de Cohen = 0,9), ii). Il n'y a pas d'effet de dépendance apparent entre l'amélioration de la lecture et l'intervention orthophonique chez les dyslexiques, iii) les dyslexiques présenteraient des déficits oculomoteurs, cognitifs des processus d'automatisation de la lecture et des troubles d'intégration multisensorielle et il existerait un lien de dépendance entre l'amélioration de ces déficits et l'ajout d'une intervention proprioceptive.

Notre hypothèse principale (H1) était qu'il existerait un lien de causalité entre l'ajout d'une intervention proprioceptive et l'amélioration de la lecture chez les dyslexiques en comparaison à l'intervention orthophonique de référence seule. L'hypothèse nulle h_0 : il n'y a pas de différence des compétences de la lecture entre l'ajout ou non de l'intervention proprioceptive. En cas de rejet de l'hypothèse nulle, l'hypothèse h_1 est : il existe un lien de causalité entre l'ajout de l'intervention proprioceptive et l'amélioration de la lecture des dyslexiques.

Nos résultats en post-test montrent que lorsque l'intervention proprioceptive est ajoutée au traitement orthophonique, il y a :

- Une amélioration significative de notre critère principal, la durée du regard (figure 14) du processus cognitif de la reconnaissance des mots de l'accès lexical qui devient significativement plus court dans le groupe PST que dans le groupe ST, et similaire entre le groupe PST et le groupe contrôle.
- Une amélioration significative des processus oculomoteurs, avec l'amplitude des saccades (figure 15) qui devient significativement plus longue dans le groupe PST que dans le groupe ST, et similaire entre le groupe PST et le groupe contrôle.
- Une amélioration significative des processus d'automatisation, avec des mots de haute fréquence de l'accès lexical de la durée de regard des mots de hautes fréquences (figure 16) qui deviennent significativement différents entre le groupe PST et le groupe ST, et similaires entre le groupe PST et le groupe contrôle.
- Pour la lecture orale, nos résultats en post-test montrent, uniquement en cas d'ajout de l'intervention proprioceptive à la prise en charge orthophonique, une amélioration significative de la lecture orale (table 3). En post-test le groupe PST présente un gain de lecture orale de 2,09 écarts types à l'indice C du test de l'Alouette-R vis-à-vis du groupe ST, avec un effet de taille fort (d de Cohen= 0,99).

L'ensemble de ces résultats sur les compétences en lecture que ce soit pour le critère principale (la durée de regard) ou soit pour les critères secondaire (lecture orale, processus oculomoteur, et processus d'automatisation de la lecture), montrent une différence significative entre l'ajout ou non d'une intervention proprioceptive à l'intervention orthophonique, cela fait rejeter l'hypothèse nulle (h_0) nous retenons donc l'hypothèse h_1 , c'est-à-dire qu'il existe un lien de causalité entre l'ajout de l'intervention proprioceptive et l'amélioration de la lecture des enfants dyslexiques. L'essai clinique contrôlé et randomisé est le gold standard pour évaluer un lien de causalité d'une intervention sur un trouble pathologique (Falissard, 2014 ; Hariton & Locascio, 2018 ; Tanaka et al., 2024)

Ce lien observé est uniquement un lien causal de l'effet de l'ajout de l'intervention proprioceptive sur l'amélioration de la lecture des enfants dyslexiques. Par exemple, il ne permet pas d'affirmer un lien de causalité entre la présence d'une dysfonction proprioceptive et la dyslexie développementale. Il ne pourrait au mieux que le suggérer en gardant à l'esprit qu'un lien déclencheur d'une pathologie est rarement univoque et plus souvent multifactoriel. Nos résultats semblent valider notre hypothèse principale d'un lien de causalité de l'effet de l'ajout de l'intervention proprioceptive sur l'amélioration de la lecture silencieuse des processus oculomoteurs (Bonifacci et al., 2023) (figure 15), des processus cognitifs de l'accès lexical (figure 14) et des processus d'automatisation (figure 16), ainsi que lors de la lecture orale (table 4). Il n'existe pas dans la littérature d'études qui ont montré l'impact de l'intervention proprioceptive sur l'analyse des mouvements oculaires lors de la lecture silencieuse. Mais ce résultat est cohérent avec l'effet significatif de l'intervention proprioceptive observée sur les compétences en lecture orale dans la dyslexie développementale, dont lors d'une étude en double aveugle Quercia et al., 2007 ; Quercia et al., 2012, 2015 ; Sampaio et al., 2009), et de l'amélioration des processus d'automatisation de doubles tâches (Vieira et al., 2009). Ce sont des résultats importants, car ces résultats semblent montrer l'intérêt de l'intervention proprioceptive pour améliorer et corriger les processus sensorimoteurs, cognitifs et d'automatisation de la lecture silencieuse qui s'inscrivent dans les théories sensorimotrices de la dyslexie développemental et s'inscrivent dans les processus d'automatisation du couple perception-action.

Hypothèse secondaire A (H_{2A}) : Il n'existerait pas de lien de dépendance entre l'intervention orthophonique et l'amélioration de la lecture des dyslexiques. Avec pour l'hypothèse nulle, l'hypothèse h_0 : Il n'y a pas de différence du niveau de lecture orale et silencieuse en pré-test et post-test pour l'intervention orthophonique. En cas de rejet de l'hypothèse nulle, l'hypothèse

h1 est : il existe un lien de dépendance entre l'intervention orthophonique et l'amélioration de la lecture des dyslexiques.

Nos résultats en post-test pour l'intervention orthophonique ne retrouvent pas d'effet significatif que ce soit pour la lecture silencieuse du critère principale de la durée de regard (figure 14), les processus oculomoteur (figure 15) et pour les processus d'automatisation (figure 16) et il en est de même pour la lecture orale avec l'observation de l'absence d'effet significatif de l'intervention orthophonique sur la lecture orale (table 3). Nos résultats confirment donc l'hypothèse h0 que nous gardons et montrent donc l'absence de lien de dépendance entre l'intervention orthophonique et l'amélioration de la lecture des dyslexiques. Cette absence de lien de dépendance à l'intervention orthophonique est cohérente avec l'absence d'effet de transfert à la lecture orale de l'amélioration des habiletés phonologiques par les interventions orthophoniques (Pennington, 2006 ; Torgesen et al., 1992). Cette absence de lien de dépendance entre les déficits en lecture et l'intervention orthophonique est cohérente avec la notion de résistance aux interventions qui définit la dyslexie développementale (APA, 2013). Ces résultats semblent donc infirmer tout lien de causalité entre le déficit des habiletés phonologique et la dyslexie développementale et questionne la justesse de la théorie cognitive d'un déficit unique des habiletés phonologique.

Mais nos résultats montrent en post test une amélioration significative pour les deux groupes (PST et ST) pour la lecture silencieuse des durées de première fixation (figure 13) et pour la durée de regard des mots de basse fréquence (figure 16). L'amélioration de la durée de regard pour les seuls mots de basse fréquence observé semblent cohérent avec l'amélioration des compétences des habiletés phonologiques sans transfert aux compétences de lecture chez les dyslexiques décrit dans la littérature (Pennington, 2006 ; Torgesen et al., 1992).

Notre dernière hypothèse secondaire B (H2B) : Il existerait un lien de dépendance chez les dyslexiques entre l'ajout d'une intervention proprioceptive et l'amélioration des processus d'intégration multisensorielle. L'hypothèse nulle h0 : Il n'y a pas d'amélioration des processus d'intégration multisensorielle entre l'ajout ou non de l'intervention proprioceptive. En cas de rejet l'hypothèse h0, nous prendrions l'hypothèse alternative h1 : Il existe un lien de dépendance entre l'ajout de l'intervention proprioceptive et l'amélioration des processus d'intégration multisensorielle.

Nos résultats sont en concordance avec cette hypothèse. En effet ils montrent en pré-test la présence de déficits d'intégration multisensorielle chez les dyslexiques sous la forme d'une

labilité de la référence spatiale (figure 10), et l'apparition de scotomes visuels par des stimulations auditives (figure 11). Nos résultats montrent en post-test une amélioration significative des déficits d'intégration multisensorielle observés uniquement en cas d'ajout d'une intervention proprioceptive que ce soit pour la labilité de référence spatiale (figure 10) ou pour l'apparition de scotomes visuels par des stimulations auditives (figure 11).

Ces résultats font donc rejeter l'hypothèse h0 et prendre l'hypothèse h1 : Il existe un lien de dépendance entre l'ajout de l'intervention proprioceptive et l'amélioration des processus d'intégration multisensorielle. La présence d'une labilité de la référence spatiale chez les dyslexiques et leur amélioration par l'intervention proprioceptive (figure 10) est conforme aux données de la littérature (Loureau et al., 2023 ; Quercia et al., 2015 ; Virlet et al., 2019). La présence de scotomes visuels induits par des sons confirme les travaux de Quercia et al., (2021). Cependant, la mise en évidence de l'amélioration significative par l'intervention proprioceptive des scotomes visuels induits par des sons (figure 11) est une nouveauté qui n'a jamais observée auparavant.

Le principal résultat de cette étude est que dans la dyslexie développementale nous validons la présence d'un lien de causalité de l'effet d'une intervention proprioceptive sur l'amélioration des capacités de lecture (figure 14, 15, 16, table 4). Ce résultat confirme la présence d'un lien de causalité de l'effet de l'intervention proprioceptive sur la lecture des dyslexiques dans l'étude en double aveugle de Quercia (et al., 2007) Il s'agit certainement d'une nouvelle étape importante dans la prise en charge des enfants atteints de dyslexie développementale qui devra être confirmée par des travaux complémentaires. La dyslexie développementale est principalement associée à des problèmes de lecture et d'écriture, mais, comme de nombreux chercheurs l'ont déjà suggéré, elle peut également englober des difficultés plus générales (Snowling et al., 2020). Nos résultats montrent que ces dernières peuvent être réduites significativement par une intervention proprioceptive spécifique (figure 14,15,16 et table 4). Ces résultats sont en faveur de l'hypothèse de déficits multiples chez les dyslexiques (Pennington, 2006).

Nos résultats semblent montrer que l'action de la stimulation sensorimotrice trigéminal à visée proprioceptive (Chen et al., 2022), chez les enfants dyslexiques, améliore 1) les déficits d'intégration multisensorielle (figure 10,11), 2) les saccades (figure 15) donc l'amélioration de la prédiction motrice (van de Walle de Ghelcke et al., 2021), 3) les fonctions cognitives visuelles (l'accès lexical) (figure 13) donc la qualité de la détermination de l'entrée rétinienne

(Roll et al., 1991 ; Zhao et al., 2023), 4) l'accès lexical (durée de regard) des mots de haute fréquence (figure 16), ce qui correspond à l'amélioration des processus de l'automatisation de la lecture. On sait que la capacité de lecture est sous-tendue par des mouvements oculaires complexes et fins (Franzen et al., 2021). Nos résultats montrent clairement une amélioration des mouvements oculaires pendant la lecture chez les enfants qui ont participé à l'intervention proprioceptive (figure 14,15,16). Avant l'intervention, les mouvements oculaires étaient désorganisés (figure 12, panneau de gauche), alors qu'après l'intervention, le regard était beaucoup plus clair et moins erratique (figure 12, panneau de droite). À notre connaissance, notre étude est la première à montrer une telle amélioration des mouvements oculaires après une intervention proprioceptive.

Après l'intervention proprioceptive, les enfants atteints de dyslexie développementale avaient une durée de regard réduite (figure 14) et une amplitude de saccade plus importante (figure 15) que leurs pairs qui n'avaient pas participé à l'intervention. Les enfants du groupe PST ont montré des résultats similaires à ceux du groupe de contrôle (figure 14,15,16)). L'amplitude des saccades est généralement indexée sur la difficulté de la lecture : elle diminue lorsque le texte est difficile et augmente lorsque le texte est facile (Rayner, 1998). Nous pouvons donc suggérer que nos données (diminution de la DR et augmentation de l'amplitude des saccades) (figure 14,15) sont cohérentes avec une amélioration de la lecture dans le groupe PST uniquement. Une étude récente randomisée avec crossover montre que la rééducation des praxies visuelles permettrait des améliorations significatives de la lecture et de la compréhension des textes chez les dyslexiques (Köse et al., 2024), et qui perdurerait dans le temps (Köse & Temizkan, 2024). Cela semble renforcer l'intérêt des approches sensorimotrices dans la dyslexie développementale. Ces résultats sont également en accord avec des résultats récents montrant que l'amélioration de la lecture due à la manipulation des couleurs chez des enfants atteints de dyslexie développementale est associée à l'amélioration des mouvements oculaires (Razuk et al., 2018). Il est intéressant de noter qu'une intervention proprioceptive ne modifie pas directement les schémas des mouvements oculaires, mais les modifieraient indirectement au moyen d'un changement général au niveau de l'intégration multisensorielle (figure 10, 11) (Quercia et al., 2015). En conséquence, cette étude semble démontrer qu'en cas d'ajout d'une intervention proprioceptive à une prise en charge orthophonique, les enfants atteints de dyslexie développementale pourraient lire plus rapidement et avec plus de fluidité. Nos résultats suggèrent que nous avons observé la bascule d'une remédiation à une restauration orthophonique des troubles pathologiques de la lecture des dyslexiques.

Chez les enfants dyslexiques testés dans cette étude, uniquement en cas d'ajout d'une intervention proprioceptive, nous avons observé l'amélioration de l'intégration multisensorielle de type audiovisuel (figure 11) (scotomes visuels induits par le son) (Quercia et al., 2020), et de type visuo-proprioceptif spatial (HVL) (figure 10) (Quercia et al., 2015). L'intégration multisensorielle implique des notions de cohérence spatiale, de vraisemblance, d'attention et de lien temporel impliquées dans les processus multisensoriels et sensorimoteurs (Jagini, 2021 ; Meilleur et al., 2020 ; Meng et al., 2022 ; Murray et al., 2016 ; Talcott et al., 2000 ; Wallace et al., 2006). Ces résultats sont cohérents avec l'implication du traitement temporel multisensoriel sur les capacités attentionnelles dans un paradigme de double tâche (Dean et al., 2017) et avec l'altération du profil temporel de l'interaction multisensorielle visuelle et auditive (Hairston et al., 2005 ; Van Laarhoven et al., 2018).

Il convient toutefois de mentionner certaines limites à notre étude. La première limite inhérente à un essai contrôlé randomisé c'est que nous comparons des moyennes. Une autre limite est que nous n'avons pas pu évaluer le QIT des enfants normo-lecteurs, mais les deux groupes d'enfants dyslexiques étaient dans la médiane et ne présentaient pas de différence significative. La troisième limite est que nous sommes partis d'un échantillon de 25 enfants recrutés par des orthophonistes pour atteindre la population cible de 24 enfants (taille de l'échantillon calculée en fonction de la puissance). Mais seuls 19 enfants ont suivi la procédure complète. Ce qui explique cet échantillon plus petit pour les évaluations de la lecture orale et silencieuse (table 4), mais sans biais d'attrition. Une dernière limite est que l'évaluation de l'intervention proprioceptive était globale, et que nous n'avons pas évalué les sous-interventions telle que le sommeil (Gorgoni et al., 2020 ; Guillemineault & Pelayo, 1998 ; Torres et al., 2021). Nous prévoyons ces évaluations dans une prochaine étude.

En conclusion, la dyslexie développementale se caractérise par une résistance à l'intervention, comme le confirment les résultats pour la lecture orale et silencieuse du groupe ST qui stagnent (table 4, figure 10, 11, 14, 15, 16). Il n'existe pas de lien de dépendance entre les capacités de lecture orale ou silencieuse et l'intervention orthophonique seule ce qui va à l'encontre de l'hypothèse d'un déficit cognitif unique des habiletés phonologiques. Les résultats par l'analyse des mouvements oculaires lors de la lecture silencieuse (figure 14,15,16) et orale (table 4) semblent confirmer l'intérêt de l'ajout d'une intervention proprioceptive sur les capacités de lecture des enfants atteints de dyslexie développementale (Quercia et al., 2007 ; Quercia et Marino, 2012 ; Quercia et al., 2015 ; Sampaio et al., 2009). En effet, ils semblent valider la présence d'un lien causalité de l'intervention proprioceptive sur l'amélioration de la lecture silencieuse et de la lecture orale. Nos résultats semblent montrer également la présence de

déficits oculomoteurs, de l'automatisation de la lecture qui présenteraient un lien de dépendance avec l'intervention proprioceptive. Nos résultats semblent mettre en évidence la bascule d'une remédiation à une restauration orthophonique de la lecture des dyslexiques. Bien que ces résultats confirment les travaux antérieurs, ils nécessitent d'être répliqués et ils devraient être pris en compte dans les recherches futures car ils semblent ouvrir des pistes prometteuses que ce soit dans la compréhension et/ou dans la prise en charge de la dyslexie développementale.

Chapitre 7- ÉTUDE NOSYDYS

Les enfants atteints de dyslexie développementale présentent un déficit du contrôle moteur indépendant de la lecture, caractérisé par un système dynamique de complexité non optimale qui sont corrigés par une intervention proprioceptive.

Étude de l'équilibre en position debout.

Introduction

Dans l'étude précédente (Prophodys) nous avons montré que les dyslexiques présentaient des déficits multiples dans les champs de l'intégration multisensorielle, dans les processus du contrôle oculomoteur, de la cognition, et dans les processus de l'automatisation de la lecture. L'ensemble de ces déficits sont améliorés, voire corrigés par l'ajout d'une intervention proprioceptive. Ces observations ont été réalisées lors de tâches de lecture. Même si ces résultats sont évocateurs d'un lien de causalité entre des déficits sensorimoteurs et le retard pathologique de la lecture des dyslexiques, ils ne permettent pas d'exclure un manque de pratique de la lecture pour expliquer la présence de ces déficits sensorimoteurs dans la dyslexie développementale, manque défendu par la théorie phonologique (Goswami, 2015 ; Ramus et al., 2003). Pour d'autres auteurs ce déficit sensorimoteur serait secondaire à un manque de pratique d'activité physique (Blanchet & Assaiante, 2022). Cette question est essentielle à la compréhension de la dyslexie développementale. En effet, la dyslexie développementale est-elle un processus cognitif unique indépendant des processus d'automatisation sensorimoteurs, ce qui nécessiterait alors de trouver un nouveau processus impliqué dans l'automatisation, ou est-elle une altération des processus sensorimoteurs impliqués dans les mécanismes d'automatisation du couple perception-action dont l'automatisation de la lecture serait un produit ?

Les dyslexiques présentent des déficits de la perception de la proprioception des mouvements lents indépendants de la lecture (Laprevotte et al., 2021). Les dyslexiques présentent aussi des déficits du contrôle moteur indépendants de la lecture, tels que l'équilibre debout chez les enfants (Legrand et al., 2012 ; Pozzo et al., 2006 ; Razuk et al., 2018 ; Rochelle & Talcott, 2006) ou chez les adultes (Patel et al., 2010). Ces déficits du contrôle moteur en équilibre debout dans la dyslexie développementale seraient associés à des troubles de l'attention (Bucci et al., 2013 ; Rochelle et al., 2009), à une altération des mécanismes d'intégration multisensorielle (Legrand et al., 2012, Viana et al., 2013), et à un manque d'informations visuelles (Barela et al., 2011 ; Razuk & Barela, 2014). Cependant, les déficits

du contrôle moteur de l'équilibre chez les enfants atteints de troubles du développement pourraient être corrigés par des informations sensorielles plus robustes (Barela et al., 2014 ; Razuk et al., 2019). Les déficits du contrôle moteur de l'équilibre dans la dyslexie développementale seraient dus à une altération des processus d'automatisation (Barela et al., 2011 ; Bucci et al., 2013 ; Vieira et al., 2009). Deux études ont montré dans la dyslexie développementale l'effet significatif de l'intervention proprioceptive lors de tâches d'équilibre en station debout sur les déficits des capacités attentionnelles (Quercia et al., 2011) et sur les déficits des capacités de doubles tâches (Vieira et al., 2009) impliqués dans la mémoire de travail et les processus d'automatisation (Nicolson & Fawcett, 1990). Une étude clinique randomisée contrôlée d'un programme de rééducation de la mémoire de travail verbale dans une situation de double tâche d'équilibre montre l'amélioration des compétences en lecture, de la mémoire de travail verbale et de l'équilibre (Ramezani et al., 2021). Les auteurs suggèrent que l'amélioration de l'automatisation de l'équilibre libère des capacités qui peuvent alors être utilisées pour des fonctions cognitives de la lecture, ce qui renforce la théorie cérébelleuse des déficits d'automatisations sensorimoteurs dans la dyslexie développementale (Nicolson & Fawcett, 1990).

Dans l'introduction de ce mémoire nous avons pu constater la multitude des déficits (Paulesu et al., 2014) présentés et débattus en ce qui concerne la dyslexie développementale, qui évoque un dysfonctionnement cérébral global qui pourrait peut-être se caractériser par l'état de fonctionnement des systèmes dynamiques. Certaines études avec sur la dyslexie développementale ont analysé la dynamique non linéaire de leurs comportements. La dynamique des mouvements oculaires pendant la lecture a été évaluée comme étant chaotique dans la dyslexie développementale (Iaconis et al, 2023-08 ; Méo et al., 2025). Une étude sur le contrôle moteur montre que le système dynamique chaotique est peu complexe et peu adaptable (Dupuy, 2019) en cas d'altération de la proprioception dans le syndrome d'Ehler Danlos (Dupuy, 2017), celui-ci est associé à une prévalence élevée de dyslexie développementale. Un autre exemple est la caractérisation d'un état chaotique d'un système dynamique chaotique dans la dyslexie développementale par l'analyse fractale des ondes EEG lors de la lecture (Lina et al, 2020).

La disproportion entre la petitesse des stimuli d'intervention proprioceptive et la multiplicité et l'importance des effets observés dans la dyslexie développementale suggère également une transition d'un état stochastique à un état stable du système dynamique chaotique, par un changement de l'état initial.

Il n'existe pas d'étude dans la dyslexie développementale sur l'effet de l'intervention proprioceptive sur le contrôle moteur de l'équilibre de la station debout, et sur la caractérisation de la complexité des systèmes dynamiques chaotiques.

Notre objectif est de montrer la présence, dans la dyslexie développementale, de déficits du contrôle moteur indépendants de la lecture, caractérisés par un système dynamique de complexité non optimale, évocateur d'un dysfonctionnement cérébral global sensible à l'intervention proprioceptive.

Nos hypothèses sont les suivantes :

- Hypothèse n°1 : Les dyslexiques présenteraient des déficits du contrôle moteur indépendant de la lecture. Ces déficits présenteraient un lien de dépendance avec l'intervention proprioceptive. L'hypothèse nulle h_0 : Il n'y a pas d'amélioration des déficits du contrôle moteur indépendants de la lecture entre l'ajout ou non de l'intervention proprioceptive. En cas de rejet l'hypothèse h_0 , nous retiendrons l'hypothèse h_1 : Il existe un lien de dépendance entre l'ajout de l'intervention proprioceptive et l'amélioration des déficits du contrôle moteur indépendants de la lecture.
- Hypothèse n°2 : Les dyslexiques présenteraient une complexité non optimale de leur système dynamique. Cette complexité non optimale présenterait un lien de dépendance à l'intervention proprioceptive. L'hypothèse nulle h_0 : Il n'y a pas d'amélioration de la complexité non optimale des systèmes dynamiques chaotiques des dyslexiques entre l'ajout ou non de l'intervention proprioceptive. En cas de rejet l'hypothèse h_0 , nous retiendrons l'hypothèse h_1 : Il existe un lien de dépendance entre l'ajout de l'intervention proprioceptive et l'amélioration de la complexité non optimale des systèmes dynamiques chaotiques des dyslexiques.

Méthodologie étude NOSODYS :

Étude prospective de cohorte, observationnelle, contrôlée, ponctuelle et monocentrique. Pour déterminer la taille de l'échantillon, nous nous sommes appuyés sur des études antérieures montrant une puissance de 0,90 pour l'effet d'une intervention proprioceptive sur la lecture orale et silencieuse. Pour un risque de première espèce de 0,05, un risque de seconde espèce de 0,10 et un écart type de 0,6, le nombre calculé de participants par groupe est de 8 (calculé avec *epiR* 1,04, Stevenson et al., 2017).

Participants :

32 enfants de sexe féminin ou masculin (sex-ratio : 1,34) âgés de 9 à 14 ans.

Dont 20 avec un diagnostic de dyslexie développementale.

- 12 dyslexiques avec une intervention orthophonique : **Groupe D**

- 8 dyslexiques avec une intervention orthophonique et proprioceptive depuis au moins trois mois : **Groupe P**

- 12 enfants ayant une lecture normale : **Groupe C** (Table 5)

Il n'y a pas de différence significative entre les trois groupes pour l'âge et le sexe (table 5).

-

Characteristics of the population						
	Groups	N	Mean	95% CI		Standar Deviation
				Lower	Upper	
Age, in months NS p>0,05	C	12	148.25	134.80	161.70	21.171
	D	12	130.83	122.36	139.31	13.334
	P	8	143.13	127.77	158.48	18.365
Sexe Ratio NS p>0,05	C	12	1.5833	1.25616	1.9105	0.51493
	D	12	1.2500	0.96264	1.5374	0.45227
	P	8	1.1250	0.82942	1.4206	0.35355

Table 5. Tableau descriptif par groupe (C=Contrôle ; D=Dyslexique avec une intervention orthophonique ; P=Dyslexie avec une intervention orthophonique et proprioceptive) pour l'âge et le sex-ratio.

Conditions expérimentales

Condition générale

La procédure expérimentale a été réalisée conformément à la Déclaration d'Helsinki et approuvée par le Comité d'éthique Recherche (CER Université de Lille). Les participants et leurs parents ont donné leur consentement éclairé par écrit avant l'expérience et ont reçu un compte rendu complet à la fin de l'étude.

Lieux de recherche

Initialement prévu à l'hôpital B (CHRU de Lille), la situation sanitaire 2020-2021 a nécessité, après accord du CER de l'Université de Lille, le transfert du lieu de recherche au cabinet médical du Dr Virlet au 801 route Nationale à Faumont (59310) dans une pièce dédiée, avec une salle d'attente séparée.

Matériels

Écran et vidéo projecteur :

Pour permettre la réalisation des tâches visuelles à réaliser dans cette étude (définies plus loin), nous avons utilisé une image projetée sur un écran de 3m par 1m. Les participants étaient placés à 1,95 m de cet écran, avec un angle visuel de 75°. Nous avons utilisé trois vidéoprojecteurs (Philips NeoPix Easy 2+) avec une résolution d'image de 1280×720 pixels, ce qui nous a permis de projeter une image unique de 3840×768 pixels.

Capteur de mouvement POLHEMUS :

Nous avons utilisé un système magnétique d'analyse du mouvement (Liberty 240/8-8 System, Polhemus, Colchester). Trois capteurs ont été utilisés : un sur la tête, un entre les omoplates (dos) et un au niveau du bassin (Figure 1). La fréquence d'acquisition du capteur magnétique est de 200 Hz.

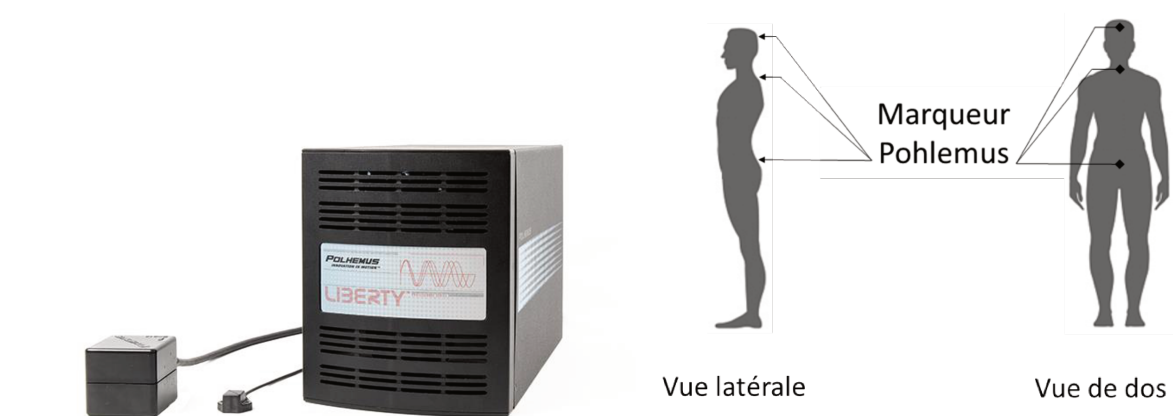


Figure 17. Système Liberty 240/8-8 System, 120 Hz, Polhemus, Colchester, VT, un marqueur sur la tête, un marqueur entre les omoplates et un marqueur sur le bassin.

Oculomètre Pupil Labs CORE : Nous avons utilisé un oculomètre pour mesurer les mouvements oculaires lors de la réalisation des différentes tâches visuelles. L'oculomètre Core est composé de 2 caméras infrarouges d'analyse des mouvements oculaires, résolution 192 x 192 px, fréquence de 240 Hz (figure 2).



Figure 18. Lunette Core Pupil Labs de face et de profil.



Figure 19. Pupil Labs CORE, porté (<https://pupil-labs.com>)

Pour suivre et enregistrer les données de l'expérimentation, nous avons utilisé le **logiciel Pupil Capture**. Ce logiciel lit les flux vidéo provenant de la caméra scénique et des caméras oculaires. Pupil Capture diffuse les données en temps réel. Pour extraire les données recueillies, nous avons utilisé le logiciel **Pupil Player**, c'est un logiciel d'extraction et d'exportation des données. Nous avons gardé les essais qui avaient enregistré plus de 80% des données.

Synchronisation : pour synchroniser nos données, nous avons utilisé un script Matlab qui déclenche simultanément l’affichage des images expérimentales et l’enregistrement des données du capteur des mouvements (tête, dos, et bassin) et les données oculomotrices.

Tâches expérimentales :

Nous avons utilisé deux types de tâches visuelles. Pour les deux premières tâches, les sujets devaient rester détendus, le regard droit devant, et ils devaient fixer une croix de fixation, qui était soit entourée d’un fond blanc (FCW) soit d’un fond avec l’image d’une pièce d’une maison (FCI).



Figure 20. Tâches de fixations d’une croix, fond d’écran

Dans deux autres tâches, les participants devaient explorer la scène avec une tâche de visualisation libre de l’image (OI), avec la consigne d'explorer librement toute l'image en s’intéressant au contenu de l’image. Dans la tâche de localisation d’objets dans l’image (SEI), la consigne était de visualiser l'objet situé dans l'encart apparaissant au centre supérieur de l'image, puis de le chercher dans l'image et une fois trouvé, de fixer l'objet trouvé pendant une seconde, puis de chercher l'objet suivant.



Figure 21. Taches de visualisation libre ou de recherche d'objets.

Chaque tâche impliquait une fixation initiale sur une croix pendant 3 secondes, suivie de 30 secondes d'exécution effective de la tâche. Chaque tâche comportait deux essais. L'ordre dans lequel les tâches étaient effectuées était aléatoire.

Procédures :

Les enfants dyslexiques et leurs parents ont été invités à participer à l'étude par leur orthophoniste, puis ils ont été reçus par l'investigateur sur le site de recherche pour vérification des critères d'inclusion et de non-inclusion. S'en est suivi la vérification et le recueil écrit des consentements. Le test commençait par une présentation du matériel et des tâches expérimentales de contrôle moteur. L'expérimentateur équipait l'enfant de capteurs de mouvements magnétiques (tête, dos, bassin). Puis il lui positionnait les pieds de façon standardisée (selon les normes définies par McIlroy & Maki, 1997) (figure 3). Il lui donnait les instructions pour la réalisation des tâches et les enregistrements des différents essais pouvaient alors commencer. Nous avons familiarisé l'enfant avec l'expérience en effectuant deux essais de la tâche de recherche avant de commencer les enregistrements. Entre chaque tâche de deux essais, le sujet était invité à s'asseoir et à se reposer.

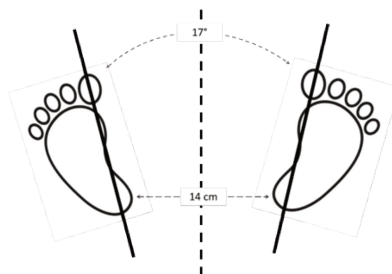


Figure 22. Positionnements des pieds selon la recommandation de McIlroy & Maki (1997)

Variable dépendante

Lecture orale : Test de l'Alouette-R (cf. : Paragraphe « Variable dépendante- méthodologie étude ProPhoDys - 9 ETUDE PROPHODYS)_.L'indice C du Test de l'Alouette-R, pour évaluer le niveau de lecture orale lors de l'inclusion.

Capacité d'intégration multisensorielle : (cf. : Paragraphe « Variable dépendante- méthodologie étude ProPhoDys – 9 ETUDE PROPHODYS).

Indice Maddox proprioceptif : IMP

Indice scotome visuel : ISV

Manœuvre de convergence podale : MCP

Données du contrôle moteur

Pour l'analyse du contrôle moteur, nous avons utilisé des mesures de la distance parcourue par une approche mathématique linéaire classique et par une approche mathématique fractale pour évaluer l'état de complexité du système dynamique chaotique.

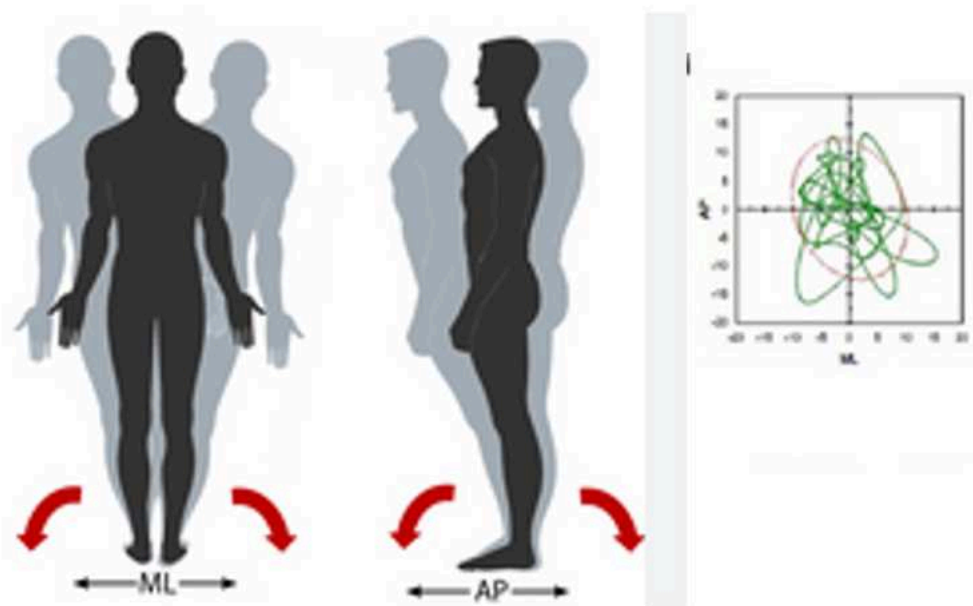


Figure 23. : Représentation de la distance parcourue d'un capteur, par la ligne verte (ML= médio latérale, AP= antéro postérieur).

Nous avons utilisé une variable dépendante linéaire pour analyser le mouvement, en évaluant la distance parcourue par le capteur considéré pour chaque groupe. Cela permet d'analyser le comportement en fonction des tâches effectuées.

Nous avons aussi utilisé une variable dépendante non linéaire avec α de l'analyse des fluctuations tendanciennes (α -DFA). Pour les calculs α -DFA, nous avons utilisé des séries temporelles de x à y. Nous avons utilisé une routine MATLAB pour calculer α -DFA (Ihlen, 2012). La α -DFA mesure l'autosimilarité, en fonction des différentes tailles des séries temporelles de distances parcourues. La α -DFA est inversement proportionnelle à la complexité et à l'adaptabilité du système, et donc à sa capacité d'apprentissage (Kirshner et al., 2014 ; Kuznetsov & Rhea, 2017). La α -DFA mesure l'état de fonctionnement du cerveau, qui est indépendant des tâches effectuées dans la même condition expérimentale. Cette variable α -DFA nous a permis pour chaque groupe, d'évaluer la complexité et l'adaptabilité du signal postural, en fonction des tâches effectuées.

Analyse statistique :

Nous avons rejeté l'hypothèse d'une distribution normale (test de Shapiro-Wilk) et de l'homogénéité de la variance (test de Levene) pour la plupart des données. Nous avons donc utilisé les tests non paramétriques unidirectionnels de Kruskal-Wallis pour comparer séparément les groupes et les tâches réalisées pour le chemin parcouru (Path) et α -DFA, avec l'utilisation de la comparaison par paire par le test de Dwass, Stells, Critchlow et Fligner.

Résultats

Seuls les résultats pour le capteur dorsal sont présentés ici. En effet, les résultats au niveau du capteur de la tête sont similaires à ceux du capteur dorsal et ceux du capteur pelvien ne sont pas significatifs.

Analyse linéaire de la distance parcourue (figure 24)

La comparaison entre les groupes pour la distance parcourue par le test non paramétrique de Kruskal- Wallis montre une différence significative et une taille d'effet élevé ($X^2= 24,99$, $p<0,000$ 1, $\epsilon^2=0,105$). La comparaison par paire de Dwass, Steel, Critchlow et Flignerde entre les groupes C et P n'a montré aucune différence ($p= 0,166$), mais des différences significatives entre les groupes D et C ($p<0,000$ 1) et entre D et P ($p=0,041$).

La comparaison entre les tâches pour la distance parcourue par le test de Kruskal-Wallis montre une différence significative avec un effet de taille important ($X^2= 34,94$, $p<0,000$ 1, $\epsilon^2=0,147$). La comparaison par paire de Dwass, Steel, Critchlow et Flignerde entre les tâches de fixation (FCW) et FCI n'a montré aucune différence ($p=0,97$), de même qu'entre les tâches

de visualisation (OI et SEI) ($p=0,99$). En revanche les comparaisons entre les tâches de fixation et de visualisation ont toutes montré une différence significative ($p<0,0001$).

Analyse non linéaire de la distance parcourue (α -DFA) (Figure 24)

La comparaison entre les groupes pour α -DFA par le test de Kruskal-Wallis montre une différence significative et un effet de taille important ($X^2=33,74$, $p<0,0001$, $\varepsilon^2=0,141$). La comparaison par paire Dwass, Steel, Critchlow et Fligner entre les groupes C et P n'a montré aucune différence ($p=0,119$) mais des différences entre les groupes D et C ($p<0,0001$) et entre les groupes D et P ($p=0,0088$).

La comparaison entre les tâches pour les α -DFA par le test de Kruskal-Wallis n'a pas montré de différence significative ($X^2=2,55$, $p=0,47$, $\varepsilon^2=0,011$). Les comparaisons par paire entre les différentes tâches n'ont montré aucune différence, elles ont toutes un $p>0,46$.

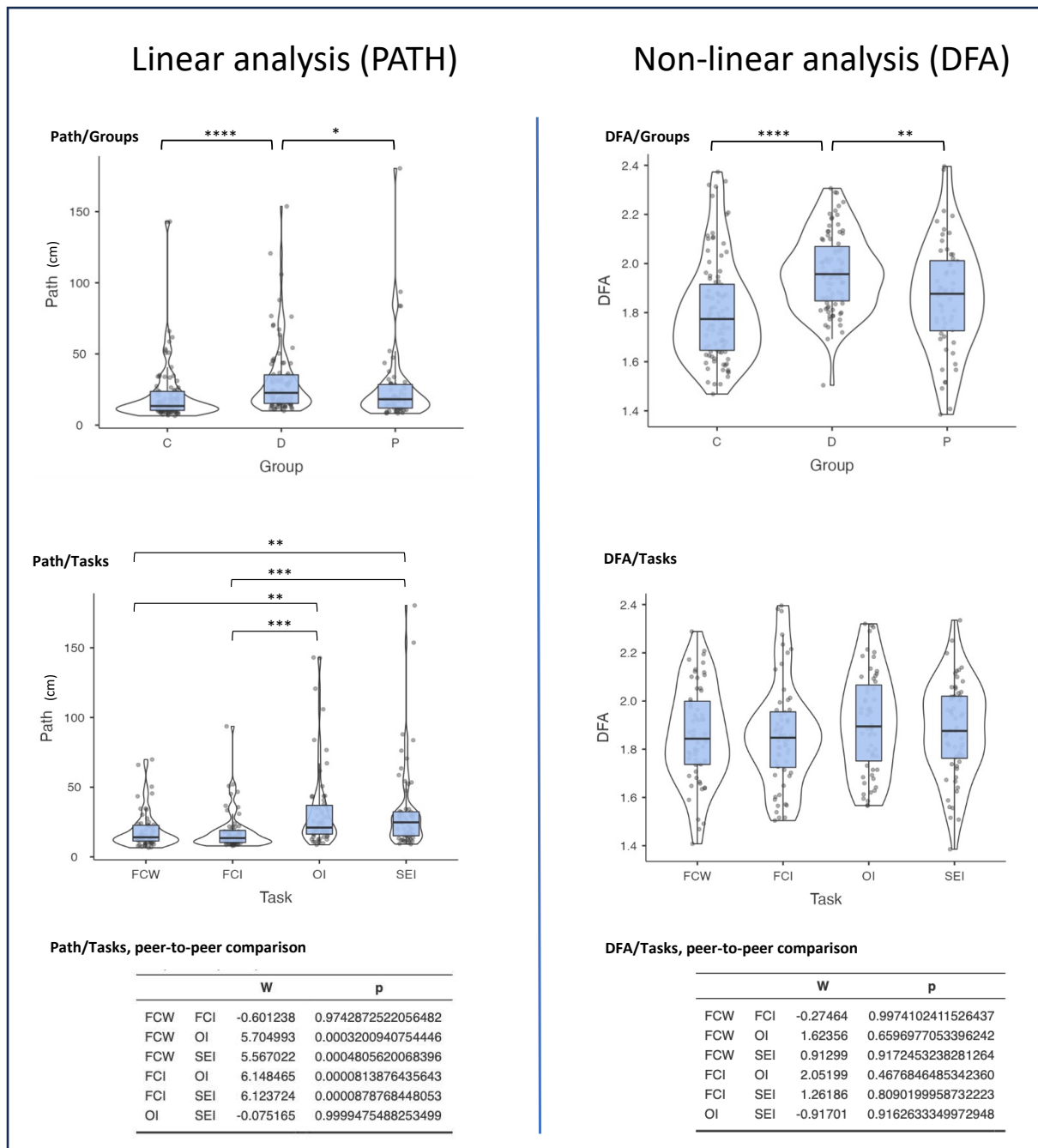


Figure 24. Analyse linéaire de la distance parcourue en cm (à gauche) et en analyse non linéaire (α -DFA) (à droite) en fonction des groupes (en haut) (Contrôle(C), Dyslexie avec une intervention orthophonique (D), Dyslexie avec une intervention orthophonique et proprioceptive (P)), ou des tâches (en bas) (FCW, FCI, OI, SEI). Analyse non paramétrique unidirectionnelle de Kruskal-Wallis et comparaison paire à paire de Dwass, Steel, Critchlow, et Fligner (W). Les boîtes à moustaches indiquent les médianes et les écarts interquartiles supérieurs et inférieurs. (* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, *** $p < 0.001$, **** $p < 0.0001$).

Discussion

Les résultats révèlent trois éléments : i) les groupes dyslexiques présenteraient un déficit du contrôle moteur indépendant de la lecture, ii) ils présenteraient un système dynamique de complexité non optimale, iii) Les déficits sensorimoteurs et la présence d'une complexité non optimale présenteraient un lien de dépendance à l'intervention proprioceptive.

Notre première hypothèse : Les dyslexiques présenteraient des déficits du contrôle moteur indépendant de la lecture. Ces déficits présenteraient un lien de dépendance avec l'intervention proprioceptive. L'hypothèse nulle h_0 : Il n'y a pas d'amélioration des déficits du contrôle moteur indépendants de la lecture entre l'ajout ou non de l'intervention proprioceptive. En cas de rejet l'hypothèse h_0 , nous retiendrons l'hypothèse h_1 : Il existe un lien de dépendance entre l'ajout de l'intervention proprioceptive et l'amélioration des déficits du contrôle moteur indépendants de la lecture.

Nos résultats semblent conforter cette première hypothèse. En effet nous devons rejeter l'hypothèse h_0 et donc garder l'hypothèse h_1 : il existe un lien de dépendance entre l'ajout de l'intervention proprioceptive et l'amélioration des déficits du contrôle moteur indépendants de la lecture. En effet, nos résultats montrent une différence significative entre le groupe D et les groupes C et P (figure 24). En outre, les résultats ne montrent aucune différence significative entre le groupe C et le groupe P (figure 24). La comparaison entre les tâches montre des différences significatives entre les tâches avec simple fixation et les tâches de visualisation (figure 24) pour les trois groupes ce qui montreraient une variabilité du comportement en fonction des tâches expérimentales. Ces résultats sont en adéquation avec les études qui montrent la présence des troubles du contrôle moteur chez les enfants dyslexiques (Barela et al., 2011 ; Legrand et al., 2012 ; Nicolson et al., 1999 ; Pozzo et al., 2006 ; Razuk et al., 2018 ; Rochelle & Talcott, 2006 ; Stein, 2023) ou chez les adultes dyslexiques (Patel et al., 2010). Nos résultats montreraient aussi que le groupe dyslexique avec une prise en charge proprioceptive ne présenterait pas de différence significative vis-à-vis du groupe normo-lecteurs pour le contrôle moteur. Ceci est cohérent avec les études qui montrent la correction des déficits de double tâches (Vieira et al., 2009), ou attentionnels (Quercia et al., 2011) lors de tâches de contrôle moteur en équilibre debout. L'amélioration du contrôle moteur par l'intervention proprioceptive ne semble pas en faveur d'un déficit du contrôle moteur secondaire à un manque de pratique de la lecture (Goswami, 2015 ; Ramus et al., 2003), ou d'un manque de pratique d'activité physique (Blanchet & Assaiante, 2022). C'est la première étude qui semble montrer, chez les dyslexiques, un lien de dépendance entre la présence de déficits du contrôle moteur indépendants de la lecture et l'intervention proprioceptive.

Hypothèse n°2 : Les dyslexiques présenteraient une complexité non optimale de leur système dynamique. Cette complexité non optimale présenterait un lien de dépendance à l'intervention proprioceptive. L'hypothèse nulle h_0 : Il n'y a pas d'amélioration de la complexité non optimale des systèmes dynamiques chaotiques des dyslexiques entre l'ajout ou non de l'intervention proprioceptive. En cas de rejet l'hypothèse h_0 , nous retiendrons l'hypothèse h_1 : Il existe un lien de dépendance entre l'ajout de l'intervention proprioceptive et l'amélioration de la complexité non optimale des systèmes dynamiques chaotiques des dyslexiques. Nos résultats semblent valider notre hypothèse. En effet, nous devons rejeter l'hypothèse h_0 et donc garder l'hypothèse h_1 : Il existe un lien de dépendance entre l'ajout de l'intervention proprioceptive et l'amélioration de la complexité non optimale des systèmes dynamiques chaotiques des dyslexiques. Car nos résultats semblent montrer pour l'analyse fractale du système dynamique (figure 24), une complexité optimale pour les groupes C et P sans différence significative pour les deux groupes, et ils montreraient une complexité non optimale pour le groupe D avec une différence significative vis-à-vis des groupes C et du P. La comparaison de la complexité entre les tâches expérimentales ne montrerait aucune différence significative entre les tâches expérimentales. Cette indépendance de la variabilité de la complexité aux tâches expérimentales, associée à la dépendance de la variabilité de la complexité aux groupes, confirmerait que la variabilité de la complexité entre les groupes serait l'expression d'une variabilité du fonctionnement cérébral global. En revanche c'est la première étude qui montrerait que les dyslexiques avec une prise en charge proprioceptive présenteraient une complexité équivalente aux normo-lecteurs. C'est un résultat fondamental, car il montrerait que l'intervention proprioceptive ne se contenterait pas de modifier le comportement lors d'une tâche expérimentale des participants, mais que l'intervention proprioceptive modifierait peut-être aussi le niveau de complexité du fonctionnement cérébral global et cela indépendamment de la lecture.

L'analyse des variabilités de la distance parcourue par des analyses linéaires et fractales semble montrer une bascule d'une phase instable à une phase stable d'un système dynamique chaotique (Stergiou & Decker, 2011). Mais nos résultats ne montrent pas si ce changement est immédiat après une modification de l'état initial du système.

Nos résultats semblent suggérer la présence dans la dyslexie développementale de troubles du contrôle moteur indépendants de la lecture (figure 24) caractérisés par la présence d'un système dynamique chaotique de complexité non optimale et de faible adaptabilité (figure 24). C'est cohérent avec la littérature récente qui montre la présence de système dynamique

chaotique en phase instable dans la dyslexie développementale (Iaconis et al., 2023 ; Lina et al., 2020 ; Méo et al., 2025).). La présence d'un système chaotique de complexité non optimale, associée au décalage entre la faiblesse des leurres utilisés par l'intervention proprioceptive et à la multiplicité des effets observés chez les dyslexiques (contrôle moteur, déficits des doubles tâches, trouble attentionnel, lecture) est en faveur de la transition d'une complexité non optimale à une complexité optimale d'un système dynamique permise par l'intervention proprioceptive. Nos résultats sont cohérents avec les connaissances de la théorie motrice de la perception, qui a permis d'appréhender l'approche du fonctionnement global du cerveau comme un système dynamique incluant de multiples sous-systèmes fonctionnels et adaptatifs suivant différents modes de fonctionnement interagissant à différents niveaux (Sudakov, 1997).

La présence dans la dyslexie développementale d'une diminution de la complexité (c'est-à-dire de la variabilité) des mesures non linéaires est, suivant la littérature (Da Costa et al., 2013), un indicateur d'une altération de l'adaptabilité et de l'apprentissage du système. Et l'amélioration de la complexité en cas d'intervention proprioceptive est un bon indicateur de son efficacité, suivant Da Costa et al., (2013). En effet, l'altération de la complexité est considérée comme une diminution de l'adaptabilité et de l'apprentissage d'un système.

Il nous a paru intéressant d'étudier le contrôle moteur par l'étude de l'équilibre en station debout. L'homme est le seul mammifère et le seul animal à présenter une locomotion en bipédie préférentielle (Druelle et al., 2022), ce qui nécessite une équilibration pour ne pas tomber. En effet, le corps est vivant et debout il oscille du fait de la respiration, de la circulation des fluides dans le corps, des contractions/décontractions des muscles et de la petite base de support (espace entre les pieds) par rapport à la grande hauteur du corps et à son grand nombre de degrés de liberté (définis par le nombre d'articulations). L'accomplissement de ces tâches implique un processus d'anticipation extrêmement développé pour éviter les multiples chutes possibles en cas de rupture l'équilibre. L'homme l'a expérimenté dans l'apprentissage de la marche (Druelle et al., 2022) « *Les nourrissons apprennent à apprendre - à évaluer les possibilités d'action, à modifier les mouvements en cours et à générer de nouveaux mouvements à la volée, d'une étape à l'autre* » (Cole & Adolphe, 2023).

Une limite inhérente à une étude de cohorte, c'est que nous ne savons pas si les échantillons de population sont comparables au départ. Une autre limite de ce travail est que nous n'avons pas effectué des analyses plus avancées des données du système dynamique chaotique en analysant l'entropie, ou la variation du coefficient α de la pente entre les séries temporelles à fenêtre courte et longue, ce qui pourrait mettre en lumière l'implication des fonctions de bas et de haut niveau (Stergiou & Decker, 2011) de nos résultats. Ceci aurait pu

nous permettre de les comparer aux données de la littérature sur l'effet de l'intervention proprioceptive sur les processus sensorimoteurs de bas niveau (c'est-à-dire le contrôle moteur) et sur les processus cognitifs de haut niveau (la lecture) dans la dyslexie développementale. Une autre limite est que ce travail n'est pas longitudinal. Et enfin, une dernière limite, qui est aussi une ouverture, c'est que nous n'avons pas abordé la cause de la présence d'un système dynamique chaotique de complexité non optimale et moins adaptable chez les enfants dyslexiques.

Nos résultats semblent montrer dans la dyslexie développementale, la présence d'un déficit du contrôle moteur de l'équilibre debout indépendant de la lecture, et la présence d'un dysfonctionnement cérébral global sous la forme d'un système dynamique chaotique de complexité non optimale avec une faible adaptabilité qui présenteraient un lien de dépendance à l'intervention proprioceptive. Ces résultats seraient évocateurs de la présence de déficits de l'automatisation du contrôle moteur indépendant de la lecture dans la dyslexie développementale qui présenterait un lien de dépendance à l'intervention proprioceptive. Nos résultats montreraient la bascule d'un système dynamique d'une complexité non optimale à une complexité optimale, donc avec une meilleure prédictibilité, donc une meilleure adaptabilité du système dynamique chaotique. Ces résultats semblent confirmer nos hypothèses et répondent à notre objectif. Ils soutiennent les approches théoriques de déficits sensorimoteurs et suggèrent la présence d'un dysfonctionnement cérébral global dans la dyslexie développementale qui viendrait perturber les capacités d'automatisation sensorimotrices du couple perception-action, dont l'automatisation de la lecture.

Chapitre 8- ÉTUDE MAXWEL-CO-LE

Étude du lien entre le statut de symétrie des taches de MAXWELL, le contrôle moteur et la vitesse de lecture des enfants avec une dyslexie développementale.

Introduction

Dans les études précédentes nous avons observé dans la dyslexie développementale i) un lien de causalité entre l'intervention proprioceptive et l'amélioration des compétences de lecture, d'automatisation de la lecture et du contrôle oculomoteur, ii) un lien de dépendance entre l'intervention proprioceptive et la présence de déficits du contrôle moteur indépendants de la lecture et la présence d'une dysfonction cérébrale globale caractérisée par une complexité non optimale d'un système dynamique chaotique.

Parmi les nombreuses limites, nous avons soulevé le fait que nous avons évalué l'intervention proprioceptive dans sa globalité, sans évaluer ses différents axes d'action. Le premier axe d'action de l'intervention proprioceptive vise par l'utilisation de leurres sensoriels (prismes actifs, stimulations sensorielles buccales, et stimulations proprioceptives des soles plantaires) à corriger les déficits d'intégration multisensorielle (distribution du tonus musculaire, labilité de la référence spatiale, et déficit perceptif à type de scotomes visuels). Le deuxième axe vise, par l'utilisation d'exercices respiratoires diaphragmatiques, à réduire les micro-réveils du syndrome de haute résistance des voies aériennes supérieures du sommeil paradoxal (Arnold et Guilleminault, 2019).

Nous ne savons pas, si l'utilisation seule de prismes actifs à visée trigéminal pour corriger l'asymétrie tonique permet d'améliorer le déficit du contrôle moteur et de la vitesse de lecture dans la dyslexie développementale.

Un système dynamique chaotique est caractérisé par la possibilité d'un changement de phase immédiat en fonction de la modification de l'état initial du système. Nous avons montré que l'intervention proprioceptive permettrait le changement de phase d'un système dynamique chaotique, mais nous ne savons pas si la modification de l'état initial permis par l'intervention proprioceptive provoque un effet immédiat.

Une question soulevée par nos résultats est de comprendre pourquoi les dyslexiques présenteraient une dysfonction cérébrale globale caractérisée par un système dynamique chaotique de complexité non optimale. Une piste existe dans la pathologie du collagène du

syndrome d'Ehler Danlos dont les anomalies du collagène viendraient impacter les caractéristiques mécaniques des capteurs proprioceptifs qui s'exprimeraient par la présence d'une dysfonction proprioceptive (Dupuy, 2019), associée à une prévalence élevée de dyslexie développementale (Kozyra et al., 2024) et associée aussi à un système dynamique chaotique de complexité non optimale de (Dupuy, 2019) qui serait amélioré par l'utilisation de vêtements compressifs. Une autre piste d'un facteur déclencheur d'une phase de complexité non optimale d'un système dynamique chaotique décrit dans la dyslexie développementale serait la présence de taches de Maxwell symétriques (Le Floch & Ropars, 2017). La symétrie des taches de Maxwell provoquerait l'absence de saillance nécessaire à l'émergence d'une référence unique et stable indispensable à la coordination des hémisphères. Ce qui induirait un encombrement visuel et une instabilité du lien entre les deux hémisphères avec l'apparition d'un fonctionnement de complexité non optimale du système dynamique chaotique donc peut-être du dysfonctionnement cérébral global.

Le Floch et Ropards (2017) ont montré, par l'utilisation d'un foveascope, la présence de taches de Maxwell (TM) symétriques chez de jeunes adultes dyslexiques et asymétriques chez de jeunes adultes normo-lecteurs. Les TM sont une zone de la rétine qui ne comporte pas de cônes bleus, mais uniquement des cônes verts et rouges. Cette étude n'a jamais été confirmée. Suivant cette étude, la présence d'un état symétrique des TM peut s'accompagner d'une dyslexie développementale. Nous venons d'observer que les sujets dyslexiques développementaux présentent des troubles d'intégration multisensorielle d'ordre tonique. La manipulation de l'état de symétrie des TM devrait donc s'accompagner d'une modification de la distribution tonique chez les dyslexiques développementaux et chez les sujets normo-lecteurs.

Nous constatons dans les études publiées l'absence de d'évaluation de la présence de TM symétriques dans la dyslexie développementale, et de l'effet de la manipulation de la symétrie des TM sur la distribution du tonus musculaire et la vitesse de lecture des dyslexiques.

Objectif : Notre premier objectif est de rechercher la présence de l'effet d'une modification de l'état initial qui serait permis par l'intervention proprioceptive qui est la première condition pour caractériser un système dynamique chaotique. Notre deuxième objectif est d'évaluer l'effet de la manipulation de la symétrie supposée des taches de Maxwell sur la distribution du tonus musculaire.

Nos hypothèses :

- Hypothèse n°1 : La constatation d'un lien de corrélation entre la présence de taches de Maxwell symétriques chez les enfants dyslexiques et la présence d'une altération de la distribution du tonus musculaire, et inversement chez les enfants normo-lecteurs.
- Hypothèse n°2 : L'asymétrisation expérimentale des taches de Maxwell des enfants dyslexiques pourrait corriger l'altération de la distribution du tonus musculaire, et inversement chez les enfants normo-lecteurs.
- Hypothèse n° 3 : Il existerait un lien de dépendance entre la correction de la distribution du tonus musculaire par l'utilisation raisonnée de prismes actifs et l'amélioration de la vitesse de lecture des enfants dyslexiques. L'hypothèse nulle h_0 : Il n'y a pas d'amélioration significative de la vitesse de lecture avant ou après la correction de la distribution du tonus musculaire par l'utilisation de prismes actifs de façon raisonnée. En cas de rejet de l'hypothèse h_0 nous retiendrons l'hypothèse h_1 : Il existe un lien de dépendance entre la correction de la distribution du tonus musculaire par l'utilisation de prismes actifs et l'amélioration de la vitesse de la lecture des dyslexiques.

Méthodologie étude MAXWELL-CO-LE

Étude prospective, interventionnelle, ponctuelle, monocentrique, avec pré et post-test de lecture, non randomisée réalisée au laboratoire de l'étude du mouvement de l'Université d'État de Sao Paulo, à Rio Claro, dans le cadre de la collaboration mise en place avec l'université et avec les organismes de coopération CAPES- COFECUB.

L'étude Prophodys a confirmé une puissance a priori de 0,90. Nous avons donc calculé la taille de l'échantillon pour la comparaison de deux groupes (test et post-test), avec un risque de première espèce de 0,05, un risque de deuxième espèce de 0,10 et un écart type de 0,90. Le nombre de participants par groupe est de 11 (calculé avec epiR package 0.9-30, Stevenson et al., 2017). Pour tenir compte des aléas expérimentaux, nous avons constitué un groupe de 15 enfants dyslexiques.

Participants :

15 enfants dyslexiques de 7 à 14 ans (M : 10,1 ans, SD 2,09) (11 F / 4 G)

11 normo-lecteurs de 10 à 22 ans (M : 16,1 ans, SD 4,4) (8 F / 3G)

Les diagnostics de dyslexie a été établi par une équipe pluridisciplinaire (orthophoniste, psychopédagogue, neurologue), pour six enfants. Les autres enfants présentaient un retard en lecture pathologique malgré des adaptations et sur recommandation d'orthophonistes et de psychopédagogues, pour 9 enfants. Au Brésil, le coût d'un rapport diagnostique est extrêmement élevé, de sorte que tous les enfants ne disposent pas de rapport multidisciplinaire

Conditions expérimentales

Condition générale

La procédure expérimentale a été réalisée conformément à la Déclaration d'Helsinki et approuvée par le Comité d'éthique de l'Université d'État de Sao Paulo (CAAE 19418419.7.0000.5465, numéro d'avis 3.573.053). Après information et explication, les participants et leurs parents ont donné leur consentement éclairé, recueilli par écrit par les chercheurs brésiliens.

Lieux de recherche : LEM (Laboratório para Estudos do Movimento), Institut of Bioscience, Université d'État de Sao Paulo, Rio Claro, Brésil.

Appareils

Test de Worth : il permet d'évaluer la fusion et la diplopie (Fusion, exodéviatation, ensodéviatation, hypertrophie droite ou gauche).

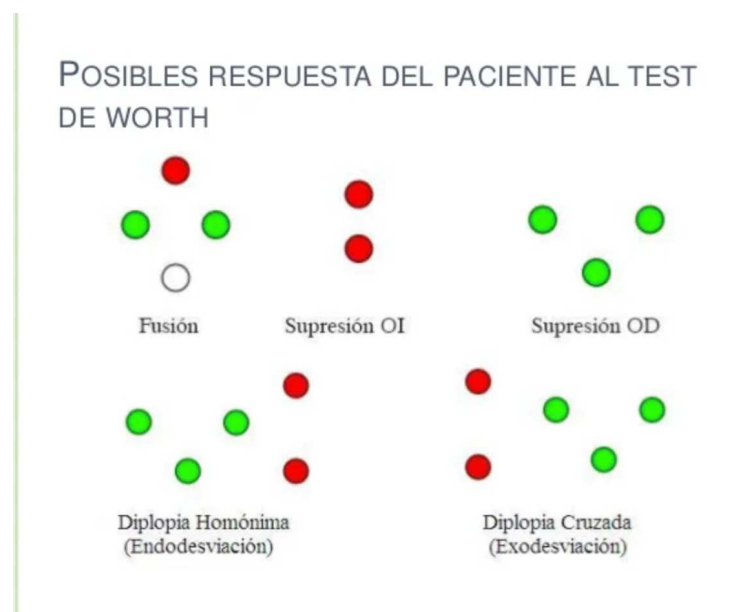


Figure 25. Test de Worth

Mesure de la convergence mesurée avec une règle graduée en cm.

Test de l'œil directeur : Il existe beaucoup de définitions de l'œil directeur. Nous avons décidé de le déterminer en demandant au sujet de regarder une cible à travers un opercule au milieu d'une feuille A4 noire.

Taches de Maxwell Observées (TMO) : test réalisé grâce à un fovéascope par l'observation d'un fond blanc lumineux à travers un filtre vert (530 nm) puis bleu (430 nm) avec une alternance des filtres à 0,2 Hz (soit une alternance toutes les 5 secondes). Les participants peuvent observer (Figure 26) et qualifier l'état de symétrie des TM (symétriques ou asymétriques) afin de déterminer la TMO qualitative perçue par le sujet. Nous avons demandé aux participants de dessiner sur une tablette leurs TMO (Figure 26), ce qui a permis d'en tracer une approche vectorielle, pour ensuite en calculer le rapport d'ellipse (figure : 27) pour déterminer la TMO calculée d'après le dessin réalisé par le sujet.

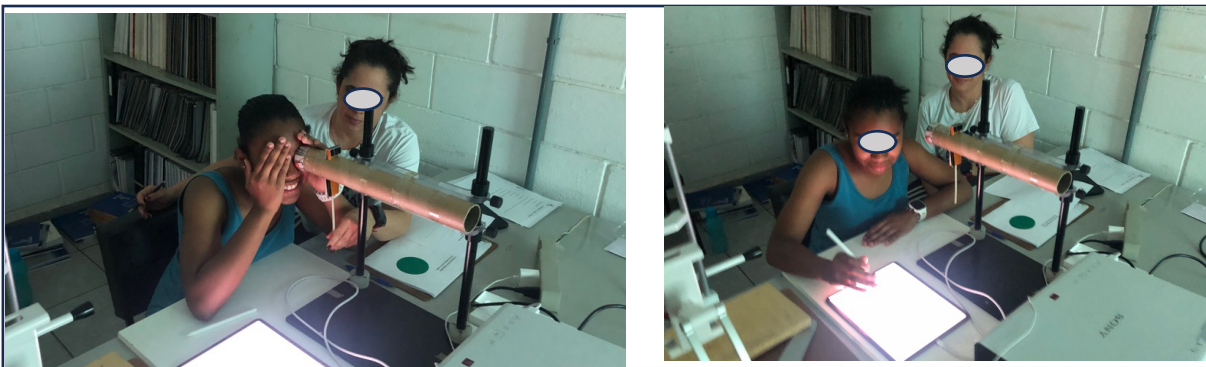


Figure 26. Observation au fovéascope de la tache de Maxwell gauche du sujet (à gauche), Transcription sur une tablette de la tache de Maxwell observée (à droite)

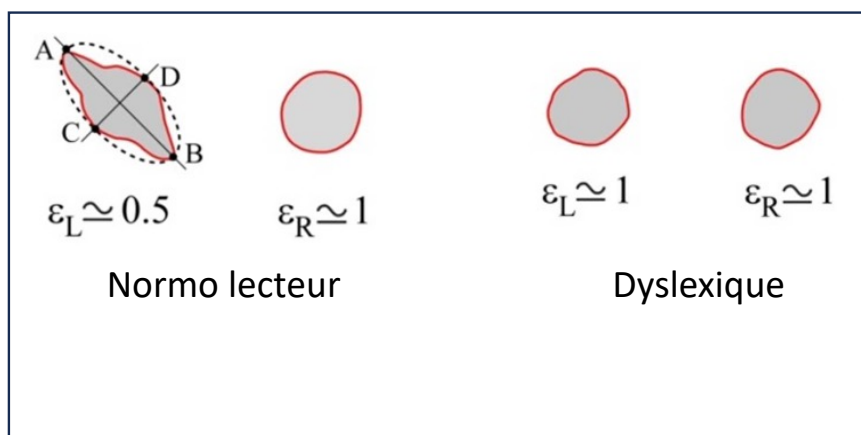


Figure 27. État de symétrie des taches de Maxwell selon la présence ou non d'une dyslexie chez de jeunes adultes (Lefloch & Ropars, 2017).

Tache de Maxwell Fonctionnelle (TMF) : tache déterminée à la Manœuvre de Convergence Podale (MCP) (Figure 28) avec l'utilisation d'une lentille floutée sur 3 mm de diamètre en son centre (Figure 29) pour atténuer la focalisation de la fovéa de la TM située derrière la lentille. La TMF se détermine en trois étapes : Étape 1 : détermine l'état de la distribution du tonus musculaire initial de base (Figure 30). Étape 2 : détermine l'état de distribution du tonus musculaire lors de l'atténuation de la TM droite (Figure 31). Étape 3 : détermine l'état de distribution du tonus musculaire lors de l'atténuation de la TM gauche (Figure 32).

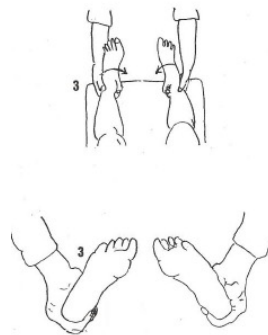


Figure 28. Manœuvre de convergence podale



Figure 29. Lentille floutée

TMF Symétrique :

Base : Asymétrie de distribution du tonus musculaire = TMF Symétrique



Figure 30. Étape 1, TMF à l'état de base avec une asymétrie du tonus musculaire



Figure 31. Étape 2, Œil droit avec lentille floutée : Symétrisation de la distribution du tonus musculaire, car crée une asymétrie des TMF.

Puis idem avec l'œil gauche lentille floutée : Symétrisation de la distribution du tonus musculaire, car crée une asymétrie des TMF.



Figure 32. Étape 3, Œil gauche avec une lentille floutée : Symétrisation de la distribution du tonus musculaire, car crée une asymétrie des TMF.

TMF Asymétrie :

Base : Présence d'une symétrie de la distribution du tonus musculaire = TMF Asymétrie avec la dominance d'un œil. La détermination de l'œil TMF dominant se détermine avec la lentille floutée à la MCP.

- Œil TMF dominant + lentille floutée => cela crée fonctionnellement une symétrie des TM, avec pour conséquence un déséquilibre de la distribution du tonus musculaire.
- Œil TMF dominé + lentille floutée => ne modifie pas l'asymétrie des TM, donc présence d'une distribution équilibrée du tonus musculaire (ne modifie pas l'asymétrie initiale des TM).

Matériel de lecture.

Nous avons utilisé 6 textes extraits de livres pour enfants de 7 à 9 ans, avec un ordre de passage aléatoire contrôlé. Quatre lignes de texte en portugais extraites d'un livre pour enfants ont été présentées sur un écran d'ordinateur devant chaque enfant. Le paragraphe contenait 40 mots et 174 caractères. Le texte avait une largeur de 29° et une hauteur de 6,4°, et la largeur moyenne des caractères était de 0,5°. Le texte était écrit en police « Courier » noire sur fond blanc. Les textes étaient adaptés pour des enfants de 7-9 ans. Chaque enfant devait lire le texte en silence et, à la fin de chaque lecture, l'expérimentateur posait quelques questions à chaque enfant pour s'assurer qu'il avait lu et compris le contenu du texte.

Interventions

Lentille floutée en son centre d'un diamètre de 3mm, que l'on place devant la pupille à 2-3 cm, pour atténuer la focalisation de la fovéa et de la tache de Maxwell correspondante.

Prismes actifs chez les enfants avec une TMF Symétrique. Le choix du type de prisme actif se fait par la Manœuvre de Convergence Podale en 3 Dimensions de Jonnier (MCP 3D J). Elle permet de déterminer les muscles oculaires obliques (supérieurs ou inférieurs), cibles des prismes actifs, leur puissance et leur axe.

Procédure

Après l'explication de l'étude aux parents et aux enfants, les investigateurs brésiliens recueillent le consentement des parents et des enfants. Les enfants en premier passent des tests visuels pour déterminer l'œil dominant, la fusion binoculaire, et leur capacité de convergence oculaire. Ensuite, les enfants recherchent leurs TMO qualitatives et les dessinent avec le foveascope. Les enfants dyslexiques réalisent le pré-test de lecture, puis le test de la MCP 3D de Jonnier pour déterminer leur TMF, et déterminer les prismes pour les enfants dyslexiques avec une TMF symétrique. Finalement, après une demi-heure pour s'adapter aux prismes actifs, les participants réalisent le post-test de lecture.

Variables dépendantes :

Pour la lecture, nous n'avons pu utiliser que le temps de lecture exprimé en secondes, car il était matériellement impossible, en post-test de lecture, d'utiliser l'Eye-tracker avec les lunettes d'essai nécessaires aux prismes actifs.

Nous avons pu déterminer les TMO qualitatives, les TMO calculées et les TMF. Nous avons pu déterminer le statut (équilibré ou déséquilibré) de la distribution du tonus musculaire au MCP 3D de Jonnier.

Analyses statistiques

Pour la comparaison des TM et la distribution du tonus musculaire en fonction des groupes, les données étaient non paramétriques. Nous avons donc utilisé le test non paramétrique de Kuskal-Wallis.

Pour la lecture, la distribution des données de lecture n'était pas normalisée, mais elle présentait une distribution logarithmique. Nous avons donc effectué une transformation en log 10. Puis nous avons réalisé un test de Student apparié.

Résultats

1) Les taches de Maxwell TM (TMO qualitative, TMF), et la distribution du tonus musculaire des rotateurs externes des hanches

Le coefficient r de la corrélation de Pearson montre que les TMO qualitatives et la distribution du tonus musculaire sont liées, avec le r de Pearson = 0,50, $p = 0,0085$. Le test non paramétrique de Kruskal-Wallis montre un effet de groupe (D/C) pour les TMF, avec une taille d'effet très élevée ($X^2=26$, $p<0,000.1$, $\varepsilon^2=1$), de même pour la distribution du tonus musculaire ($X^2=26$, $p<0,000.1$, $\varepsilon^2=1$), mais avec une taille d'effet moindre pour les TMO qualitatives ($X^2=9,1$, $p<0,0026$, $\varepsilon^2=0,35$).

	Contrôle Moteur		Taches de Maxwell fonctionnelles (Lentille floutée)			
Tonus musculaire	Asymétrie-Tonique	Symétrie-Tonique	Droite	Gauche	Symétrique	Total
Normo-Lecteur	0	11	5	6	0	11
Dyslexique	15	0	0	0	15	15

Table 6. Résultats du contrôle moteur à la MCP (à gauche), et de la TMF (à droite), pour les participants normo-lecteurs et dyslexiques.

	Tâches de Maxwell Observées, au fovéascope			
	Non Observées	Asymétrique	Symétrique	Total
Normo-Lecteur	1	9	1	11
Dyslexique	2	1	12	15

Table 7. Résultats des TMF Observées, pour les participants normo-lecteurs et dyslexiques.

2) Les taches de Maxwell : TMO calculées

Les analyses de TMO calculées ont été réalisées par Rosa Berzghal, étudiante à l'université d'État de Sao Paulo. Elle les a réalisées dans le cadre de son mémoire de fin d'études avec la collaboration CAPES-COFECUB entre l'Université d'État de Sao Paulo et l'Université de Lille. Elle a extrait les données vectorielles, les dessins des TMO, puis calculé le statut de symétrie des taches de Maxwell en fonction des groupes. Sa conclusion est que les enfants dyslexiques et non dyslexiques ne montrent aucune différence significative dans ces variables ($F(1,25)=0,25$, $p>0,05$).

3) Évolution du temps de lecture des enfants dyslexiques, en cas de correction du déséquilibre de la distribution tonique par l'utilisation de prismes actifs

La correction de l'asymétrie de la distribution du tonus musculaire, lors de la manœuvre de convergence podale dans les trois dimensions, par l'utilisation de prismes actifs chez les enfants dyslexiques, permet d'observer une réduction de 43% du temps de lecture, qui était de 89,197 s au pré-test, puis de 50,915 s au post-test, avec un effet significatif au test de Student apparié avec une taille d'effet importante ($t= 3,733$, $p=0,0022$, d de Cohen=0,96). Les textes de lecture testés furent attribués aléatoirement pour supprimer un effet de test et de re-test (figure 33).

ID	Ages	Pré	Post
1	13	19,957	13,805
2	11	316,395	104,755
3	7	330,953	180,460
4	12	21,721	22,460
5	12	27,615	23,870
6	9	182,170	115,290
7	8	111,950	41,720
8	10	48,500	40,525
9	10	37,000	37,810
10	14	29,500	18,100
11	10	40,500	41,430
12	11	25,500	16,370
13	11	30,000	26,760
14	8	27,000	29,460
15	7	69,075	40,400
Moyenne		89,197	50,915

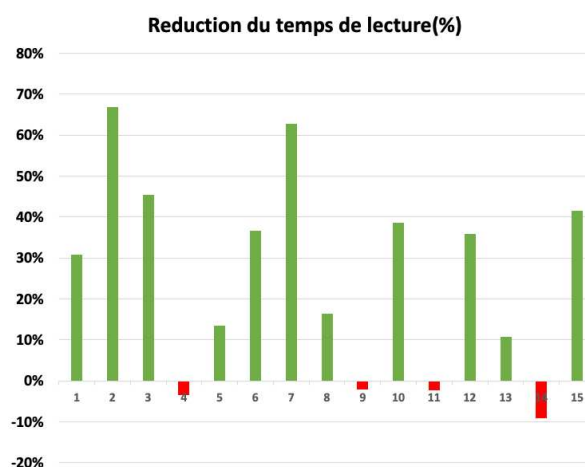


Figure 33. Temps de lecture en ms en pré et post-test (à gauche). La réduction en pourcentage du temps de lecture (à droite).

Discussion

Les résultats révèlent trois éléments, 1) Un lien de corrélation élevé entre la présence d'une dyslexie développementale et une asymétrie de la distribution du tonus musculaire, 2) Un effet immédiat de la correction de l'asymétrie de la distribution de tonus musculaire que ce soit pour la distribution du tonus musculaire (processus sensorimoteur) ou pour le temps de lecture (processus cognitif), 3) La présence de TMF symétriques chez les dyslexiques.

- Hypothèse n°1 : La constatation d'un lien de corrélation entre la présence de taches de Maxwell symétriques chez les enfants dyslexiques et la présence d'une altération de la distribution du tonus musculaire, et inversement chez les enfants normo-lecteurs. Nos résultats semblent conforter partiellement cette hypothèse. En effet, nos résultats infirment la présence de TMO calculées symétriques dans le groupe dyslexique. Mais nos résultats sont en faveur de TMO qualitatives et de TMF symétriques chez les dyslexiques. L'analyse du statut de symétrie des TMO calculées n'a pas montré de différence significative entre les enfants dyslexiques ou normo-lecteurs, ce qui va à l'encontre des observations de Lefloch et Ropars (2017) sur des sujets adultes. À notre connaissance, ces résultats sont nouveaux, ils n'ont jamais été démontré jusqu'alors dans la littérature. C'est un résultat important, car il montre la présence d'un lien de dépendance entre l'état de symétrie des TMF de la distribution du tonus musculaire et la présence ou non d'une dyslexie développementale.
- Deuxième hypothèse :
L'asymétrisation expérimentale des taches de Maxwell des enfants dyslexiques pourrait corriger l'altération de la distribution du tonus musculaire, et inversement chez les enfants normo-lecteurs.
Nos résultats sont en faveur de cette hypothèse, car la manipulation du statut de symétrie des TM modifie immédiatement la distribution du tonus musculaire chez les dyslexiques et chez les normo-lecteurs. Ces résultats montrent un lien de dépendance et suggère un lien de causalité entre le statut de symétrie des taches de Maxwell et la distribution du tonus musculaire. C'est là aussi un résultat nouveau, car il semble que ce soit la première étude qui a testé l'effet de la manipulation des taches de Maxwell sur la distribution du tonus musculaire.
- Hypothèse n° 3 : Il existerait un lien de dépendance entre la correction de la distribution du tonus musculaire par l'utilisation raisonnée de prismes actifs et l'amélioration de la vitesse de lecture des enfants dyslexiques. L'hypothèse nulle h_0 : Il n'y a pas d'amélioration significative

de la vitesse de lecture avant ou après la correction de la distribution du tonus musculaire par l'utilisation de prismes actifs de façon raisonnée. En cas de rejet de l'hypothèse h_0 nous retiendrons l'hypothèse h_1 : Il existe un lien de dépendance entre la correction de la distribution du tonus musculaire par l'utilisation de prismes actifs et l'amélioration de la vitesse de la lecture des dyslexiques. Nous rejetons l'hypothèse h_0 et nous gardons donc l'hypothèse h_1 : Il existe un lien de dépendance entre la correction de la distribution du tonus musculaire par l'utilisation de prismes actifs et l'amélioration de la vitesse de la lecture des dyslexiques. En effet, nos résultats semblent montrer que l'utilisation de prismes actifs pour corriger l'altération du tonus musculaire dans les trois dimensions permet une amélioration significative de la vitesse de la lecture des dyslexiques avec un effet de taille fort (figure 33). L'effet seul de prismes actifs chez les dyslexiques sur la lecture n'a a priori jamais été étudié. L'amélioration immédiate de la lecture semble valider la deuxième condition d'une bascule d'un système dynamique chaotique. En effet, cela s'expliquerait car le cerveau percevrait, par un cycle de 40 Hz, grâce à la synchronisation des prises d'informations multisensorielles (intéroceptives et extéroceptives), temporelles de l'état du corps et de l'environnement (Llinas & Ribary, 1993), c'est-à-dire que l'état initial changerait 40 fois par seconde. Nous avons, dans l'étude Nosodys, validé la première condition d'un changement de phase d'un système dynamique par l'intervention proprioceptive chez les dyslexiques. Ces résultats sont en faveur chez les dyslexiques de la présence d'un système dynamique de complexité non optimale qui présente un lien de dépendance à l'intervention proprioceptive. Ceci semble valider notre hypothèse générale d'un dysfonctionnement cérébral global chez les dyslexiques. Ce résultat est en accord avec la littérature qui montre l'effet de l'intervention proprioceptive pour corriger les capacités de lecture des dyslexiques (Quercia et al., 2007 ; Quercia et al., 2015 ; Sampaio et al., 2009 ; Quercia et Marino, 2012 ; Virlet et al., 2024). Ceci est cohérent avec la contribution de l'état des systèmes dynamiques dans le développement cognitif (Spencer et al., 2012). Mais l'amélioration immédiate de la vitesse de la lecture par une stimulation sensorimotrice semble en faveur, de la théorie de la cognition incarnée (Price et al., 2012 ; Thompson, 2010 ; Versace et al., 2018), car nous observons alors une modification majeure d'une fonction cognitive de haut niveau par une très faible stimulation sensorimotrice.

Nos résultats ne permettent pas de confirmer les travaux de Le Floch et Ropars (2017) sur la présence d'une asymétrie des TMO calculées chez les dyslexiques, mais ils montrent la présence d'une symétrie des TMO qualitative. Mais nos résultats montrent la présence de TMF symétriques chez les dyslexiques vis-à-vis des normo-lecteurs. Ce déficit du contrôle moteur

n'est pas un processus exclusivement lié à la symétrie des taches de Maxwell, car cliniquement, nous constatons fréquemment la présence d'une dysfonction proprioceptive avec des TMF symétriques qui s'asymétrisent par exemple en retirant l'écarteur de palais que porte le sujet, et vice-versa.

Comme nous l'avons vu, la présence de TMF symétriques ou asymétriques se détermine par la présence d'une bascule d'un équilibre à un déséquilibre de la distribution du tonus musculaire donc de la présence ou non d'un déficit sensorimoteur, et vice-versa. Nos résultats montrent que nous avons pu déterminer la TMF chez tous les sujets, qu'ils soient dyslexiques ou normo-lecteurs.

Ces résultats semblent montrer que le premier axe de l'intervention proprioceptive permet une amélioration de la lecture des dyslexiques (figure. 33). Car il montre que la seule modification du tonus musculaire dans les trois dimensions permet une amélioration significative de la vitesse de la lecture chez les dyslexiques. Une étude récente montre que le deuxième axe de l'intervention proprioceptive permettrait aussi une amélioration significative de la lecture des dyslexiques par la seule utilisation des exercices respiratoires de l'intervention proprioceptive pendant trois mois (Quercia et al., 2025). Donc l'action de l'intervention proprioceptive, soit par la correction de l'intégration multisensorielle (ici de la distribution tonique), soit par l'amélioration du sommeil paradoxal, par la réalisation des exercices respiratoires, permettrait l'amélioration de la lecture dans la dyslexie développementale. Ces constats seraient en faveur d'une action de l'intervention proprioceptive sur la première et sur la dernière étape du couple perception-action de l'automatisation. C'est-à-dire sur l'étape d'intégration multisensorielle de la perception et sur l'étape de la consolidation de la mémoire procédurale.

L'amélioration immédiate de la vitesse de la lecture ne permet pas d'évoquer l'amélioration de la mémorisation des processus d'automatisation, mais pourrait être sous-tendue par l'amélioration immédiate de la perception des informations visuelles (graphèmes) nécessaire à la reconnaissance des mots, ce qui sous-entend qu'ils soient déjà mémorisés. Donc cela suggère une amélioration de la prédiction du mot (Gavard & Ziegler, 2024), c'est-à-dire de l'accroche du mot.

Notre étude présente de très nombreuses limites. Une première limite de cette étude, c'est que nous ne connaissons pas les critères diagnostics utilisés pour poser le diagnostic de dyslexie. Le sexe ratio est contrôlé entre les groupes, mais pas l'âge. Pour les tests de lecture nous n'avons pas pu comparer nos résultats aux sujets normolecteurs. De mémoire, le temps de lecture des sujets normolecteurs était inférieur à 15 secondes. Nous n'avons pas apparié les

sujets pour la détermination des états de symétrie des taches de Maxwell, mais cette limite ne s'applique pas pour la vitesse de lecture réalisée en pré et post-test ce qui correspond à un appariement en intra sujet. Nous avons montré que la manipulation des TMF par une lentille floutée se manifestait par la correction ou par l'apparition d'un déficit sensorimoteur, mais nous ne savons pas l'effet de l'utilisation d'une lentille floutée pour atténuer la fovéa. A-t-elle une action sur les taches de Maxwell ou est-ce un autre processus qui implique la fovéa ? Nous n'avons pas montré objectivement dans cette étude si ce déficit sensorimoteur impacte aussi le contrôle moteur, lors de tâches d'équilibre en station debout, et si cela correspondait à un changement de complexité, donc de mode de fonctionnement d'un système dynamique chaotique. En outre, nous n'avons pas pu enregistrer par oculomètre les mouvements des yeux lors de la lecture pendant le port des prismes actifs, ceci, car nous avons utilisé un oculomètre sous forme de lunettes, ce qui n'était pas compatible avec l'utilisation d'un oculus et de verres d'essai. Nous n'avons donc pu recueillir que le temps de lecture. Nous n'avons pas pu non plus réaliser de test de lecture sous lentille floutée. Aurions-nous constaté le même effet ? Une autre limite importante c'est le jeune âge des sujets, et donc se pose la question de leur capacité à repérer puis à dessiner les TMO. Mais cette difficulté à dessiner les TMO peut aussi être secondaire à leur dyslexie qui s'accompagne souvent de difficultés praxiques ou graphiques. Une dernière limite c'est que cette étude ne permet pas de déterminer si l'effet des prismes est dû à la modification du tonus musculaire, ou si les prismes agissent par une atténuation des informations sur les TM comme la lentille floutée.

Pour lever une partie de ces limites et confirmer ces résultats, nous suggérons que soit réalisée une étude équivalente, mais chez de jeunes adultes dyslexiques pour limiter les difficultés à reconnaître leurs TMO et de vérifier leur capacité à reproduire des figures géométriques présentées à travers un dispositif équivalent à un fovéascope. Dans cette étude future, il faudrait aussi choisir une taille d'échantillon plus importante pour permettre de révéler les éventuels effets sur le contrôle moteur de la manipulation des TM, et de prévoir de caractériser la complexité de leur système dynamique.

Conclusion :

Nous avons observé qu'il existerait un lien de dépendance entre la correction du déséquilibre du tonus musculaire par l'utilisation de prismes actifs et la vitesse de lecture des enfants dyslexiques avec un effet de taille élevé. Ce qui est un résultat majeur, car il confirme que la modification de l'état initial a un effet immédiat, ce qui est la deuxième condition nécessaire pour évoquer la bascule d'un système chaotique dans la dyslexie développementale.

Ces résultats semblent confirmer la présence d'un lien de dépendance entre la dyslexie développementale et la présence d'un système dynamique chaotique de complexité non optimale. Ces résultats semblent confirmer à nouveau, avec une puissance a priori élevée, que l'ajout de l'intervention proprioceptive chez les dyslexiques lève la résistance aux interventions qui définit pourtant la dyslexie développementale. Mais ces résultats sont à relativiser car les limitations sont très nombreuses et importantes, donc cette étude ne peut que suggérer des pistes de recherche.

PARTIE 3 : DISCUSSION GÉNÉRALE

Nos résultats répondent à nos objectifs i) En effet l'étude NOSODYD semble valider et confirmer la présence d'un lien causalité entre l'ajout d'une intervention proprioceptive et l'amélioration des compétence en lecture des dyslexiques, ii) Ils montrent l'absence de lien de dépendance, donc de lien de causalité entre l'intervention orthophonique et l'amélioration de la lecture chez les dyslexiques, iii) Ils semblent montrer des altérations du couple perception-action des processus d'automatisation qui présenteraient des liens de dépendance à l'intervention proprioceptive, iv) Ils auraient permis de caractériser la présence un système dynamique chaotique de complexité non optimale qui serait dépendant d'une intervention proprioceptive.

Rappel de nos objectifs :

A : L'objectif principal de ce travail est d'étudier si une intervention proprioceptive améliore la lecture orale et silencieuse des enfants dyslexiques, ainsi que les processus impliqués (sensorimoteur, cognitif et d'automatisation). De montrer donc qu'il existe dans la dyslexie développementale un lien de causalité, (ou de dépendance en fonction des méthodologies) entre l'effet de l'intervention proprioceptive et l'amélioration des compétences en lecture.

B : Les objectifs secondaires sont d'étudier la résistance à l'intervention orthophonique chez les dyslexiques, donc l'absence de lien de dépendance entre la dyslexie développementale et l'intervention orthophonique. Ensuite d'évaluer si la dyslexie développementale est secondaire à l'altération du couple perception-action du processus d'automatisation sensorimoteur, et de caractériser la présence d'un éventuel dysfonctionnement cérébral global.

Notre travail, avec ses trois études prospectives de puissance élevée (0,9) et ses limites, semble confirmer nos hypothèses et nous discutons de ces différents résultats dans plusieurs sous-parties reprenant nos hypothèses ci-dessous.

Hypothèse 1

Pour rappel,

Hypothèse 1 : Chez les dyslexiques, il existerait des liens de causalité entre l'intervention proprioceptive, et l'amélioration de la lecture silencieuse, de la lecture orale, du contrôle

oculomoteur, de l'accès lexical, et de l'automatisation de la lecture. Ces liens de causalité (ou de dépendance) n'existeraient pas pour l'intervention orthophonique seule.

Nos résultats sont en faveur de cette hypothèse. En effet, l'analyse des mouvements oculaires de la lecture lors l'essai contrôlé randomisé de l'étude ProPhoDys valide ce lien de causalité. En effet, les résultats montrent uniquement en cas d'intervention proprioceptive, à 9 mois, qu'il n'y a plus de différence significative entre le groupe PST et le groupe normo-lecteur et qu'une différence significative est apparue entre le groupe PST et le groupe orthophonie seule alors qu'il existe encore une différence significative entre le groupe orthophonie seule et le groupe normo-lecteur. Ces résultats ont été observés pour les processus oculomoteurs de la taille des saccades, pour le processus cognitif de la reconnaissance des mots de l'accès lexical, et pour le processus d'automatisation de la lecture de l'effet de fréquence des mots pour les mots de hautes fréquences. Ces résultats semblent valider la présence d'un lien de causalité de l'effet de l'intervention proprioceptive sur les processus altérés de la lecture silencieuse, et ils semblent montrer une correction de ces processus altérés, car en cas d'ajout de l'intervention proprioceptive, une différence apparaît vis-à-vis du groupe intervention orthophonique seule, et il n'y a plus de différence significative vis-à-vis du groupe contrôle.

L'évaluation de la lecture orale par le test de l'Alouette-R montre, en cas d'intervention proprioceptive à 9 mois, l'apparition d'une différence significative vis-à-vis de l'intervention orthophonique seule, avec un effet de taille fort (étude ProPhoDys). L'écart vis-à-vis de la norme s'est réduit en cas d'ajout d'une intervention proprioceptive, et l'écart vis-à-vis de la norme s'est aggravé pour le groupe orthophonie seule (étude ProPhoDys). L'absence d'amélioration pour le groupe orthophonique confirme la résistance aux interventions, le statut de handicap de la dyslexie, et l'absence de lien de dépendance entre le retard pathologique de la lecture et l'intervention orthophonique. Une stimulation proprioceptive raisonnée des muscles oculaires obliques a permis d'obtenir une réduction immédiate de 43% du temps de lecture (étude MAXWELL-CO-LE). L'amélioration de la lecture orale en cas d'intervention proprioceptive est conforme aux travaux antérieurs (Quercia et al., 2007 ; Quercia et Marino, 2012 ; Quercia et al., 2015 ; Sampaio et al., 2009). L'efficacité de l'intervention proprioceptive pour améliorer la lecture et les décisions grammaticales chez les dyslexiques a été observée dans une étude en double aveugle (Quercia et al., 2007). L'intervention proprioceptive en cas de stabilisation des troubles de la localisation spatiale (HVL) permettrait un gain de l'âge de lecture de plus 6,5 mois, et une aggravation de 2,8 mois en cas de non-stabilisation chez les enfants dyslexiques et cela en 3 mois (Quercia & Marino, 2012). L'utilisation de prismes à

visée proprioceptive améliorerait la lecture des mots, et des non-mots sur 125 enfants avec un diagnostic de dyslexie (Sampaio et al., 2009).

Nous signalons que l'étude ProPhoDys est la première étude qui montrerait l'effet de l'intervention proprioceptive sur la lecture silencieuse par l'analyse des mouvements oculaires. Nos résultats montrent la correction des processus oculomoteurs, des processus cognitifs de l'accès lexical, et des processus de l'automatisation de la lecture permise par l'intervention proprioceptive lors de la lecture silencieuse dans la dyslexie développementale.

Nos résultats semblent valider notre première hypothèse d'un lien de causalité de l'effet de l'intervention proprioceptive sur l'amélioration de la lecture orale et silencieuse par l'intervention proprioceptive. Nos résultats semblent confirmer, à notre échelle, un lien de dépendance entre la présence d'une dysfonction proprioceptive et la dyslexie développementale. Ils permettent d'évoquer un lien de causalité éventuel entre la présence d'une dysfonction proprioceptive et la dyslexie développementale (Pennington, 2006).

La présence d'un lien entre une dysfonction proprioceptive, c'est-à-dire un déficit sensorimoteur et la dyslexie développementale, est en faveur de l'apport des différentes théories sensorimotrices de la dyslexie, dont les rôles respectifs doivent être précisés. Présentent-ils un rôle causal, sont-ils une conséquence ou décrivent-ils un mécanisme sensorimoteur impliqué dans la dyslexie développementale ?

Ce lien entre une dysfonction proprioceptive et la dyslexie, est en faveur d'un lien à définir avec les nombreux déficits sensorimoteurs observés dans la dyslexie développementale, surtout ceux non liés directement au processus de la lecture, tels que le déficit proprioceptif de la détection des mouvements lents (Laprevotte et al., 2021) ou les déficits du contrôle moteur et de l'automatisation (Nicholson & Fawcette, 1990) ou encore les déficits attentionnels (Kershner, 2021) chez les dyslexiques.

L'observation de l'absence de lien de dépendance entre le retard pathologique de la lecture orale et silencieuse et l'intervention orthophonique suggère une remise en question de la théorie phonologique, d'un trouble cognitif unique causal de la dyslexie développementale hors de toute contingence sensorimotrice, qui suppose que les troubles sensorimoteurs observés sont la conséquence d'un manque d'entraînement, et réfute toute action d'une stimulation sensorimotrice (hors entraînement) sur les capacités de lecture des dyslexiques. Dans le cadre du développement moteur, la présence d'une dysfonction proprioceptive peut-être défini comme un processus, et la présence de déficit de la segmentation phonologique comme un produit.

La démonstration qu'une simple stimulation sensorimotrice de type proprioceptive, sur les muscles oculaires obliques, permet une réduction significative du temps de lecture avec un effet de taille important, nous permet d'observer un lien de dépendance entre une simple stimulation sensori-motrice de bas niveau et une fonction cognitive de haut niveau de la lecture. Cela suggère que nous sommes plus dans un processus de cognition incarnée que dans un processus de cognition computationnelle (étude MAXWELL-CO-LE).

Hypothèse 2

Pour rappel,

Hypothèse 2 : Chez les dyslexiques, il existerait des liens de dépendance entre l'intervention proprioceptive et le contrôle moteur indépendant des tâches de lecture. Ces liens de dépendance n'existeraient pas pour l'intervention orthophonique seule.

Nos résultats semblent en faveur de cette hypothèse. En effet, ils montrent (étude NOSODYS) que les enfants dyslexiques présentent des déficits significatifs du contrôle moteur de l'équilibre en station debout, indépendants de la lecture, vis-à-vis du groupe normo-lecteur et du groupe dyslexie développementale avec prise en charge proprioceptive. Ils montrent qu'il n'y a pas de différences significatives entre le groupe normo-lecteur et le groupe de dyslexie développementale avec une prise charge proprioceptive. Ces résultats (étude NOSODYS) sont en faveur de la présence de déficits du contrôle moteur chez les enfants dyslexiques indépendants de la lecture et ils semblent confirmer l'efficacité d'une intervention proprioceptive sur ces déficits du contrôle moteur. Ils semblent donc montrer chez les dyslexiques la présence d'un lien de dépendance des déficits du contrôle moteur indépendant de la lecture à l'intervention proprioceptive. Ces résultats (étude NOSODYS) sont en adéquation avec les études qui montrent la présence de troubles du contrôle moteur chez les dyslexiques, qu'ils soient des enfants (Barela et al., 2011 ; Legrand et al., 2012 ; Nicolson et al., 1999 ; Pozzo et al., 2006 ; Razuk et al., 2018 ; Stein, 2023) ou qu'ils soient des adultes (Patel et al., 2010). Nos résultats montrent aussi que les enfants dyslexiques aux antécédents de prise en charge proprioceptive ne présentent plus de différence significative vis-à-vis des normo-lecteurs, ce qui est cohérent avec les études qui montrent la correction des déficits de doubles tâches (Vieira et al., 2009), ou attentionnels (Quercia et al., 2011), lors de tâches de contrôle moteur en équilibre debout chez les dyslexiques.

Les résultats de l'étude NOSODYS semblent confirmer que les processus d'automatisation sensorimoteurs indépendants de la lecture sont altérés dans la dyslexie développementale, ce qui semble en accord avec des données de la littérature qui montrent que

les déficits du contrôle moteur de l'équilibre chez les enfants dyslexiques seraient dus à une altération des processus d'automatisation (Barela et al., 2011 ; Bucci et al., 2013 ; Bucci, Buic-Boc & Gerard, 2013 ; Vieira et al., 2009), de même lors de tâches graphomotrices (Danna et al., 2024), ou lors des déficits de double tâches altérés dans la dyslexie développementale (Nicolson & Fawcett, 1990 ; Vieira et al., 2009)

La présence de déficits sensorimoteurs indépendants de la lecture chez les dyslexiques et leur correction par l'intervention proprioceptive remet en cause l'hypothèse de la présence de troubles sensorimoteurs secondaires uniquement à un manque de pratique de la lecture chez les dyslexiques (Goswami, 2015 ; Ramus et al., 2003).

Hypothèse 3

Pour rappel,

Hypothèse 3 : Chez les dyslexiques, les différents processus d'automatisation et les différentes étapes testé du couple perception-action de l'automatisation seraient altérées et elles présenteraient un lien de dépendance à une intervention proprioceptive.

Nos résultats semblent en faveur de cette hypothèse. Ils semblent confirmer la présence, dans la dyslexie développementale, d'un déficit des processus d'automatisation de la lecture mis en évidence par l'étude de l'effet de fréquence des mots de haute fréquence (étude n°1) et la présence de déficits des processus sensorimoteurs de l'équilibre en station debout indépendant de la lecture (étude NOSODYs). Nos résultats semblent montrer que ces deux déficits des processus d'automatisation sont corrigés par une intervention proprioceptive d'ordre sensorimoteur, ce qui implique que les processus de l'automatisation de la lecture seraient sensorimoteurs dépendants. Le processus d'automatisation sensorimoteur a été décrit par les neurophysiologistes sous la forme du couple perception-action (Censor, 2012). Dans l'introduction générale, nous avons fait le rapprochement entre les différents déficits décrits dans la dyslexie développementale et les étapes du couple perception-action (figure 4). Nos résultats sont évocateurs de cette approche car ils semblent montrer la présence dans la dyslexie développementale de déficits d'intégration multisensorielle (figure 10, 11) avec la présence de déficits du contrôle tonique, de déficits perceptifs sous la forme de scotomes visuels induits par des sons, et de déficits de la localisation spatiale avec une HVL (étude ProPhoDys). Nous avons pu évaluer l'effet d'une intervention proprioceptive sur les troubles d'intégration multisensorielle, avec une amélioration de 100% pour l'asymétrie tonique (étude MAXWELL-CO-LE), et une amélioration significative pour les déficits d'ordre perceptif et spatial (études ProPhoDys et NOSODYs). Nous avons pu observer qu'il existerait des liens de dépendance

entre ces déficits d'intégration multisensorielle et l'intervention proprioceptive, et qu'il n'existerait pas de lien de dépendance entre ces déficits d'intégration multisensorielle et l'intervention orthophonique. Ces résultats sont conformes aux études qui montraient une amélioration de la dysfonction proprioceptive (Quercia et al., 2007) des déficits d'ordre spatiaux (HVL) par l'intervention proprioceptive (Quercia et al., 2015).

Nos résultats semblent conforter notre hypothèse de la présence d'altération du couple perception-action dans la dyslexie développementale (Figure 4) et (Figure 34) au niveau de l'étape d'intégration multisensorielle par la mise en évidence i) De troubles d'intégration multisensorielle d'ordre tonique, spatial et perceptif, ii) De l'étape de la prédiction motrice par la présence de saccades déficitaires qui dépend de la qualité de la prédiction motrice, iii) De l'étape du contrôle moteur par la présence de troubles du contrôle moteur oculomoteur (étude ProPhoDys) et de tâches d'équilibre (étude NOSODYs), iv) De l'étape de l'adaptation des modèles internes déduite de l'amélioration observée de l'automatisation de la lecture silencieuse des mots de haute fréquence. Comme nous avons pu le voir précédemment, toutes ses fonctions déficitaires des étapes du couple perception-action semblent présenter un lien de dépendance à une intervention proprioceptive. Dans la figure 34, nous ajoutons les effets de l'intervention proprioceptive sur les différentes étapes du couple perception-action que nous avons pu observer dans ce travail.

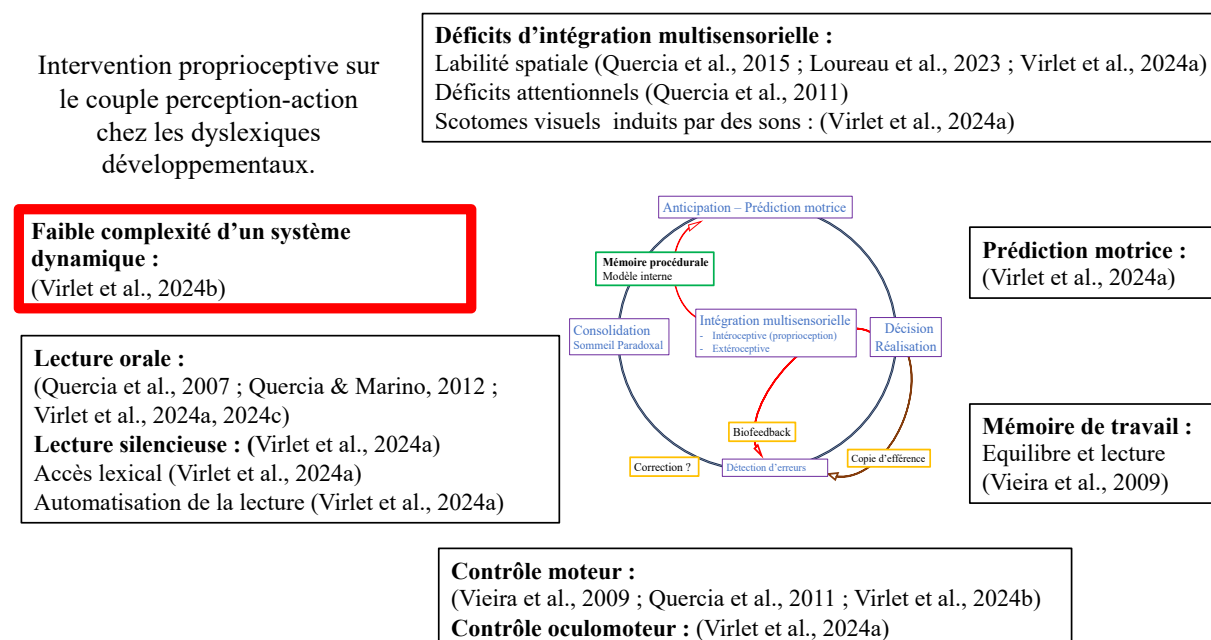


Figure 34. Effets de l'intervention proprioceptive sur les différentes étapes du couple perception-action et automatisation.

Les très rares essais cliniques randomisés contrôlés significatifs de l'amélioration de la lecture et de la compréhension des textes chez les dyslexiques ont mis en évidence des liens de causalité avec des interventions oculomotrices (Köse et al., 2024 ; Köse, B., & Temizkan), ou avec des interventions combinées de la mémoire de travail associée au maintien de l'équilibre (Ramezani et al., 2021). Il est intéressant de noter que ces interventions sont d'ordre sensorimotrices et qu'elles s'inscrivent aussi dans le couple perception-action.

Hypothèse 4

Pour rappel,

Hypothèse 4 : Les dyslexiques présenteraient un dysfonctionnement cérébral global qui serait caractérisé par un système dynamique chaotique avec une complexité non optimale qui présenterait un lien de dépendance à l'intervention proprioceptive.

Dans l'introduction de ce travail nous avons pu constater, indépendamment d'un trouble de la lecture et de son automatisation, la présence dans la dyslexie développementale, de nombreux déficits représentés par les grandes théories et approches de la dyslexie, que ce soit : des déficits de la conscience phonologique, des déficits temporels (auditif et visuel), des déficits magnocellulaires (auditif, et visuel), des déficits du contrôle moteur, des déficits attentionnels, des déficits de la mémoire de travail (double tâches), des déficits de la mémoire procédurale (implicite), des altérations du sommeil avec la présence de micro-réveils et un déficit de la complexité du système dynamique. L'ensemble suggère un dysfonctionnement cérébral global. Le constat de la disproportion majeure entre la faiblesse des stimuli sensorimoteurs de l'intervention proprioceptive et la multiplicité et l'importance des effets constatés suggère que nous ne sommes en présence de systèmes dynamiques chaotiques. Les systèmes dynamiques chaotiques ont la particularité de pouvoir modifier leur état de fonctionnement décrit par l'effet papillon (Li & Yorke, 1975). La présence d'un système dynamique chaotique déterministe est conforté par deux éléments : l'effet immédiat d'une minuscule modification de l'état initial, et la récurrence d'une phase différente. Nous avons pu expérimentalement montrer que l'intervention proprioceptive semblerait provoquer une amélioration de la complexité du système (étude NOSODYD) et qu'elle permettrait, en modifiant l'état initial, d'avoir un effet immédiat sur la vitesse de lecture des enfants dyslexiques (étude MAXWELL-CO-LE), avec la présence de lien de dépendance des systèmes dynamiques chaotiques à l'intervention proprioceptive et l'absence de liens de dépendance des systèmes dynamiques chaotiques à l'intervention orthophonique. Ces résultats sont a priori une nouveauté, car ils proposent une piste documentée sur les processus impliqués dans la dyslexie développementale et sur le

mécanisme de l'intervention proprioceptive, dont l'action permettrait une optimisation de la complexité des systèmes dynamiques chaotiques. La présence d'une complexité optimale d'un système dynamique chaotique est un marqueur de l'efficacité d'une intervention pour Da Costa (2013) et des capacités d'apprentissages d'un système.

Modèle dynamique chaotique de la dyslexie développementale

L'ensemble de ces résultats induit leur prise en compte dans le modèle théorique de la dyslexie développementale. Aucun modèle actuel ne permet de prendre en compte nos observations. Nous proposons donc un nouveau modèle de la dyslexie développementale. Son postulat principal est la présence d'un système dynamique chaotique de complexité non optimale (Figure 35). C'est-à-dire avec la présence d'une faible complexité et adaptabilité, donc d'une faible capacité d'automatisation, par l'altération de toutes les étapes du couple perception-action qui implique les mécanismes d'automatisation. L'altération du couple perception-action entraînerait un certain nombre de déficits, plus ou moins aggravés par des facteurs intriqués et réentrants tels que l'attention ou les troubles du sommeil. Un système dynamique chaotique est caractérisé par sa capacité de changer son niveau de complexité de façon immédiate lors d'une modification de son état initial, ce que permettrait l'intervention proprioceptive. L'apparition de tel ou tel type de trouble des apprentissages dépend de facteurs inconnus à ce jour, à moins que la situation des ectopies ne soit déclencheur ou révélateur des processus les plus impliqués. Les déficits des habiletés phonologiques ne seraient que l'expression du produit d'une altération du processus, donc plus d'ordre symptomatique. Ce modèle qui intègre l'explication de l'action d'une intervention proprioceptive, par sa capacité à permettre une bascule inversée d'un système dynamique chaotique de complexité non optimale vers une complexité optimale, peut être dépendant de la récupération d'un sommeil paradoxal de qualité pour consolider au long terme la mémoire procédurale.

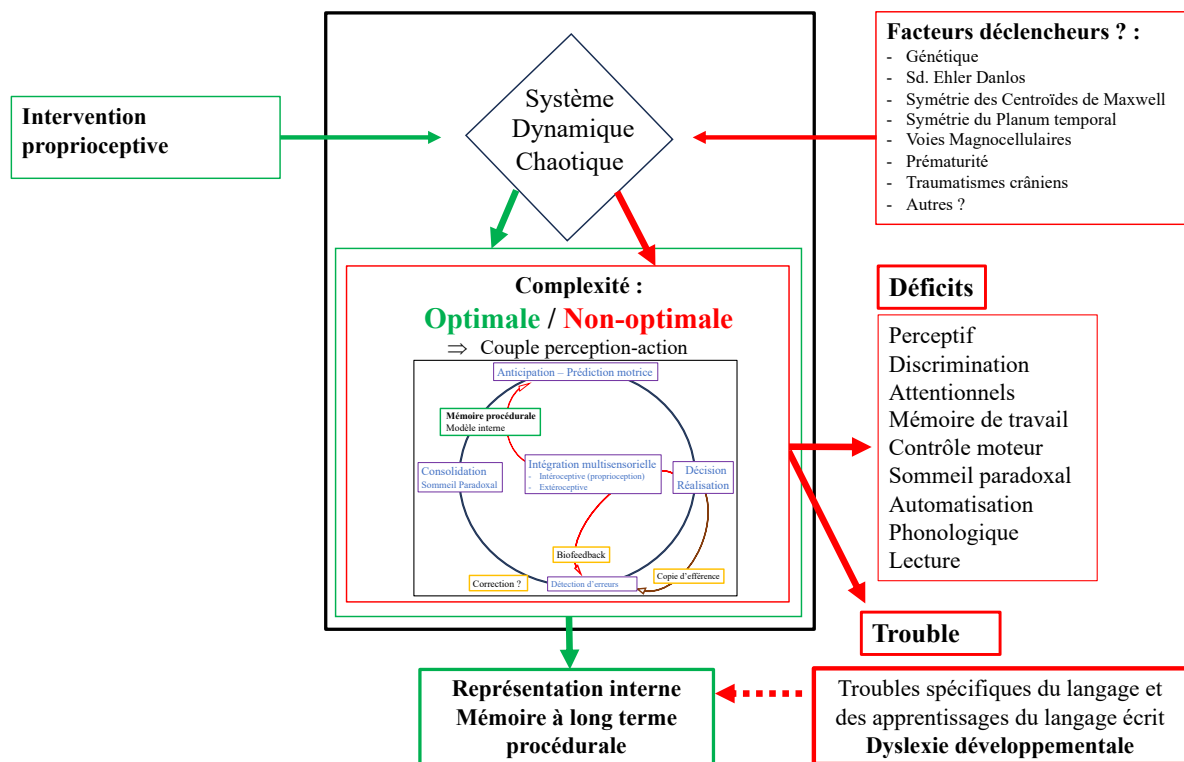


Figure 35. Modèle dynamique chaotique de la dyslexie développementale.

Ce modèle inclut de fait les différentes théories sensorimotrices. La présence de déficits sensorimoteurs, donc les composants perceptifs nécessaires au processus de la conscience phonologique, confirment l'observation d'une insuffisance des données perceptives nécessaires au fonctionnement des centres des habiletés phonologiques démontrée par Boest et al., (2013). Les déficits des habiletés phonologiques semblent secondaires, non causaux et n'être que symptomatiques, c'est-à-dire être un produit et non pas un processus (Clark & Whittall, 1989). Hitch, Allen et Baddeley (2024) précisent bien que le maintien de la boucle phonologique nécessite une répétition subvocale perceptivo motrice, ce qui confirme que les compétences phonologiques ne sont pas au-dessus de toute contingence sensorimotrice, mais qu'elles en dépendent.

Comment expliquer la présence d'un système dynamique chaotique de complexité non optimale chez les dyslexiques développementaux ? L'aspect multifactoriel semble probable, mais le principe est peut-être plus univoque. Nous savons que le mode de fonctionnement des systèmes dynamiques dépend de leur état initial, ce qui renforce l'idée de l'aspect multifactoriel. Qu'est-ce qui peut modifier l'état initial du système ? Dans mon expérience clinique j'ai constaté que la perte d'une dent peut déstabiliser l'intervention proprioceptive, et inversement que la pousse des dents adultes chez les jeunes enfants peut stabiliser le système

avant la mise en place d'une intervention proprioceptive, de même pour les poussées de croissance lors de l'adolescence. Mais cela doit être conforté par l'expérimentation, ce qui semble extrêmement difficile à mettre en place. Il existerait des facteurs déclencheurs connus de la présence d'un système dynamique chaotique de complexité non optimale, par exemple dans la maladie d'Ehler Danlos (Dupuy et al., 2017 ; Dupuy, 2019). Un autre facteur déclencheur serait la présence de taches de Maxwell symétriques (Le Floch & Ropars, 2017). Nos résultats semblent montrer un lien (r de Pearson = -1) entre l'état de statut de symétrie des taches de Maxwell fonctionnelles et la distribution du tonus musculaire qui serait un reflet clinique de l'état d'un système dynamique chaotique de complexité non optimale. Cette déduction semble être confortée par l'observation d'une réduction significative et immédiate du temps de lecture de 43%, avec un fort effet de taille, lors de la correction du déséquilibre de distribution du tonus musculaire par l'usage raisonné de prismes actifs chez les enfants avec une dyslexie développementale. Cette observation est cohérente avec l'importance d'une asymétrie du fonctionnement cérébral.

Les mécanismes d'automatisation semblent le point d'achoppement des troubles spécifiques des apprentissages. Ils découlent de notre capacité à interagir avec notre environnement qui nécessite des capacités d'anticipation qui furent nécessaires à notre survie en tant qu'espèce, d'autant que notre survie n'a tenu qu'à un fil (Hu et al., 2023), avec un goulot d'étranglement de 1280 adultes sur une période de 100 000 ans, au Pleistocene, il y a 900 000 ans.

Les mécanismes physiologiques de fonctionnement de la perception, le couple perception-action, ont permis la survie et le développement lors de la très longue évolution de plus de 450 millions d'années aboutissant à notre espèce. Il paraît difficile de les exclure dans la compréhension d'un processus « vieux » de 5 000 ans qu'est la lecture, et donc de les exclure des mécanismes impliqués dans la dyslexie, d'autant que c'est seulement depuis les années 1970 que le pourcentage de lecteurs dans la population française atteint 90% et que l'équivalence entre les sexes s'équilibre (Furet & Ouzouf, 1977). Car finalement le langage écrit n'est que l'association du langage oral et de la capacité à reconnaître et reproduire des formes, tous deux des processus sensorimoteurs. Le langage oral serait une exaptation évolutive du langage gestuel (Meguerditchian et al., 2013). Tous deux sont des processus sensorimoteurs avec leur composante perceptive (visuel, auditive) et motrice (articulatoire) (Meister et al., 2007). La création et la reconnaissance de graphèmes sont aussi des processus sensori-moteurs. Le langage oral puis la lecture ne seraient finalement que des exaptations évolutionnelles (Nazir et al., 2008 ; Meguerditchian et al., 2013)

Notre travail répond à la demande du rapport de l'INSERM (Gueguen et al., 2016) qui interrogeait l'intérêt de l'intervention proprioceptive dans la dyslexie développementale. Car après l'étude en double aveugle réalisée par Quercia (et al., 2007), notre travail semble apporter, par l'étude Nosodys d'un essai randomisé contrôlé de puissance élevée, un deuxième élément de validation expérimentale, de la présence d'un lien de causalité de l'effet de l'intervention proprioceptive sur l'amélioration de la lecture dans la dyslexie développementale. Notre travail suggère de recentrer la recherche dans la dyslexie développementale sur les mécanismes d'automatisation sensorimoteurs qui semblent impliqués dans l'automatisation de la lecture, et sur les processus pouvant soit les altérer, soit les améliorer. Ce travail soulève beaucoup de questions sans réponses même si le modèle dynamique chaotique ouvre une approche plausible à confronter expérimentalement. Les mécanismes sous-jacents ne sont pas explorés. Par exemple, comment agit la rééducation diaphragmatique ? Agit-elle en améliorant les processus réflexes sous muqueux d'ouverture du pharynx sur les muscles dilateurs du pharynx, ou agit-elle sur le nerf vague, ou encore est-ce une action conjointe, ou d'autres facteurs sont-ils impliqués ?

Limitations de ce travail de thèse

Ce travail de thèse présente différentes limites comme nous l'avons évoqué dans les discussions des trois études. Il nécessite des études complémentaires pour :

- La réplication de l'étude en double aveugle et de l'essai randomisé contrôlé pour confirmer l'existence du lien de causalité entre l'intervention proprioceptive et l'amélioration des compétences en lecture chez les dyslexiques.
- Évaluer l'effet de l'intervention proprioceptive dans la dyslexie développementale avec des échantillons appariés, de taille plus importante et avec des cas multiples.
- Évaluer par IRM les indices structurels et fonctionnels (Nemmi et al., 2023), pour déterminer l'impact de l'intervention proprioceptive sur le dysfonctionnement cérébral dans la dyslexie développementale.
- Évaluer l'effet d'une intervention proprioceptive sur les TDC (anciennement nommés : dyspraxie).
- Évaluer l'impact des micro-réveils sur le sommeil paradoxal et sur la mémoire procédurale (implicite).

- Évaluer les facteurs déstabilisant des systèmes dynamiques chaotiques, dont le statut de symétrie des taches de Maxwell calculées et fonctionnelle.
- Évaluer l'effet de la symétrisation des taches de Maxwell sur l'état de fonctionnement des systèmes dynamiques chaotiques et leurs conséquences sur les capacités d'automatisation de normo-lecteurs sans dysfonction proprioceptive.
- Confirmer que l'intervention proprioceptive améliore les capacités des habiletés phonologiques.

Le lien avec le langage oral et la lecture me semble une approche à étudier pour comprendre la mise en place des automatismes de la lecture, car la lecture est une exaptation du langage oral. D'ailleurs, Plaza (2004) évoque l'intérêt d'étudier les liens des défaillances intermodales (déficits d'intégration multisensorielle) entre les modalités visuelles, auditives, et proprioceptives, qui viennent « *perturber la capacité de l'enfant de lier en une seule « enveloppe » le mot entendu, le mot articulé par l'autre et le mot produit par lui-même, permettant à ce mot de faire écho en lui* ». Cela décrit la fonction des motoneurones miroirs qui comportent dans les mêmes cellules les composantes perceptives et motrices nécessaires à la reconnaissance des gestes dans le langage gestuel, puis des sons dans le langage oral et à leur association à un sens ou à une émotion. La zone de Broca est classiquement associée à la production de la parole, mais, la zone de Broca a également été impliquée dans la perception de la parole et dans le traitement de l'information non linguistique (Kotz et al., 2010). L'aire de Broca joue un rôle important dans la perception de la parole, fortement liée à la lexicalité d'un stimulus (Kotz et al., 2010). De plus, la zone de Broca est considérée comme une zone centrale dans un réseau constituant le système de miroirs humains, qui cartographie les actions observées ou entendues sur des programmes moteurs pour exécuter des actions analogues (Rizzolatti et Craighero, 2004). L'implication des neurones miroirs dans l'expérience incarnée fonde les structures cérébrales qui sous-tendent le langage (Arbib, 2010).

De façon générale, ce travail sur une pathologie de l'automatisation de la lecture peut apporter un éclairage sur la compréhension des processus du couple Perception-Action et de l'automatisation impliquer dans le fonctionnement cérébral mais cet éclairage est très global sans approches précises des différents mécanismes ou modèle impliqué. De même ce travail, peut apporter aussi un éclairage sur l'implication des multiple systèmes et sous-système dynamique dans la compréhension du fonctionnement cérébral.

La prise en charge proprioceptive est l'amorce d'une prise en charge plus globale, pour rétablir un couple perception-action des fonctions perceptives (d'intégrations multisensorielles)

et d'automatisation efficaces, ce qui semble être la condition sine qua non à une rééducation orthophonique de restauration et non plus de remédiations. Deux axes sont à développer pour l'avenir i) la recherche sur l'intervention proprioceptive pour la confirmer ou non, et pour améliorer les techniques de correction des conséquences des troubles d'intégration multisensorielle et sur l'amélioration des phases de sommeil paradoxal pour optimiser le renforcement de la mémoire procédurale (implicite) à long terme, ii) la recherche sur les processus connexes, comme d'évaluer le rôle de la rééducation orthophonique des troubles de l'oralité, de la déglutition et de la respiration (Thibault, 2017 ; Thibault & Maisonneuve, 2024) sur la mémoire procédurale ; ou de confirmer le rôle de la rééducation des praxies visuelles sur l'amélioration de la lecture et de sa compréhension chez les dyslexiques (Köse et al., 2024 ; Köse, B., & Temizkan) ; ou de confirmer le rôle de la rééducation de la mémoire de travail verbale associée à des tâches d'équilibre (Ramezani et al., 2021). De façon pragmatique, ce dernier axe de l'amélioration du sommeil dans la dyslexie développementale peut être assez simple à mettre en place. En effet, les praticiens et intervenants concernés par l'importance du sommeil paradoxal dans les processus de consolidation des apprentissages pouvant agir maillent le territoire. Et enfin, une extension de ces travaux vers les autres troubles spécifiques du langage et des apprentissages, tels que les troubles du langage oral serait souhaitable. Un travail illustre d'ailleurs que la stimulation courte et standardisée des aspects sensorimoteurs chez les enfants nés grands prématurés permet, entre autres, d'augmenter leur lexique expressif (Charollais et al., 2024). De nombreuses pistes sont donc encore à explorer.

Synthèse

Le résultat principal de ce travail de thèse c'est que nous avons pu expérimentalement confirmer le travail en double aveugle (Quercia et al., 2007) en validant la présence d'un lien de causalité entre l'effet de l'intervention proprioceptive et l'amélioration de la lecture orale et de la lecture silencieuse dans ses différents composants (oculomoteur, accès lexical et d'automatisation de la lecture). Donc il semblerait qu'il existe un lien de causalité qui doit être conforté par des recherches supplémentaires.

Nous avons observé chez les dyslexiques la présence de déficits du contrôle moteur indépendants de la lecture, ce qui semble cohérent avec la présence chez les dyslexiques de déficit de la proprioception de la détection des mouvements lents (Laprevotte et al., 2021).

Nous avons aussi observé la résistance des troubles de la lecture aux interventions orthophoniques (variable indépendante), donc l'absence de lien de dépendance entre les troubles de la lecture et la présence de déficits phonologiques. Ce qui est cohérent avec

l'absence de transfert de l'effet de l'intervention orthophonique aux capacités de lecture de textes des dyslexiques (Pennington, 2006 ; Torgesen JK et al., 1992) et ce qui est aussi cohérent avec la définition de la dyslexie développementale (APA, 2013). Cela semble infirmer l'hypothèse d'un déficit cognitif unique de la théorie phonologique d'un lien de causalité entre les déficits des habiletés phonologiques et la dyslexie développementale (Castles & Coltheart, 2004 ; Pennington, 2006). Ce qui renforce l'hypothèse de Pennington (2006) d'un déficit multiple.

Dans les trois études, de puissance élevée ($=0,9$), réalisées et malgré leurs limites, nous avons observé de nombreux déficits chez les dyslexiques qu'ils soient en lien avec des tâches de lecture (des processus oculomoteurs, des processus cognitifs de l'accès lexical, et des processus d'automatisation de la lecture), ou qu'ils soient non liés à des tâches de lecture (intégration multisensorielle, processus de contrôle moteur, complexité non optimale de leur système dynamique), ce qui rejoint les données de la littérature. La présence de ces nombreux types de déficits à différents niveaux de fonctionnement cérébral et la présence d'une complexité non optimale de leur système dynamique (Deffeyes et al., 2009) suggèrent la présence d'un dysfonctionnement cérébral global.

L'observation pour les processus d'automatisation (du contrôle moteur, de la lecture) de liens de dépendance à l'intervention proprioceptive est en faveur de l'hypothèse de Nicolson & Fawcett (1990) de déficits de l'automatisation sensorimotrice dans la dyslexie développementale. D'autant que les différents déficits observés et ceux décrits dans la littérature semblent présenter des liens de dépendance à l'intervention proprioceptive, et qu'ils s'intègrent aux différentes étapes du couple perception-action impliqué dans les processus d'automatisation sensorimotrice.

Pour tenir compte de ces différents éléments et tenir compte de la discordance entre la petitesse des leurres sensorimoteurs utilisés et la puissance et la diversité des effets observés, nous proposons un nouveau modèle : le modèle dynamique chaotique de la dyslexie développementale.

Les systèmes dynamiques chaotiques sont caractérisés par leur possibilité de changer de phase lors d'une modification minime de leur état initial, ce qui leur offre la capacité de s'adapter aux contraintes environnementales.

Les perspectives sont multiples. En premier, tester ce modèle expérimentalement, en gardant à l'esprit que les leurres sensorimoteurs sont utilisés de façon raisonnée pour corriger les troubles d'intégration multisensorielle et que les exercices respiratoires sont utilisés pour réduire les effets du syndrome de haute résistance des voies respiratoires supérieures.

Ce modèle peut-il s'étendre aux autres troubles spécifiques des apprentissages ? Quels seraient les bénéfices d'adjoindre la prise en charge des syndromes de haute résistance des voies aériennes aux interventions plus classiques telles que les rééducations phonologiques ou sensorimotrices ?

Conclusion

Malgré leurs limites, l'ensemble des résultats de nos trois études sont cohérents entre eux et avec la littérature sur l'intervention proprioceptive. Ils valident et confirment la présence d'un lien de causalité de l'effet de l'intervention proprioceptive sur l'amélioration des compétences de lecture des dyslexiques (Quercia et al., 2007), mais sans pouvoir affirmer un lien causal d'une dysfonction proprioceptive sur la présence de la dyslexie développementale. Ils montrent l'absence de lien de dépendance donc de causalité entre l'intervention orthophonique et la lecture des enfants dyslexiques, ce qui semble infirmer l'hypothèse d'un déficit cognitif unique des habiletés phonologiques de la dyslexie développementale, déjà interrogée par différents auteurs (Castles & Coltheart, 2004 ; Pennington, 2006). Nos trois études ont permis d'observer la présence de déficits multiples, dont les déficits des processus d'automatisation sensorimotrice du couple perception-action évocateurs d'un dysfonctionnement cérébral global que nous avons modélisé. Mais même si ces résultats semblent prometteurs en confirmant des pistes d'intervention et de compréhension dans la dyslexie développementale, ils doivent être répliqués et confrontés expérimentalement car toute avancée réelle, sur la prise en charge de la dyslexie développementale nous permettrait de réduire les impacts psychologiques et sociétaux majeurs de ce handicap (Daniel et al., 2006, Wilmot et al., 2023). Finalement, ce travail de thèse vient à nouveau étayer expérimentalement les observations cliniques d'un effet de l'ajout de l'intervention proprioceptive sur l'automatisation de la lecture des dyslexiques qui semble permettre de passer d'une remédiation à une restauration orthophonique, c'est-à-dire de lever la résistance aux interventions ce qui pourtant définit la dyslexie développementale. Les différents déficits observés dans la dyslexie développementale, que ce soient des habiletés phonologiques ou que ce soit de la lecture de texte, pourraient être des produits d'un comportement moteur altéré (Clark & Whitall, 1989), c'est-à-dire des symptômes de l'altération du processus d'automatisation du couple perception-action.

BIBLIOGRAPHIE

- Aghababian, V., & Nazir, T. A. (2000). Developing Normal Reading Skills : Aspects of the Visual Processes Underlying Word Recognition. *Journal of Experimental Child Psychology*, 76(2), 123-150. <https://doi.org/10.1006/jecp.1999.2540>
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorder Fifth* (DSM-5-TR 5e edition).
- Anokhin, P. K., & Corson, S. A. (1974). *Biology and Neurophysiology of the Conditioned Reflex and Its Role in Adaptive Behavior : International Series of Monographs in Cerebrovisceral and Behavioral Physiology and Conditioned Reflexes, Volume 3* (Pergamon). Elsevier Science.
- Arbib, M. A. (2010). Mirror system activity for action and language is embedded in the integration of dorsal and ventral pathways. *Brain and Language*, 112(1), 12-24. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2009.10.001>
- Arnold, W. C., & Guilleminault, C. (2019). Upper airway resistance syndrome 2018 : Non-hypoxic sleep-disordered breathing. *Expert Review of Respiratory Medicine*, 13(4), 317-326. <https://doi.org/10.1080/17476348.2019.1575731>
- Assaiante, C. (2022). Les représentations sensori-motrices : Les premières représentations pour agir et apprendre. In *La fonction proprioceptive* (p. 97-118). Érès. <https://doi.org/10.3917/eres.bulli.2022.01.0097>
- Assaiante, C., Barlaam, F., Cignetti, F., & Vaugoyeau, M. (2014). Body schema building during childhood and adolescence : A neurosensory approach. *Neurophysiologie Clinique/Clinical Neurophysiology*, 44(1), 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2013.10.125>
- Ayres, A. J. (1963). The development of perceptual-motor abilities : a theoretical basis for treatment of dysfunction. *The American Journal of Occupational Therapy: Official Publication of the American Occupational Therapy Association*, 17, 221-225.

- Ayres, A. J. (1972). Types of sensory integrative dysfunction among disabled learners. *The American Journal of Occupational Therapy: Official Publication of the American Occupational Therapy Association*, 26(1), 13-18.
- Baddeley, A. (2000). The episodic buffer : A new component of working memory? *Trends in Cognitive Sciences*, 4(11), 417-423. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(00\)01538-2](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(00)01538-2)
- Baddeley, A. (2012). Working Memory : Theories, Models, and Controversies. *Annual Review of Psychology*, 63(Volume 63, 2012), 1-29. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120710-100422>
- Baddeley, A. D., Allen, R. J., & Hitch, G. J. (2011). Binding in visual working memory : The role of the episodic buffer. *Neuropsychologia*, 49(6), 1393-1400. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.12.042>
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working Memory. In *Psychology of Learning and Motivation* (Vol. 8, p. 47-89). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0079-7421\(08\)60452-1](https://doi.org/10.1016/S0079-7421(08)60452-1)
- Baddeley, A. D., Hitch, G. J., & Allen, R. J. (2019). From short-term store to multicomponent working memory : The role of the modal model. *Memory & Cognition*, 47(4), 575-588. <https://doi.org/10.3758/s13421-018-0878-5>
- Bahammam, A. S., Tate, R., Manfreda, J., & Kryger, M. H. (1999). Upper Airway Resistance Syndrome : Effect of Nasal Dilation, Sleep Stage, and Sleep Position. *Sleep*, 22(5), 592-598. <https://doi.org/10.1093/sleep/22.5.592>
- Ballan, R., Durrant, S. J., Stickgold, R., Morgan, A., Manoach, D. S., & Gabay, Y. (2022). A failure of sleep-dependent consolidation of visuoperceptual procedural learning in young adults with ADHD. *Translational Psychiatry*, 12(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41398-022-02239-8>
- Barela, J. A., Dias, J. L., Godoi, D., Viana, A. R., & de Freitas, P. B. (2011). Postural control and automaticity in dyslexic children : The relationship between visual information and body

sway. *Research in Developmental Disabilities*, 32(5), 1814-1821.

<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.03.011>

Barela, J. A., Freitas, P. B. D., Viana, A. R., & Razuk, M. (2014). Dyslexia and the Integration of Sensory Cues into Motor Action. *Psychology*, 05(16), 1870-1878.

<https://doi.org/10.4236/psych.2014.516192>

Bégel, V., Dalla Bella, S., Devignes, Q., Vandenbergue, M., Lemaître, M.-P., & Dellacherie, D. (2022). Rhythm as an independent determinant of developmental dyslexia. *Developmental Psychology*, 58(2), 339-358. <https://doi.org/10.1037/dev0001293>

Behan, W. M. H. (2001). JAMES HINSHELWOOD (1859–1919) AND DEVELOPMENTAL DYSLEXIA. In F. C. Rose, *Twentieth Century Neurology* (p. 59-76). PUBLISHED BY IMPERIAL COLLEGE PRESS AND DISTRIBUTED BY WORLD SCIENTIFIC PUBLISHING CO. https://doi.org/10.1142/9781848161665_0005

Bergenheim, M., Ribot-Ciscar, E., & Roll, J.-P. (2000). Proprioceptive population coding of two-dimensional limb movements in humans : I. Muscle spindle feedback during spatially oriented movements. *Experimental Brain Research*, 134(3), 301-310.

<https://doi.org/10.1007/s002210000471>

Berkhan, oswald. (1917). Über die Wortblindheit, ein Stammeln im Sprechen und Schreiben, ein Fehl im Lesen. *Neurologisches Centralblatt.*, 36, 914-927.

<https://books.google.com/books?id=DmEsAQAAIAAJ&q=Wortblindheit>

Berlin, R. (1887). *Eine besondere Art der Wortblindheit (Dyslexie)* (Bergmann).

<http://resolver.sub.uni-goettingen.de/purl?PPN513409602>

Bernstein, N. A. (1967). *The Co-ordination and Regulation of Movements* (Pergamon Press).

Berthoz Alain. (1997). *Le sens du mouvement*. Odile Jacob.

- 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>
- Bieder, A., Yoshihara, M., Katayama, S., Krjutškov, K., Falk, A., Kere, J., & Tapia-Páez, I. (2020). Dyslexia Candidate Gene and Ciliary Gene Expression Dynamics During Human Neuronal Differentiation. *Molecular Neurobiology*, 57(7), 2944-2958.
<https://doi.org/10.1007/s12035-020-01905-6>
- Biotteau, M., Péran, P., Vayssière, N., Tallet, J., Albaret, J.-M., & Chaix, Y. (2017). Neural changes associated to procedural learning and automatization process in Developmental Coordination Disorder and/or Developmental Dyslexia. *European Journal of Paediatric Neurology*, 21(2), 286-299. <https://doi.org/10.1016/j.ejpn.2016.07.025>
- Bishop, D. V. M., & Adams, C. (1990). A Prospective Study of the Relationship between Specific Language Impairment, Phonological Disorders and Reading Retardation. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 31(7), 1027-1050. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1990.tb00844.x>
- Blanchet, M., & Assaiante, C. (2022). Specific Learning Disorder in Children and Adolescents, a Scoping Review on Motor Impairments and Their Potential Impacts. *Children (Basel, Switzerland)*, 9(6), 892. <https://doi.org/10.3390/children9060892>
- Boets, B., Op de Beeck, H. P., Vandermosten, M., Scott, S. K., Gillebert, C. R., Mantini, D., Bulthé, J., Sunaert, S., Wouters, J., & Ghesquière, P. (2013). Intact But Less Accessible Phonetic Representations in Adults with Dyslexia. *Science*, 342(6163), 1251-1254.
<https://doi.org/10.1126/science.1244333>
- Bonifacci, P., Tobia, V., Sansavini, A., & Guarini, A. (2023). Eye-Movements in a Text Reading Task : A Comparison of Preterm Children, Children with Dyslexia and Typical Readers. *Brain Sciences*, 13(3), Article 3. <https://doi.org/10.3390/brainsci13030425>

- Bonini, L., Rotunno, C., Arcuri, E., & Gallese, V. (2022). Mirror neurons 30 years later : Implications and applications. *Trends in Cognitive Sciences*, 26(9), 767-781.
<https://doi.org/10.1016/j.tics.2022.06.003>
- Borasio, F., De Cosmi, V., D'Oria, V., Scaglioni, S., Syren, M.-L. E., Turolo, S., Agostoni, C., Coniglio, M., Molteni, M., Antonietti, A., & Lorusso, M. L. (2023). Associations between Dietary Intake, Blood Levels of Omega-3 and Omega-6 Fatty Acids and Reading Abilities in Children. *Biomolecules*, 13(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/biom13020368>
- Bosse, M.-L., Tainturier, M. J., & Valdois, S. (2007). Developmental dyslexia : The visual attention span deficit hypothesis. *Cognition*, 104(2), 198-230.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.05.009>
- Brockmann, P. E., Urschitz, M. S., Schlaud, M., & Poets, C. F. (2012). Primary snoring in school children : Prevalence and neurocognitive impairments. *Sleep and Breathing*, 16(1), 23-29.
<https://doi.org/10.1007/s11325-011-0480-6>
- Browman, C. P., & Goldstein, L. M. (1986). Towards an articulatory phonology. *Phonology Yearbook*, 3, 219-252. <https://doi.org/10.1017/S0952675700000658>
- Bucci, M. P., Bui-Quoc, E., & Gerard, C.-L. (2013). The effect of a Stroop-like task on postural control in dyslexic children. *PloS One*, 8(10), e77920.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0077920>
- Cappe, C., Rouiller, E. M., & Barone, P. (2012). Cortical and Thalamic Pathways for Multisensory and Sensorimotor Interplay. In M. M. Murray & M. T. Wallace (Éds.), *The Neural Bases of Multisensory Processes*. CRC Press/Taylor & Francis.
<http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK92866/>
- Castles, A., & Coltheart, M. (2004). Is there a causal link from phonological awareness to success in learning to read? *Cognition*, 91(1), 77-111. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(03\)00164-](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(03)00164-1)

- Censor, N., Sagi, D., & Cohen, L. G. (2012). Common mechanisms of human perceptual and motor learning. *Nature Reviews Neuroscience*, 13(9), 658-664.
<https://doi.org/10.1038/nrn3315>
- Chalmpé, M., & Vlachos, F. (2025). Are there distinct subtypes of developmental dyslexia? *Frontiers in Behavioral Neuroscience*, 18, 1512892.
<https://doi.org/10.3389/fnbeh.2024.1512892>
- Charollais, A., Laudénbach, V., Stumpf, M.-H., Delaporte, B., Datin-Dorrière, V., Debillon, T., De Barace, C., Flechelles, O., & Farmer, M. (2024). Impact of an early educational protocol on the oral language of children born preterm exhibiting phonological fragility : A multicenter randomized clinical trial. *Frontiers in Psychology*, 15, 1393246.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2024.1393246>
- Chauhan, I.-S. J., Cole, J. D., Berthoz, A., & Sarlegna, F. R. (2022). Dissociation between dreams and wakefulness : Insights from body and action representations of rare individuals with massive somatosensory deafferentation. *Consciousness and Cognition*, 106, 103415.
<https://doi.org/10.1016/j.concog.2022.103415>
- Chen, Y., Gong, X., Ibrahim, S. I. A., Liang, H., & Zhang, J. (2022). Convergent innervations of mesencephalic trigeminal and vestibular nuclei neurons onto oculomotor and pre-oculomotor neurons-Tract tracing and triple labeling in rats. *PloS One*, 17(11), e0278205.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278205>
- Cignetti, F., Vaugoyeau, M., Fontan, A., Jover, M., Livet, M.-O., Hugonénq, C., Audic, F., Chabrol, B., & Assaiante, C. (2018). Feedforward motor control in developmental dyslexia and developmental coordination disorder : Does comorbidity matter? *Research in Developmental Disabilities*, 76, 25-34. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2018.03.001>
- Clark, J. E., & Whitall, J. (1989). What Is Motor Development? The Lessons of History. *Quest*, 41(3), 183-202. <https://doi.org/10.1080/00336297.1989.10483969>

- Cole, W. G., & Adolph, K. E. (2023). Learning to Move in a Changing Body in a Changing World. *Integrative And Comparative Biology*, 63(3), 653-663. <https://doi.org/10.1093/icb/icad083>
- College Français d'Orthophonie. (2022). Recommendations for Good Practice in the Assessment, Prevention and Remediation of Written Language Disorders in Children and Adults. Method : Formalised Consensus Recommendations.Paris. https://www.college-francais-orthophonie.fr/wp-content/uploads/2022/03/ RECOS_LE.pdf. (s. d.).
- Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC : A dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, 108(1), 204-256. <https://doi.org/10.1037/0033-295x.108.1.204>
- Committee on Children With Disabilities American Academy of Pediatrics (AAP) and American Academy of Ophthalmology (AAO) American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus (AAPOS). (1998). Learning Disabilities, Dyslexia, and Vision : A Subject Review. *Pediatrics*, 102(5), 1217-1219. <https://doi.org/10.1542/peds.102.5.1217> Cowan, N. (2022). Working memory development : A 50-year assessment of research and underlying theories. *Cognition*, 224, 105075. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2022.105075>
- Cummine, J., Ngo, T., & Nisbet, K. (2023). Characterization of Cortical and Subcortical Structural Brain Asymmetry in Adults with and without Dyslexia. *Brain Sciences*, 13(12), 1622. <https://doi.org/10.3390/brainsci13121622>
- Da Cunha, H., & Da Silva, O. (1986a). Le syndrome de déficience posturale. Son intérêt en ophtalmologie [Postural deficiency syndrome. Its importance in ophthalmology]. *J Fr Ophtalmol*, 9(11), 747-755.
- Da Cunha HM, H. (1987). Le syndrome de déficience posturale. *Agressologie*, 28, 941-943. <http://ada-posturologie.fr/SDP1987.htm>

- da Costa, C. S. N., Batistão, M. V., & Rocha, N. A. C. F. (2013). Quality and structure of variability in children during motor development : A systematic review. *Research in Developmental Disabilities*, 34(9), 2810-2830. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.05.031>
- Daniel, S. S., Walsh, A. K., Goldston, D. B., Arnold, E. M., Reboussin, B. A., & Wood, F. B. (2006). Suicidality, School Dropout, and Reading Problems Among Adolescents. *Journal of Learning Disabilities*, 39(6), 507-514. <https://doi.org/10.1177/00222194060390060301>
- Danna, J., Lê, M., Tallet, J., Albaret, J.-M., Chaix, Y., Ducrot, S., & Jover, M. (2024). Motor Adaptation Deficits in Children with Developmental Coordination Disorder and/or Reading Disorder. *Children*, 11(4), 491. <https://doi.org/10.3390/children11040491>
- Dean, C. L., Eggleston, B. A., Gibney, K. D., Aligbe, E., Blackwell, M., & Kwakye, L. D. (2017). Auditory and visual distractors disrupt multisensory temporal acuity in the crossmodal temporal order judgment task. *PLOS ONE*, 12(7), e0179564. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0179564>
- Deffeyes, J. E., Kochi, N., Harbourne, R. T., Kyvelidou, A., Stuber, W. A., & Stergiou, N. (2009). Nonlinear detrended fluctuation analysis of sitting center-of-pressure data as an early measure of motor development pathology in infants. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, 13(4), 351-368.
- de Freitas, P. B., Pedão, S. T., & Barela, J. A. (2014). Visuomotor processing and hand force coordination in dyslexic children during a visually guided manipulation task. *Research in Developmental Disabilities*, 35(10), Article 10. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.06.002>
- Denton, T. F., & Meindl, J. N. (2016). The Effect of Colored Overlays on Reading Fluency in Individuals with Dyslexia. *Behavior Analysis in Practice*, 9(3), 191-198. <https://doi.org/10.1007/s40617-015-0079-7>

- Derouesné, C. (2022). Nicolas Bernstein and Pyotr Anokhin : Pioneers of modern psychophysiology. *Geriatric Et Psychologie Neuropsychiatrie Du Vieillessement*.
<https://doi.org/10.1684/pnv.2022.1019>
- Desmottes, L., Meulemans, T., & Maillart, C. (2016). Later learning stages in procedural memory are impaired in children with Specific Language Impairment. *Research in Developmental Disabilities*, 48, 53-68. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2015.10.010>
- Di Pellegrino, G., Fadiga, L., Fogassi, L., Gallese, V., & Rizzolatti, G. (1992). Understanding motor events : A neurophysiological study. *Experimental Brain Research*, 91(1), 176-180.
<https://doi.org/10.1007/BF00230027>
- Druelle, F., Özçelebi, J., Marchal, F., & Berillon, G. (2022). Development of bipedal walking in olive baboons, *Papio anubis* : A kinematic analysis. *American Journal of Biological Anthropology*, 177(4), 719-734. <https://doi.org/10.1002/ajpa.24454>
- Dupuy, E. (2019). *Impact d'une déficience somesthésique sur les mécanismes de régulation du contrôle postural : Un nouveau modèle, le syndrome d'Ehlers-Danlos de type hypermobile* [Phdthesis, Normandie Université]. <https://theses.hal.science/tel-02125519>
- Dupuy, E. G., Leconte, P., Vlamynck, E., Sultan, A., Chesneau, C., Denise, P., Besnard, S., Bienvenu, B., & Decker, L. M. (2017). Ehlers-Danlos Syndrome, Hypermobility Type : Impact of Somatosensory Orthoses on Postural Control (A Pilot Study). *Frontiers in Human Neuroscience*, 11, 283. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2017.00283>
- Egan, C., Payne, J. S., & Jones, M. W. (2023). The impact of phonological relatedness on semantic congruency judgements in readers with dyslexia : Evidence from behavioural judgements, event related potentials and pupillometry. *Neuropsychologia*, 184, 108548.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2023.108548>

- Facoetti, A., Luisa Lorusso, M., Paganoni, P., Umiltà, C., & Gastone Mascetti, G. (2003). The role of visuospatial attention in developmental dyslexia : Evidence from a rehabilitation study. *Cognitive Brain Research*, 15(2), 154-164. [https://doi.org/10.1016/S0926-6410\(02\)00148-9](https://doi.org/10.1016/S0926-6410(02)00148-9)
- Fadiga, L., Craighero, L., Buccino, G., & Rizzolatti, G. (2002). Speech listening specifically modulates the excitability of tongue muscles : A TMS study. *European Journal of Neuroscience*, 15(2), 399-402. <https://doi.org/10.1046/j.0953-816x.2001.01874.x>
- Falissard, B. (2014). Causalité, déterminisme, interprétation : Trois tâches aveugles de la recherche biomédicale. *Connexions*, n° 102(2), 87-92. <https://doi.org/10.3917/cnx.102.0087>
- Fontan, A., Cignetti, F., Vaugoyeau, M., & Assaiante, C. (2022). Strength of the perception action coupling in human body discrimination tasks. *Human Movement Science*, 85, 102993. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2022.102993>
- Franceschini, S., Puccio, G., Bertoni, S., Mascheretti, S., Cappellini, A., Gori, S., & Facoetti, A. (2025). Flickering lenses enhance reading performance through placebo effect. *Psychological Research*, 89(4), 120. <https://doi.org/10.1007/s00426-025-02146-9>
- Franzen, L., Stark, Z., & Johnson, A. P. (2021). Individuals with dyslexia use a different visual sampling strategy to read text. *Scientific Reports*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84945-9>
- Froesel, M., Cappe, C., & Ben Hamed, S. (2021). A multisensory perspective onto primate pulvinar functions. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 125, 231-243. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2021.02.043>
- Fultz, N. E., Bonmassar, G., Setsompop, K., Stickgold, R. A., Rosen, B. R., Polimeni, J. R., & Lewis, L. D. (2019). Coupled electrophysiological, hemodynamic, and cerebrospinal fluid oscillations in human sleep. *Science*, 366(6465), 628-631. <https://doi.org/10.1126/science.aax5440>
- Furet, F., & Ouzouf, J. (1977). *Lire et écrire*. Les Éd. de Minuit.

- Gagey, P. (1988). [The postural system]. *Agressologie: Revue Internationale De Physio-Biologie Et De Pharmacologie Appliquees Aux Effets De L'agression*, 29(9), 621-625.
- Galaburda, A. M. (1994). Developmental dyslexia and animal studies : At the interface between cognition and neurology. *Cognition*, 50(1), 133-149. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(94\)90025-6](https://doi.org/10.1016/0010-0277(94)90025-6)
- Galaburda, A. M. (2002). Anatomy of the Temporal Processing Deficit in Developmental Dyslexia. In E. Witruk, A. D. Friederici, & T. Lachmann (Éds.), *Basic Functions of Language, Reading and Reading Disability* (Vol. 20, p. 241-250). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4615-1011-6_14
- Galaburda, A. M., Sherman, G. F., Rosen, G. D., Aboitiz, F., & Geschwind, N. (1985). Developmental dyslexia : Four consecutive patients with cortical anomalies. *Annals of Neurology*, 18(2), 222-233. <https://doi.org/10.1002/ana.410180210>
- Gavard, E., & Ziegler, J. C. (2024). Semantic and Syntactic Predictions in Reading Aloud : Are Good Predictors Good Statistical Learners? *Journal of Cognition*, 7(1), 40. <https://doi.org/10.5334/joc.363>
- Gilhodes, J. C., & Roll, J. P. (2001, septembre 8). *Gilhodes J.-C., Roll J.-P. (2001). Virtual handwriting induced by well-patterned tendon vibration in humans. , Septembre 8-12, Marseille.* First joint meeting of the EBBS and EPPS, Marseilles. https://www.demauroy.net/files_pdf/er42/er42-2.pdf
- Gillingham, A., & Stillman, B. W. (1946). *Remedial Training for Children with Specific Disability in Reading, Spelling and Penmanship* (Leather Bound).
- Goldberger, A. L., Amaral, L. A. N., Hausdorff, J. M., Ivanov, P. Ch., Peng, C.-K., & Stanley, H. E. (2002). Fractal dynamics in physiology : Alterations with disease and aging. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 99(suppl_1), 2466-2472. <https://doi.org/10.1073/pnas.012579499>

- Gorgoni, M., Scarpelli, S., Reda, F., & De Gennaro, L. (2020). Sleep EEG oscillations in neurodevelopmental disorders without intellectual disabilities. *Sleep Medicine Reviews*, 49, 101224. <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2019.101224>
- Goswami, U. (2015). Sensory theories of developmental dyslexia : Three challenges for research. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(1), 43-54. <https://doi.org/10.1038/nrn3836>
- Griffiths, S., & Frith, U. (2002). Evidence for an articulatory awareness deficit in adult dyslexics. *Dyslexia (Chichester, England)*, 8(1), 14-21. <https://doi.org/10.1002/dys.201>
- Gueguen, J., Hassler, C., & Falissard, B. (2016). *Evaluation de l'efficacité du traitement proprioceptif de la dyslexie*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24523.69924>
- Guilleminault, C., & Pelayo, R. (1998). Sleep-disordered breathing in children. *Annals of Medicine*, 30(4), 350-356. <https://doi.org/10.3109/07853899809029934>
- Hairston, W. D., Burdette, J. H., Flowers, D. L., Wood, F. B., & Wallace, M. T. (2005). Altered temporal profile of visual–auditory multisensory interactions in dyslexia. *Experimental Brain Research*, 166(3), 474-480. <https://doi.org/10.1007/s00221-005-2387-6>
- Handler, S. M., Fierson, W. M., & the Section on Ophthalmology and Council on Children with Disabilities, A. A. of O., American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus, and American Association of Certified Orthoptists. (2011). Learning Disabilities, Dyslexia, and Vision. *Pediatrics*, 127(3), e818-e856. <https://doi.org/10.1542/peds.2010-3670>
- Hariton, E., & Locascio, J. J. (2018). Randomised controlled trials – the gold standard for effectiveness research : Study design: randomised controlled trials. *BJOG: An International Journal of Obstetrics & Gynaecology*, 125(13), 1716-1716. <https://doi.org/10.1111/1471-0528.15199>
- Hedenius, M., Lum, J. A. G., & Bölte, S. (2021). Alterations of procedural memory consolidation in children with developmental dyslexia. *Neuropsychology*, 35(2), 185-196. <https://doi.org/10.1037/neu0000708>

- Helmholtz H. (1866). *A Treatise on Physiological Optics (Originally published as Handbuch der Physiologischen Optik Leipzig, Hamburg : Voss, 1866).*
- Hillman, H., Botthof, T., Forrence, A. D., & McDougale, S. D. (2024). Dissociable Codes in Motor Working Memory. *Psychological Science*, 35(2), 150-161.
<https://doi.org/10.1177/09567976231221756>
- Hinshelwood, J. (1917). . *Congenital Word-blindness* (H.K LEWIS&CO Ltd).
<https://archive.org/details/congenitalwordbl00hinsrich>
- Hitch, G. J., Allen, R. J., & Baddeley, A. D. (2024). The multicomponent model of working memory fifty years on. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 17470218241290909.
<https://doi.org/10.1177/17470218241290909>
- Hu, W., Hao, Z., Du, P., Di Vincenzo, F., Manzi, G., Cui, J., Fu, Y.-X., Pan, Y.-H., & Li, H. (2023). Genomic inference of a severe human bottleneck during the Early to Middle Pleistocene transition. *Science*, 381(6661), 979-984. <https://doi.org/10.1126/science.abq7487>
- Hughes, R. W. (2025). The phonological store of working memory : A critique and an alternative, perceptual-motor, approach to verbal short-term memory. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 78(2), 240-263. <https://doi.org/10.1177/17470218241257885>
- Iacoboni, M. (2008). The role of premotor cortex in speech perception : Evidence from fMRI and rTMS. *Journal of Physiology, Paris*, 102(1-3), 31-34.
<https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2008.03.003>
- Iaconis, F. R., Meo, M., Del Punta, J. A., & Gasaneo, G. (2023). Modelling the eye movements of dyslexic children during reading as a continuous time random walk. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 33(8), 083116.
<https://doi.org/10.1063/5.0140886>
- Ihlen, E. (2012). Introduction to multifractal detrended fluctuation analysis in matlab. *Front. Physiol.*, 3, 141. <https://doi.org/doi: 10.3389/fphys.2012.00141>

- Jagini, K. K. (2021). Temporal Binding in Multisensory and Motor-Sensory Contexts : Toward a Unified Model. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15.
<https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2021.629437>
- Janin, A., Barela, J. A., Dupui, P., T. Gross, M., & Janin, M. (2016). Posturodynamic 6 Test : A New Scoring Method for Effective Communication of Results. *International Journal of Clinical Medicine*, 07(01), 77-83. <https://doi.org/10.4236/ijcm.2016.71006>
- Jeannerod, M. (2001). Neural simulation of action : A unifying mechanism for motor cognition. *NeuroImage*, 14(1 Pt 2), S103-109. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0832>
- Johnson, S. K., Naidu, R. K., Ostopowicz, R. C., Kumar, D. R., Bhupathi, S., Mazza, J. J., & Yale, S. H. (2009). Adolf Kussmaul : Distinguished Clinician and Medical Pioneer. *Clinical Medicine & Research*, 7(3), 107-112. <https://doi.org/10.3121/cmr.2009.850>
- Karni, A., Tanne, D., Rubenstein, B. S., Askenasy, J. J. M., & Sagi, D. (1994). Dependence on REM Sleep of Overnight Improvement of a Perceptual Skill. *Science*, 265(5172), 679-682.
<https://doi.org/10.1126/science.8036518>
- Kawato, M. (1999). Internal models for motor control and trajectory planning. *Current Opinion in Neurobiology*, 9(6), 718-727. [https://doi.org/10.1016/S0959-4388\(99\)00028-8](https://doi.org/10.1016/S0959-4388(99)00028-8)
- Kershner, J. R. (2020). Dyslexia as an adaptation to cortico-limbic stress system reactivity. *Neurobiology of Stress*, 12, 100223. <https://doi.org/10.1016/j.ynstr.2020.100223>
- Kershner, J. R. (2021). Multisensory deficits in dyslexia may result from a locus coeruleus attentional network dysfunction. *Neuropsychologia*, 161, 108023.
<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2021.108023>
- Kimel, E., Lieder, I., & Ahissar, M. (2022). Repeated series learning revisited with a novel prediction on the reduced effect of item frequency in dyslexia. *Scientific Reports*, 12(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16805-z>

- King, B. R., Pangelinan, M. M., Kagerer, F. A., & Clark, J. E. (2010). Improvements in proprioceptive functioning influence multisensory-motor integration in 7- to 13-year-old children. *Neuroscience Letters*, 483(1), 36-40. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2010.07.056>
- Kirchner, M., Schubert, P., Liebherr, M., & Haas, C. T. (2014). Detrended Fluctuation Analysis and Adaptive Fractal Analysis of Stride Time Data in Parkinson's Disease : Stitching Together Short Gait Trials. *PLOS ONE*, 9(1), e85787. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0085787>
- Köse, B., Temizkan, E., Şahin, S., Kara, K., & Uyanık, M. (2024). Correction to effects of a visual perception-based occupational therapy programme on reading and motor skills in children with developmental dyslexia : Single blind randomised crossover study design. *Dyslexia*, 30(4), e1785. <https://doi.org/10.1002/dys.1785>
- Köse, B., & Temizkan, E. (2024). Effects of the Visual Praxis-Based Occupational Therapy Education Program on different kinds of reading skills : Single-blind randomized follow-up study. *Applied Neuropsychology: Child*, 13(4), 359-365. <https://doi.org/10.1080/21622965.2023.2200186>
- Kotz, S. A., D'Ausilio, A., Raettig, T., Begliomini, C., Craighero, L., Fabbri-Destro, M., Zingales, C., Haggard, P., & Fadiga, L. (2010). Lexicality drives audio-motor transformations in Broca's area. *Brain and Language*, 112(1), 3-11. <https://doi.org/10.1016/j.bandl.2009.07.008>
- Kozyra, M., Kostyun, R., & Strecker, S. (2024). The prevalence of multisystem diagnoses among young patients with hypermobile Ehlers-Danlos syndrome and hypermobility spectrum disorder : A retrospective analysis using a large healthcare claims database. *Medicine*, 103(41), e39212. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000039212>
- Kugler, P. N., Scott Kelso, J. A., & Turvey, M. T. (1980). 1 On the Concept of Coordinative Structures as Dissipative Structures : I. Theoretical Lines of Convergence. In *Advances in Psychology* (Vol. 1, p. 3-47). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)61936-6](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)61936-6)

- Kuznetsov, N. A., & Rhea, C. K. (2017). Power considerations for the application of detrended fluctuation analysis in gait variability studies. *PLOS ONE*, 12(3), e0174144.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0174144>
- Laasonen M., Service E., & Virsu V. (2001). Temporal order and processing acuity of visual, auditory, and tactile perception in developmentally dyslexic young adults. *Cogn Affect Behav Neurosci*, 1, 394-410.
- Laasonen M., Service E., & Virsu V. (2002). Crossmodal temporal order and processing acuity in developmentally dyslexic young adults. 80, 340-354.
- Lakshminarasimhan, K. J., Xie, M., Cohen, J. D., Sauerbrei, B. A., Hantman, A. W., Litwin-Kumar, A., & Escola, S. (2024). Specific connectivity optimizes learning in thalamocortical loops. *Cell Reports*, 43(4), 114059. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2024.114059>
- Lapeyre, E., Melmi, J.-B., Colé, P., & Calabrèse, A. (2024). Pulsed lighting for adults with Dyslexia : Very limited impact, confined to individuals with severe reading deficits. *Scientific Reports*, 14(1), 22320. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-73273-3>
- Laprevotte, J., Papaxanthis, C., Saltarelli, S., Quercia, P., & Gaveau, J. (2021). Movement detection thresholds reveal proprioceptive impairments in developmental dyslexia. *Scientific Reports*, 11(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79612-4>
- Latash, M. L. (2021). Efference copy in kinesthetic perception : A copy of what is it? *Journal of Neurophysiology*, 125(4), 1079-1094. <https://doi.org/10.1152/jn.00545.2020>
- Le Floch, A., & Ropars, G. (2017). Left-right asymmetry of the Maxwell spot centroids in adults without and with dyslexia. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 284(1865), 20171380. <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1380>
- Le Floch, A., & Ropars, G. (2023). Hebbian Control of Fixations in a Dyslexic Reader : A Case Report. *Brain Sciences*, 13(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/brainsci13101478>

- Lefavrais, P. (2005). *Alouette-R : test d'analyse de la vitesse en lecture à partir d'un texte*. Éditions du centre de psychologie appliquée.
- Legrand, A., Bui-Quoc, E., Doré-Mazars, K., Lemoine, C., Gérard, C.-L., & Bucci, M. P. (2012). Effect of a Dual Task on Postural Control in Dyslexic Children. *PLOS ONE*, 7(4), e35301. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035301>
- Letellier, C., Abraham, R., Shepelyansky, D. L., Rössler, O. E., Holmes, P., Lozi, R., Glass, L., Pikovsky, A., Olsen, L. F., Tsuda, I., Grebogi, C., Parlitz, U., Gilmore, R., Pecora, L. M., & Carroll, T. L. (2021). Some elements for a history of the dynamical systems theory. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 31(5), 053110. <https://doi.org/10.1063/5.0047851>
- Li, T.-Y., & Yorke, J. A. (1975). Period Three Implies Chaos. *The American Mathematical Monthly*, 82(10), 985-992. <https://doi.org/10.1080/00029890.1975.11994008>
- Liberman, A. M., & Mattingly, I. G. (1985). The motor theory of speech perception revised. *Cognition*, 21(1), 1-36. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(85\)90021-6](https://doi.org/10.1016/0010-0277(85)90021-6)
- Liddle, E. B., Jackson, G. M., Rorden, C., & Jackson, S. R. (2009). Lateralized temporal order judgement in dyslexia. *Neuropsychologia*, 47(14), 3244-3254. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2009.08.007>
- Lina, I. R., Contreras Troya, T. I., Matamoros, O. M., Moreno Escobar, J. J., & Padilla, R. T. (2020). Fractal characterization of stochastic series fluctuations of children with reading disorders. *Nonlinear Dynamics, Psychology, and Life Sciences*, 24(2), 159-177. <http://www.scopus.com/inward/record.url?scp=85083073678&partnerID=8YFLogxK>
- Liu, Y., Luo, C., Zheng, J., Liang, J., & Ding, N. (2022). Working memory asymmetrically modulates auditory and linguistic processing of speech. *NeuroImage*, 264, 119698. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2022.119698>

- Llinás, R., & Ribary, U. (1993). Coherent 40-Hz Oscillation Characterizes Dream State in Humans. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 90(5), 2078-2081. <https://www.jstor.org/stable/2361462>
- Lokhandwala, S., & Spencer, R. M. C. (2022). Relations between sleep patterns early in life and brain development : A review. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 56, 101130. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2022.101130>
- Loureau, S., Poulain, R., Cappe, C., & Janin, M. (2023). Les variations tactiles plantaires influencent-elles les Hétérophories Verticales ? *Movement & Sport Sciences - Science & Motricité*. <https://doi.org/10.1051/sm/2023015>
- Lubineau, M., Watkins, C. P., Glasel, H., & Dehaene, S. (2023). Does word flickering improve reading? Negative evidence from four experiments using low and high frequencies. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 290(2008), 20231665. <https://doi.org/10.1098/rspb.2023.1665>
- Luongo, A., Lukowski, A., Protho, T., Van Vorce, H., Pisani, L., & Edgin, J. (2021). Chapter Eleven - Sleep's role in memory consolidation : What can we learn from atypical development? In S. E. Berger, R. T. Harbourne, & A. Scher (Éds.), *Advances in Child Development and Behavior* (Vol. 60, p. 229-260). JAI. <https://doi.org/10.1016/bs.acdb.2020.08.001>
- Lyon, G. R., Shaywitz, S. E., & Shaywitz, B. A. (2003). A definition of dyslexia. *Annals of Dyslexia*, 53(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s11881-003-0001-9>
- Marchetti, R., Pinto, S., Spieser, L., Vaugoyeau, M., Cavalli, E., El Ahmadi, A., Assaiante, C., & Colé, P. (2023). Phoneme Representation and Articulatory Impairment : Insights from Adults with Comorbid Motor Coordination Disorder and Dyslexia. *Brain Sciences*, 13(2), 210. <https://doi.org/10.3390/brainsci13020210>

- Marchetti, R., Vaugoyeau, M., Colé, P., & Assaiante, C. (2022). A sensorimotor representation impairment in dyslexic adults : A specific profile of comorbidity. *Neuropsychologia*, 165, 108134. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2021.108134>
- Marino, A., & Quercia, P. (2007). Vers une orthodontie neuro-sensorielle. *Posturologie clinique: Dysfonctions motrices et cognitives.[Neuro-sensory Orthodontia in Clinical Posturology: Motor and Cognitive dysfunction.] Paris: Masson*, 226-232.
- Marino Alfredo, Villeneuve Philippe, & Gagey Pierre-Marie. (1999). Postural stomatognathic reflexes. *Posture and gait*, 9(Supl 1).
- Mascheretti, S., Arrigoni, F., Toraldo, A., Giubergia, A., Andreola, C., Villa, M., Lampis, V., Giorda, R., Villa, M., & Peruzzo, D. (2024). Alterations in neural activation in the ventral frontoparietal network during complex magnocellular stimuli in developmental dyslexia associated with READ1 deletion. *Behavioral and Brain Functions*, 20(1), 16. <https://doi.org/10.1186/s12993-024-00241-2>
- Mascheretti, S., Riva, V., Feng, B., Trezzi, V., Andreola, C., Giorda, R., Villa, M., Dionne, G., Gori, S., Marino, C., & Facoetti, A. (2020). The Mediation Role of Dynamic Multisensory Processing Using Molecular Genetic Data in Dyslexia. *Brain Sciences*, 10(12), Article 12. <https://doi.org/10.3390/brainsci10120993>
- Masulli, F., Galluccio, M., Gerard, C.-L., Peyre, H., Rovetta, S., & Bucci, M. P. (2018). Effect of different font sizes and of spaces between words on eye movement performance : An eye tracker study in dyslexic and non-dyslexic children. *Vision Research*, 153, 24-29. <https://doi.org/10.1016/j.visres.2018.09.008>
- Matheron, E. (2007). Test de Maddox (Stries Verticales) et Syndrome de Déficience Posturale. In *Posturologie clinique* (p. 44-51). Elsevier. <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9782294046391500051>

- Matheron, E., & Kapoula, Z. (2011). Vertical Heterophoria and Postural Control in Nonspecific Chronic Low Back Pain. *PLOS ONE*, 6(3), e18110.
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0018110>
- Matheron, E., Quercia, P., Weber, B., & Gagey, P. M. (2005). Vertical heterophoria and postural deficiency syndrome. *Gait & Posture*, 21, S132-S133. [https://doi.org/10.1016/S0966-6362\(05\)80437-0](https://doi.org/10.1016/S0966-6362(05)80437-0)
- Mathurin B. (2005). *Le test des rotateurs : Recherche de l'asymétrie tonique segmentaire.: Vol. Posture et équilibre, Bipédie, contrôle postural et représentation corticale* (In M Lacour et B Weber (Eds)). Solal.
- McIlroy, W., & Maki, B. (1997). Preferred placement of the feet during quiet stance : Development of a standardized foot placement for balance testing. *Clinical Biomechanics*, 12(1), 66-70. [https://doi.org/10.1016/S0268-0033\(96\)00040-X](https://doi.org/10.1016/S0268-0033(96)00040-X)
- Meguerditchian, A., Cochet, H., Wallez, C., & Vauclair, J. (2013). Communication, latéralité et cerveau chez les primates humains et non humains : Vers une origine gestuelle ou multimodale du langage ? *Revue de primatologie*, 5.
<https://doi.org/10.4000/primatologie.1717>
- Meilleur, A., Foster, N. E. V., Coll, S.-M., Brambati, S. M., & Hyde, K. L. (2020). Unisensory and multisensory temporal processing in autism and dyslexia : A systematic review and meta-analysis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 116, 44-63.
<https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2020.06.013>
- Meister, I. G., Wilson, S. M., Deblieck, C., Wu, A. D., & Iacoboni, M. (2007). The Essential Role of Premotor Cortex in Speech Perception. *Current Biology*, 17(19), 1692-1696.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.08.064>

- Meng, Z.-L., Liu, M.-L., & Bi, H.-Y. (2022). Spatial and temporal processing difficulties in Chinese children with developmental dyslexia : An ERP study. *Dyslexia*, 28(4), 416-430.
<https://doi.org/10.1002/dys.1723>
- Meo, M. M., Iaconis, F. R., Del Punta, J. A., Delrieux, C. A., & Gasaneo, G. (2024). Multifractal information on reading eye tracking data. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, 638, 129625. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2024.129625>
- Murray, M. M., Lewkowicz, D. J., Amedi, A., & Wallace, M. T. (2016). Multisensory Processes : A Balancing Act across the Lifespan. *Trends in Neurosciences*, 39(8), 567-579.
<https://doi.org/10.1016/j.tins.2016.05.003>
- Nazir, T. A., Jeannerod, M., & Hauk, O. (2008). The role of sensory-motor systems for language understanding. *Journal of Physiology-Paris*, 102(1-3), 1-3.
<https://doi.org/10.1016/j.jphysparis.2008.03.010>
- Naudet, F., Seidenberg, M., & Bishop, D. V. M. (2024). Comment on Le Floch & Ropars (2017) 'Left–right asymmetry of the Maxwell spot centroids in adults without and with dyslexia'. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 291(2017).
<https://doi.org/10.1098/rspb.2023.2060>
- Nemmi, F., Cignetti, F., Vaugoyeau, M., Assaiante, C., Chaix, Y., & Péran, P. (2023). Developmental dyslexia, developmental coordination disorder and comorbidity discrimination using multimodal structural and functional neuroimaging. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 160, 43-54.
<https://doi.org/10.1016/j.cortex.2022.10.016>
- New, B., Pallier, C., Ferrand, L., & Matos, R. (2001). Une base de données lexicales du français contemporain sur internet : LEXIQUE™//A lexical database for contemporary french : LEXIQUE™. *L'Année psychologique*, 101(3), Article 3.
<https://doi.org/10.3406/psy.2001.1341>

- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (1990). Automaticity : A new framework for dyslexia research? *Cognition*, 35(2), 159-182. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(90\)90013-A](https://doi.org/10.1016/0010-0277(90)90013-A)
- Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2011). Dyslexia, dysgraphia, procedural learning and the cerebellum. *Cortex*, 47(1), 117-127. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2009.08.016>
- Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., Berry, E. L., Jenkins, I. H., Dean, P., & Brooks, D. J. (1999). Association of abnormal cerebellar activation with motor learning difficulties in dyslexic adults. *The Lancet*, 353(9165), Article 9165. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(98\)09165-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(98)09165-X)
- O'Hare, A., & Khalid, S. (2002). The association of abnormal cerebellar function in children with developmental coordination disorder and reading difficulties. *Dyslexia (Chichester, England)*, 8(4), 234-248. <https://doi.org/10.1002/dys.230>
- Odegard, T. N., Farris, E. A., & Middleton, A. E. (2024). Dyslexia in the 21st century : Revisiting the consensus definition. *Annals of Dyslexia*, 74(3), 273-281. <https://doi.org/10.1007/s11881-024-00316-9>
- Patel, M., Magnusson, M., Lush, D., Gomez, S., & Fransson, P. A. (2010). Effects of dyslexia on postural control in adults. *Dyslexia (Chichester, England)*, 16(2), 162-174. <https://doi.org/10.1002/dys.398>
- Paulesu, E., Danelli, L., & Berlingeri, M. (2014). Reading the dyslexic brain : Multiple dysfunctional routes revealed by a new meta-analysis of PET and fMRI activation studies. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00830>
- 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>
- Pınar, Y., Bayat, N., Yüksel, B., & Özkara, Y. (2025). Reading and White Matter Development : A Systematic Review of Neuroplastic Changes in Literacy. *Children*, 12(6), 710. <https://doi.org/10.3390/children12060710>

- Platonova, O., Goldina, S., Neau, L., & Giraud, A. L. (2025, mars). *Améliorer la lecture des lecteurs dyslexiques grâce à la stimulation auditive rythmique : Résultats préliminaire* [Poster]. Colloque scientifique de la FFDys, Université de jussieu, Paris.
- Plaza, M. (2004). Les troubles du langage de l'enfant. Hypothèses étiologiques spécifiques, perspective intégrative. *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*, 52(7), 460-466.
<https://doi.org/10.1016/j.neurenf.2004.09.002>
- Pollatsek, A., Reichle, E. D., & Rayner, K. (2006). Tests of the E-Z Reader model : Exploring the interface between cognition and eye-movement control. *Cognitive Psychology*, 52(1), Article 1. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2005.06.001>
- Pommée, T., Balaguer, M., Mauclair, J., Pinquier, J., & Woisard, V. (2022). Assessment of adult speech disorders : Current situation and needs in French-speaking clinical practice. *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 47(2), 92-108.
<https://doi.org/10.1080/14015439.2020.1870245>
- Pozzo, T., Vernet, P., Creuzot-Garcher, C., Robichon, F., Bron, A., & Quercia, P. (2006). Static postural control in children with developmental dyslexia. *Neuroscience Letters*, 403(3), 211-215. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2006.03.049>
- Price, T. F., Peterson, C. K., & Harmon-Jones, E. (2012). The emotive neuroscience of embodiment. *Motivation and Emotion*, 36(1), 27-37. <https://doi.org/10.1007/s11031-011-9258-1>
- Pulliam, G., Feldman, J. I., & Woynaroski, T. G. (2023). Audiovisual multisensory integration in individuals with reading and language impairments : A systematic review and meta-analysis. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 149, 105130.
<https://doi.org/doi.org/10.1016/j.neubiorev.2023.105130>

- Quercia, P. (2008). L'hétérophorie verticale du dyslexique au test de Maddox : Hétérophorie ou localisation spatiale erronée ? Étude en vidéo-oculographie de 14 cas. *Journal français d'orthoptique*, 40, 25-45. <http://cat.inist.fr/?aModele=afficheN&cpsidt=21658844>
- Quercia, P., Chavet, K., & Gaveau, J. (2025). Ocular and General Proprioception in Dyslexic Children : A Review of Their Diurnal and Nocturnal Dysfunctions and Their Repercussions. *Vision*, 9(2), 44.
- Quercia, P., Demougeot, L., Dos Santos, M., & Bonnetblanc, F. (2011a). Integration of proprioceptive signals and attentional capacity during postural control are impaired but subject to improvement in dyslexic children. *Experimental Brain Research*, 209(4), 599-608. <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2593-3>
- Quercia, P., & Marino, A. (2012, mai). *Impact de la modification du Maddox postural sur l'identification des mots écrits chez le dyslexique. [Impact of postural Maddox modification on written word identification in dyslexics.]* [Communication affichées]. CEN STIMCO (centre expertise national en stimulation cognitive), Dijon. http://www.dysproprioception.fr/documents_pdf/12_DYS_10.pdf
- Quercia, P., & Marino, A. (2017). *Oeil et Bouche Capteur rétino-trigéminé, Manuel Pratique. (Eye and Mouth Retino-trigeminal Sensor, Practical Manual.)* (Ed.Française). <https://doi.org/10.2147/OPTH.S226690>
- Quercia, P., Pozzo, T., Marino, A., Guillemant, A. L., Cappe, C., & Gueugneau, N. (2020). Children with Dyslexia Have Altered Cross-Modal Processing Linked to Binocular Fusion. A Pilot Study. *Clinical Ophthalmology (Auckland, N.Z.)*, 14, 437-448. <https://doi.org/10.2147/OPTH.S226690>
- Quercia, P., Quercia, M., Feiss, L. J., & Allaert, F. (2015). The distinctive vertical heterophoria of dyslexics. *Clinical Ophthalmology (Auckland, N.Z.)*, 9, 1785-1797. <https://doi.org/10.2147/OPTH.S88497>

- Quercia, P., Seigneuric, A., Chariot, S., Bron, A., Creuzot-Garcher, C., & Robichon, F. (2007). [Proprioception changes induced by prismatic glasses wear in children suffering from developmental dyslexia]. *Journal Francais D'ophtalmologie*, 30(4), 380-389.
[https://doi.org/10.1016/s0181-5512\(07\)89608-2](https://doi.org/10.1016/s0181-5512(07)89608-2)
- Quercia, P., Seigneuric, A., Chariot, S., Vernet, P., Pozzo, T., Bron, A., Creuzot-Garcher, C., & Robichon, F. (2005). Proprioception oculaire et dyslexie de développement : À propos de 60 observations cliniques. *Journal Français d'Ophtalmologie*, 28(7), 713-723.
[https://doi.org/10.1016/S0181-5512\(05\)80983-0](https://doi.org/10.1016/S0181-5512(05)80983-0)
- Ramezani, M., Behzadipour, S., Pourghayoomi, E., Joghataei, M. T., Shirazi, E., & Fawcett, A. J. (2021). Evaluating a new verbal working memory-balance program : A double-blind, randomized controlled trial study on Iranian children with dyslexia. *BMC Neuroscience*, 22(1), 55. <https://doi.org/10.1186/s12868-021-00660-1>
- Ramus, F., Rosen, S., Dakin, S. C., Day, B. L., Castellote, J. M., White, S., & Frith, U. (2003). Theories of developmental dyslexia : Insights from a multiple case study of dyslexic adults. *Brain: A Journal of Neurology*, 126(Pt 4), 841-865. <https://doi.org/10.1093/brain/awg076>
- Rapcsak, S. Z., Beeson, P. M., Henry, M. L., Leyden, A., Kim, E., Rising, K., Andersen, S., & Cho, H. (2009). Phonological dyslexia and dysgraphia : Cognitive mechanisms and neural substrates. *Cortex*, 45(5), 575-591. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2008.04.006>
- Rasch, B., & Born, J. (2013). About Sleep's Role in Memory. *Physiological Reviews*, 93(2), 681-766. <https://doi.org/10.1152/physrev.00032.2012>
- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing : 20 years of research. *Psychological Bulletin*, 124(3), Article 3. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.124.3.372>
- Razuk, M., & Barela, J. A. (2014). Dyslexic children suffer from less informative visual cues to control posture. *Research in Developmental Disabilities*, 35(9), 1988-1994.
<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.03.045>

- Razuk, M., Lukasova, K., Bucci, M. P., & Barela, J. A. (2020). Dyslexic children need more robust information to resolve conflicting sensory situations. *Dyslexia*, 26(1), 52-66.
<https://doi.org/10.1002/dys.1641>
- Razuk, M., Perrin-Fievez, F., Gerard, C. L., Peyre, H., Barela, J. A., & Bucci, M. P. (2018). Effect of colored filters on reading capabilities in dyslexic children. *Research in Developmental Disabilities*, 83, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2018.07.006>
- Regehr, S. M., & Kaplan, B. J. (1988). Reading disability with motor problems may be an inherited subtype. *Pediatrics*, 82(2), 204-210.
- Reichle, E. D., Pollatsek, A., Fisher, D. L., & Rayner, K. (1998). Toward a model of eye movement control in reading. *Psychological Review*, 105(1), 125-157.
<https://doi.org/10.1037/0033-295x.105.1.125>
- Richard, L., & Charbonneau, D. (2009). An introduction to E-Prime. *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology*, 5(2), Article 2. <https://doi.org/10.20982/tqmp.05.2.p068>
- Rizzolatti, G., & Craighero, L. (2004). THE MIRROR-NEURON SYSTEM. *Annual Review of Neuroscience*, 27(1), 169-192. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.27.070203.144230>
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V., & Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive Brain Research*, 3(2), 131-141. [https://doi.org/10.1016/0926-6410\(95\)00038-0](https://doi.org/10.1016/0926-6410(95)00038-0)
- Rochelle, K. S. H., & Talcott, J. B. (2006). Impaired balance in developmental dyslexia? A meta-analysis of the contending evidence. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 47(11), 1159-1166. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2006.01641.x>
- Rochelle, K. S. H., Witton, C., & Talcott, J. B. (2009). Symptoms of hyperactivity and inattention can mediate deficits of postural stability in developmental dyslexia. *Experimental Brain Research*, 192(4), 627-633. <https://doi.org/10.1007/s00221-008-1568-5>

- Roll, J. P., & Vedel, J. P. (1982). Kinaesthetic role of muscle afferents in man, studied by tendon vibration and microneurography. *Experimental Brain Research*, 47(2), 177-190.
<https://doi.org/10.1007/BF00239377>
- Roll, J., & Roll, R. (1987). La proprioception extra-oculaire comme élément de référence posturale et de lecture spatiale des données rétinienne. [Extra- oculaire proprioception as an element of postural reference and of the spatial interpretation of retinal data]. *Agressologie*, 28, 905-911.
<https://www.semanticscholar.org/paper/La-proprioception-extra-oculaire-comme-%C3%A9l%C3%A9ment-de-Roll-Roll/40d4a113051d0a54abca42a5b30eda109e393a4c>
- Roll, J.-P. (2003). 1.1. Physiologie de la kinesthèse. La proprioception musculaire : Sixième sens, ou sens premier ? *Intellectica. Revue de l'Association pour la Recherche Cognitive*, 36(1), 49-66. <https://doi.org/10.3406/intel.2003.1676>
- Roll, R., Velay, J. L., & Roll, J. P. (1991). Eye and neck proprioceptive messages contribute to the spatial coding of retinal input in visually oriented activities. *Experimental Brain Research*, 85(2), 423-431. <https://doi.org/10.1007/BF00229419>
- Rowe, J. M., & Boe, S. G. (2024). Unlike overt movement, motor imagery cannot update internal models. *Brain and Cognition*, 181, 106219. <https://doi.org/10.1016/j.bandc.2024.106219>
- Sampaio, P. R., Lamas, F. M., & da Silva, J. U. (2009). Prismatic lenses and developmental dyslexia. *Pediatrics (Sao Paulo)*, 31(4), 227-233.
<https://pesquisa.bvsalud.org/portal/resource/pt/lil-550381>
- Sarlegna, F. R., Gauthier, G. M., Bourdin, C., Vercher, J.-L., & Blouin, J. (2006). Internally driven control of reaching movements : A study on a proprioceptively deafferented subject. *Brain Research Bulletin*, 69(4), 404-415. <https://doi.org/10.1016/j.brainresbull.2006.02.005>
- Schmidt, R. A. (2003). Motor schema theory after 27 years : Reflections and implications for a new theory. *Research Quarterly for Exercise and Sport*, 74(4), 366-375.
<https://doi.org/10.1080/02701367.2003.10609106>

- Schmidt Richard A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, 82, 255-260.
- Schmuckler, M. A. (1993). Chapter 6 Perception-Action Coupling in Infancy. In *Advances in Psychology* (Vol. 97, p. 137-173). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)60952-8](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)60952-8)
- Schneider, W., Eschman, A., & Zuccolotto, A. (2012). E-Prime User's Guide. *Pittsburgh: Psychology Software Tools, Inc.*
- Sela, I., Izzetoglu, M., Izzetoglu, K., & Onaral, B. (2012). A Working Memory Deficit among Dyslexic Readers with No Phonological Impairment as Measured Using the N-Back Task : An fNIR Study. *PLoS ONE*, 7(11), e46527. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0046527>
- Sherrington, C. S. (1906). *The integrative action of the nervous system* (Yale university press).
- Skottun, B. C., & Skoyles, J. R. (2010). Temporal order judgment in dyslexia—Task difficulty or temporal processing deficiency? *Neuropsychologia*, 48(7), 2226-2229. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.04.013>
- Smith-Spark, J., Fisk, J., Fawcett, A., & Nicolson, R. (2003). Investigating the central executive in adult dyslexics : Evidence from phonological and visuospatial working memory performance. *European Journal of Cognitive Psychology*, 15(4), 567-587. <https://doi.org/10.1080/09541440340000024>
- Smith-Spark, J. H., & Fisk, J. E. (2007). Working memory functioning in developmental dyslexia. *Memory*, 15(1), 34-56. <https://doi.org/10.1080/09658210601043384>
- Smith-Spark, J. H., & Gordon, R. (2022). Automaticity and Executive Abilities in Developmental Dyslexia : A Theoretical Review. *Brain Sciences*, 12(4), 446. <https://doi.org/10.3390/brainsci12040446>
- Snowling, M., & Hulme, C. (2024). Do we really need a new definition of dyslexia? A commentary. *Annals of Dyslexia*, 74(3), 355-362. <https://doi.org/10.1007/s11881-024-00305-y>

- Snowling, M. J., Hulme, C., & Nation, K. (2020). Defining and understanding dyslexia : Past, present and future. *Oxford Review of Education*, 46(4), 501-513.
<https://doi.org/10.1080/03054985.2020.1765756>
- Snowling M., Stackhouse J., & Rack JP. (1986). Phonological dyslexia and dysgraphia : A developemental analysis. *Cognitive Neuropsychology*, 3, 309-339.
- Spencer, J. P., Austin, A., & Schutte, A. R. (2012). Contributions of dynamic systems theory to cognitive development. *Cognitive Development*, 27(4), 401-418.
<https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2012.07.006>
- Sprenger-Charolles, L. (2017). Chapitre 4. Déficits phonologiques. In *Les dyslexies* (Elsevier, p. 65-88). Elsevier Masson.
- Stein, J. (2001). The magnocellular theory of developmental dyslexia. *Dyslexia (Chichester, England)*, 7(1), 12-36. <https://doi.org/10.1002/dys.186>
- Stein, J. (2022). The visual basis of reading and reading difficulties. *Frontiers in Neuroscience*, 16, 1004027. <https://doi.org/10.3389/fnins.2022.1004027>
- Stergiou, N., & Decker, L. M. (2011). Human movement variability, nonlinear dynamics, and pathology : Is there a connection? *Human Movement Science*, 30(5), 869-888.
<https://doi.org/10.1016/j.humov.2011.06.002>
- Sternad, D. (2000). Debates in dynamics : A dynamical systems perspective on action and perception. *Human Movement Science*, 19(4), 407-423. [https://doi.org/10.1016/S0167-9457\(00\)00024-5](https://doi.org/10.1016/S0167-9457(00)00024-5)
- Stevenson, M., Nunes, T., Heuer, C., Marshall, J., Sanchez, J., Thornton, R., Reiczigel, J., Robison-Cox, J., Sebastiani, P., & Solymos, P. (2017). Tools for the analysis of epidemiological data. *Package EpiR: CRAN*.
- Stoodley, C. J., & Stein, J. F. (2013). Cerebellar Function in Developmental Dyslexia. *The Cerebellum*, 12(2), 267-276. <https://doi.org/10.1007/s12311-012-0407-1>

- Sudakov, K. V. (1997). The theory of functional systems : General postulates and principles of dynamic organization (dedicated to the Anokhin Centenary). *Integrative Physiological and Behavioral Science: The Official Journal of the Pavlovian Society*, 32(4), 392-414.
<https://doi.org/10.1007/BF02688634>
- Talcott, J. B., Witton, C., Hebb, G. S., Stoodley, C. J., Westwood, E. A., France, S. J., Hansen, P. C., & Stein, J. F. (2002). On the relationship between dynamic visual and auditory processing and literacy skills; results from a large primary-school study. *Dyslexia (Chichester, England)*, 8(4), 204-225. <https://doi.org/10.1002/dys.224>
- Tallal, P. (1973). Defects of Non-Verbal Auditory Perception in Children with Developmental Aphasia. *Nature*, 241, 468-469. <https://doi.org/10.1038/241468a0>
- Tanaka, S., Igarashi, A., De Moor, R., Li, N., Hirozane, M., Hong, L. W., Wu, D. B.-C., Yu, D. Y., Hashim, M., Hutton, B., Tantakoun, K., Olsen, C., Mirzayeh Fashami, F., Samjoo, I. A., & Cameron, C. (2024). A Targeted Review of Worldwide Indirect Treatment Comparison Guidelines and Best Practices. *Value in Health*, 27(9), 1179-1190.
<https://doi.org/10.1016/j.jval.2024.05.015>
- Tate, M. C., Herbet, G., Moritz-Gasser, S., Tate, J. E., & Duffau, H. (2014). Probabilistic map of critical functional regions of the human cerebral cortex : Broca's area revisited. *Brain*, 137(10), 2773-2782. <https://doi.org/10.1093/brain/awu168>
- Tene Koyazo, J., Vasilyeva, D., Lay-Ekuakille, A., & Grimaldi, M. (2025). A suite of metrics in overall dyslexia assessment : Drift entropy impact. *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 1-16. <https://doi.org/10.1080/10255842.2025.2457596>
- Thibault, C. (2017). *Orthophonie et oralité* (2e édition). Elsevier Masson.
- Thibault, C., & Maisonneuve, C. (s. d.). *LA LANGUE La vie privée d'un organe très discret*.
- Thomas A, & de AJURIAGUERRA J. (1949). *Étude sémiologique du tonus musculaire*. (Flammarion).

- Thompson, E. (2010). *Mind in life : Biology, phenomenology, and the sciences of mind* (First Harvard University Press paperback edition). The Belknap Press of Harvard University Press.
- Thompson, K., Gibbings, A., Shaw, J., Ray, L., Hébert, G., De Koninck, J., & Fogel, S. (2021). Sleep and Second-Language Acquisition Revisited : The Role of Sleep Spindles and Rapid Eye Movements. *Nature and Science of Sleep, Volume 13*, 1887-1902.
<https://doi.org/10.2147/NSS.S326151>
- Toffalini, E., Giofrè, D., Pastore, M., Carretti, B., Fraccadori, F., & Szűcs, D. (2021). Dyslexia treatment studies : A systematic review and suggestions on testing treatment efficacy with small effects and small samples. *Behavior Research Methods*, 53(5), 1954-1972.
<https://doi.org/10.3758/s13428-021-01549-x>
- Torgesen JK, Morgan ST, & Davis C. (1992). Effect of two types of phonological awareness training on word learning in kindergarten children. *Journal of Educational Psychology*, 8, 51_52.
- Torres, A. R., Mota, N. B., Adamy, N., Naschold, A., Lima, T. Z., Copelli, M., Weissheimer, J., Pegado, F., & Ribeiro, S. (2021). Selective Inhibition of Mirror Invariance for Letters Consolidated by Sleep Doubles Reading Fluency. *Current Biology*, 31(4), 742-752.e8.
<https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.11.031>
- van de Walle de Ghelcke, A., Skoura, X., Edwards, M. G., Quercia, P., & Papaxanthis, C. (2021). Action representation deficits in adolescents with developmental dyslexia. *Journal of Neuropsychology*, 15(2), 215-234. <https://doi.org/10.1111/jnp.12220>
- van Laarhoven, T., Keetels, M., Schakel, L., & Vroomen, J. (2018). Audio-visual speech in noise perception in dyslexia. *Developmental Science*, 21(1). <https://doi.org/10.1111/desc.12504>
- Vellutino, F. R. (1979). *Dyslexia : Theory and Research*. Cambridge, MA: MIT Press.
- Vellutino, F. R. (1987). Dyslexia. *Scientific American*, 256(3), 34-41.
<http://www.jstor.org/stable/24979338>

- Versace, R., Brouillet, D., & Vallet, G. (2018). *Cognition incarnée : Une cognition située et projetée*. Mardaga supérieur.
- Viana, A. R., Razuk, M., Freitas, P. B. de, & Barela, J. A. (2013). Sensorimotor Integration in Dyslexic Children under Different Sensory Stimulations. *PLOS ONE*, 8(8), e72719. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0072719>
- Vieira, S., Quercia, P., Michel, C., Pozzo, T., & Bonnetblanc, F. (2009). Cognitive demands impair postural control in developmental dyslexia : A negative effect that can be compensated. *Neuroscience Letters*, 462(2), 125-129. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2009.06.093>
- Virlet, L., Messadi, N., Sparrow, L., & Bonnet, C. (2019). Labilité référentielle d'origine centrale et trouble spécifique du langage et des apprentissages. (Prévalence, coefficient de corrélation). *Neurophysiologie Clinique*, 49(6), 419. <https://doi.org/10.1016/j.neucli.2019.10.036>
- Vittek, A.-L., Juan, C., Nowak, L. G., Girard, P., & Cappe, C. (2022). Multisensory integration in neurons of the medial pulvinar of macaque monkey. *Cerebral Cortex*, bhac337. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhac337>
- Viviani, P., Baud-Bovy, G., & Redolfi, M. (1997). Perceiving and tracking kinesthetic stimuli : Further evidence of motor–perceptual interactions. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 23(4), 1232-1252. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.23.4.1232>
- Von Holst, E. (1954). Relations between the central Nervous System and the peripheral organs. *The British Journal of Animal Behaviour*, 2(3), 89-94. [https://doi.org/10.1016/S0950-5601\(54\)80044-X](https://doi.org/10.1016/S0950-5601(54)80044-X)
- Wagner, R. F. (1973). Rudolf berlin : Originator of the term dyslexia. *Bulletin of the Orton Society*, 23(1), 57-63. <https://doi.org/10.1007/BF02653841>

- Wallace, M. T., Carriere, B. N., Perrault, T. J., Vaughan, J. W., & Stein, B. E. (2006). The Development of Cortical Multisensory Integration. *Journal of Neuroscience*, 26(46), 11844-11849. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.3295-06.2006>
- Wallace, M. T., Meredith, M. A., & Stein, B. E. (1998). Multisensory Integration in the Superior Colliculus of the Alert Cat. *Journal of Neurophysiology*, 80(2), 1006-1010. <https://doi.org/10.1152/jn.1998.80.2.1006>
- Wallace, M. T., & Stevenson, R. A. (2014). The construct of the multisensory temporal binding window and its dysregulation in developmental disabilities. *Neuropsychologia*, 64, 105-123. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2014.08.005>
- Whitall, J., & Clark, J. E. (2018). A Perception–Action Approach to Understanding Typical and Atypical Motor Development. In *Advances in Child Development and Behavior* (Vol. 55, p. 245-272). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.acdb.2018.04.004>
- WHO. (2024). *Internationale Classification of Diseases 11th Revision* (Version ICD-11). <https://icd.who.int/en>
- Wilmot, A., Hasking, P., Leitão, S., Hill, E., & Boyes, M. (2023). Understanding Mental Health in Developmental Dyslexia : A Scoping Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2), Article 2. <https://doi.org/10.3390/ijerph20021653>
- Xiao, N., Wu, G., Zhou, Z., Yao, J., Wu, B., Sui, J., & Tin, C. (2023). Positive feedback of efferent copy via pontine nucleus facilitates cerebellum-mediated associative learning. *Cell Reports*, 42(2), 112072. <https://doi.org/10.1016/j.celrep.2023.112072>
- Xie, L., Kang, H., Xu, Q., Chen, M. J., Liao, Y., Thiyagarajan, M., O'Donnell, J., Christensen, D. J., Nicholson, C., Iliff, J. J., Takano, T., Deane, R., & Nedergaard, M. (2013). Sleep Drives Metabolite Clearance from the Adult Brain. *Science*, 342(6156), 373-377. <https://doi.org/10.1126/science.1241224>

- Yang, Y., Yang, C., Guo, C., & Mu, L. (2025). The impact of total sleep deprivation on attentional networks and its neural mechanisms : Based on the Attention Network Test. *Behavioural Brain Research*, 484, 115513. <https://doi.org/10.1016/j.bbr.2025.115513>
- Zhao, Z., Ahissar, E., Victor, J. D., & Rucci, M. (2023). Inferring visual space from ultra-fine extra-retinal knowledge of gaze position. *Nature Communications*, 14(1), Article 1. <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35834-4>
- Zhou, Y., Lai, C. S. W., Bai, Y., Li, W., Zhao, R., Yang, G., Frank, M. G., & Gan, W.-B. (2020). REM sleep promotes experience-dependent dendritic spine elimination in the mouse cortex. *Nature Communications*, 11(1), 4819. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18592-5>

ANNEXES

Annexe 1 : Virlet et al., 2024



Contents lists available at ScienceDirect

Research in Developmental Disabilities

journal homepage: www.elsevier.com/locate/redevdis

Proprioceptive intervention improves reading performance in developmental dyslexia: An eye-tracking study

Luc Virlet^{a,b}, Laurent Sparrow^a, Jose Barela^c, Patrick Berquin^d, Cedrick Bonnet^{a,*}

^a Univ. Lille, CNRS, UMR 9193 - SCALab - Sciences Cognitives et Sciences Affectives, F-59000 Lille, France

^b Univ. Lille, Département de médecine générale, Faculté de médecine, F-59000 Lille, France

^c Institute of Biosciences, São Paulo State University, Rio Claro, Brazil

^d Service de Neurologie Pédiatrique, GRAFMC INSERM U 1105 CHU Amiens, France

ARTICLE INFO

Keywords:

Developmental Dyslexia
Eye movement
Proprioception
Proprioceptive dysfunction
Reading
Back to normal
Multisensory integration

ABSTRACT

Developmental dyslexia is characterized by difficulties in learning to read, affecting cognition and causing failure at school. Interventions for children with developmental dyslexia have focused on improving linguistic capabilities (phonics, orthographic and morphological instructions), but developmental dyslexia is accompanied by a wide variety of sensorimotor impairments. The goal of this study was to examine the effects of a proprioceptive intervention on reading performance and eye movement in children with developmental dyslexia. Nineteen children diagnosed with developmental dyslexia were randomly assigned to a regular Speech Therapy (ST) or to a Proprioceptive and Speech Intervention (PSI), in which they received both the usual speech therapy and a proprioceptive intervention aimed to correct their sensorimotor impairments (prism glasses, oral neurostimulation, insoles and breathing instructions). Silent reading performance and eye movements were measured pre- and post-intervention (after nine months). In the PSI group, reading performance improved and eye movements were smoother and faster, reaching values similar to those of children with typical reading performance. The recognition of written words also improved, indicating better lexical access. These results show that PSI might constitute a valuable tool for reading improvement children with developmental dyslexia.

What does this paper add?

We confirm that proprioception plays a crucial role in learning to read. For the first time, eye movements were used to validate the improvement in the reading capabilities of children with developmental dyslexia. The proprioceptive intervention improved fluency in silent and aloud reading (smoother and faster reading) and eye fixation stability (fewer saccades and fixations). It improved both oculomotor movement and the cognitive procedure (i.e., lexical access).

* Corresponding author.

E-mail address: cedrick.bonnet@univ-lille.fr (C. Bonnet).

<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2024.104813>

Received 18 October 2023; Received in revised form 5 March 2024; Accepted 24 July 2024
0891-4222/© 2024 Published by Elsevier Ltd.

1. Introduction

Developmental Dyslexia (DD) is characterized by difficulties in learning to read, impacting both comprehension and expression across languages and writing systems (Richlan, 2020). DD manifests as severe and persistent difficulties in reading despite adequate cognitive capacity and instructional or environmental opportunities (Snowling, Hulme & Nation, 2020). The major problem with dyslexia involves difficulties with phonological processing, that is, being able to segment words into their component sounds, and associate letters with their sounds and phonological awareness (i.e., the ability to segment speech into small parts, such as syllables, and the smallest units of sound, phonemes). DDs have difficulties with tasks such as discriminating the individual sounds in words (i.e., what does 'pink' without the 'p' say?), recognizing words that rhyme or recognizing whether 'cat' and 'kite' start with the same sound. But children with dyslexia often have writing difficulties as reading is theorized to be a central component of writing in some cognitive models of writing development. Dyslexia can manifest in many ways in writing, such as poor spelling, poor legibility, lack of diverse vocabulary, poor idea development, and/or lack of organization. (Richlan, 2020; Snowling, Hulme & Nation, 2020). The impact of reading difficulties is critical, affecting several cognitive capabilities and leading to failure in school attainment and negative self-image as a learner (Wilmot et al., 2023).

Reading is a complex task involving several eye movement patterns. Dyslexic readers' patterns resemble those of novel readers, with longer and more numerous fixations, shorter saccades and more frequent retro-saccades (Bonifacci et al., 2023). Children with developmental dyslexia also exhibit a stronger frequency effect than healthy children in reading (Rayner, 1998). These impaired ocular fixations may lead to reading difficulties (Kimmel et al., 2022) as children with developmental dyslexia may not gaze in the optimal position and need to fixate specific parts of the text again (Aghababian & Nazir, 2000). This impairment may prevent fluid, low-cost word identification and require a greater cognitive effort in recognizing words. Eye movement recording is therefore useful in examining and understanding reading deficits in dyslexic children and designing potential interventions at the ocular level.

Classical interventions in children with developmental dyslexia have focused on improving reading capabilities (phonics, orthographic and morphological instructions, (Toffalini et al., 2021), essentially without considering other impairments. However, these children not only present poor reading capabilities: they often perform poorly in sensory-motor tasks (Nicolson et al., 1999), postural control (Barela et al., 2011; Viana et al., 2013; Razuk & Barela, 2014), processing visuomotor differences (de Freitas et al., 2014) with impaired sensory and motor coupling (Barela et al., 2011; Viana et al., 2013) and impaired motor prediction (van de Walle de Ghelcke et al., 2021). Proprioceptive dysfunction has also been observed (Da Cunha & Da Silva, 1986; Laprevotte et al., 2021; Quercia et al., 2007) in association with multi-sensory integration disorder of spatial (Roll et al., 1991; Quercia et al., 2015) and perceptive (Quercia et al., 2020) order. When proprioception is impaired, as in DD, muscle tone is usually asymmetrical and posture gradually deteriorates (Barela et al., 2011; Viana et al., 2013; Razuk & Barela, 2014). This leads to muscular tension, particularly in the eyeballs, resulting in a lack of convergence or instability of visual perception (Quercia et al., 2020). Finally, lexical access processes (Rayner, 1998), which are put in place following the acquisition of visual information, are more likely to fail if the visual percept is degraded or unstable. It explains why accuracy, fluency, decoding, recognition and even comprehension are all affected. Interventions in children with developmental dyslexia should therefore focus not only on reading impairments but also on these other aspects.

In recent years in France, researchers and clinicians have suggested performing a global intervention called the proprioceptive intervention (Quercia et al., 2007; Quercia and Marino, 2017), which aims to correct spatial multisensory integration disorders (i.e., mainly trigeminal stimulation and work on diaphragmatic breathing, (Quercia et al., 2015) instead of focusing on writing and reading problems. This intervention was examined by a recent INSERM report which concluded that it was safe and should be tested further (Gueguen et al., 2016). To the best of our knowledge, no published study explained reading quality in terms of eye movements and proprioceptive disorders. Some studies looked at eye movements in children with developmental dyslexia (Handler et al., 2011; Committee on Children With Disabilities American Academy of Pediatrics, 1998), but not, to our knowledge, with a proprioceptive approach. A few other studies have looked at visual interventions without convincing results children with developmental dyslexia, but without a proprioceptive approach (Handler et al., 2011; Committee on Children With Disabilities American Academy of Pediatrics, 1998). For this reason, we conducted this experiment to test the effectiveness of proprioceptive intervention as a complement to speech therapy. We recorded eye movements to measure silent reading speed before and after the interventions. Knowing that children with developmental dyslexia have difficulty reading aloud, we preferred to ask them not to speak, and so eye movements was required to track their reading.

The goal of this study was thus to examine the effects of the proprioceptive intervention on both reading performance and eye movements in children with developmental dyslexia.

Our main hypothesis was that it should improve reading performance, which should be related to improvement in eye movements.

2. Methods

2.1. Participants

All the children in this study were French native speakers. Children with a diagnosis of developmental dyslexia (American Psychiatric Association, 2013) were invited to participate in the study by speech and language therapists. In France, the diagnosis of developmental dyslexia is made by a speech therapist and requires the presence of pathological reading delay (determined by standardized tests e.g., Alouette-R Test (Lefavrais, 2005), Timé 3 (Ecalé, 2004) that has resisted speech therapy intervention for more than a year, with no hearing or visual disorders (i.e., normal otorhinolaryngological and ophthalmological tests), normal intelligence (IQ > 70) and no psychiatric or neurological disorders. Each DD child was given a standard follow-up assessment test by the speech

therapist (the Alouette-R test (Lefavrais, 2005), which is the French gold standard for reading text, see definition in the next session). During the inclusion, the DDs were seen by a doctor trained in neurodevelopmental disorders who checked the inclusion criteria for children with developmental dyslexia aged 9 to 14, confirmation of pathological reading of more than 2 DS, having received speech therapy for more than two years, with normal vision or normal corrected vision with a correction of less than ± 1.5 diopters, and the absence of comorbidity for pathological language disorders (i.e., Dysphasia), attention disorders (i.e., TDHA), coordination disorders (i.e., DCD), and psychiatric or neurological disorders. Three of the 19 children included had no intelligence test, but the inclusion medical examination and their ability to follow a normal schooling despite their pathological reading delay made it possible to exclude any intellectual delay. We chose more stringent inclusion criteria than the DSM-V criteria (APA, 2013), to ensure that these were children with developmental dyslexia. A flowchart of sample definition and allocation is depicted in Fig. 1. Thirty-three children diagnosed with developmental dyslexia were considered to participate in this study. After the initial screening, 27 children with developmental dyslexia were randomly assigned to one of two groups: the Speech Therapy (ST) group and the Proprioceptive and Speech Intervention (PSI) group. However, only 19 children performed the whole procedure and were considered as the final sample (Fig. 1).

To compare the evolution of silent reading over the nine months, we compared the eyes movements of typical children of the same chronological age with our children with developmental dyslexia, (i.e., ST and PSI groups). We did not have permission from the ethics committee to measure their IQs, were also included in the study. Physical characteristics and other information about both dyslexic groups and the control group are depicted in Table 1.

The experimental procedure was performed in accordance with the Declaration of Helsinki and approved by the Ethical Committee (Ethics and Personal Protection Committee Northwest IV-French. Registered on www.clinicaltrials.gov: NCT03448237). The participants and their parents provided written informed consent prior to the experiment and received a full debriefing at the end of the study.

2.2. Tests used

The Alouette-R test (Lefavrais, 2005) was performed by the children's speech therapists as an initial test of inclusion. Children had to read aloud a 265-word text as rapidly as possible, with a three-minute time limit. The text consisted of real words displayed in meaningless but grammatically and syntactically correct sentences. The test yields a measure of speed and is standardized for children aged 9 to 14. It provides a standardized score expressed in terms of reading age. As an inclusion criterion, children had to be two standard deviations below the mean of the normal population.

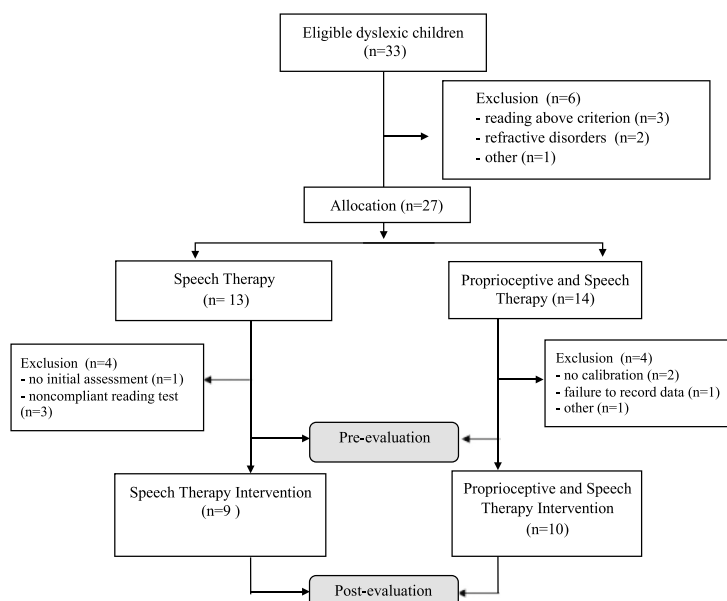


Fig. 1. Study flowchart.

Table 1

Age, reading level (in standard deviation), gender and intellectual quotient for Speech Therapy group (ST), Proprioceptive and Speech intervention group (PSI) and Control group.

	Speech therapy group	Proprioceptive and speech intervention group	Control group
Age (months)	136.3±14.2	143.7±14.7	129.6±10.75
Male (%)	6(66%)	7(70%)	5(55%)
Female (%)	3(33%)	3(30%)	4(45%)
Intellectual Quotient	100.28 ± 9.41	98.87 ± 12.6	na

2.3. Procedures

After fulfilling all requirements, children were invited to a first visit to the doctor's office. After their parents signed the informed consent form, they were invited to sit in a dimly illuminated room with a 19-inch flat-screen CRT SVGA monitor (screen resolution of 1024 × 768 pixels, refresh rate of 60 Hz) and an eye-tracker (EyeLink 1000 – SR Research) placed on a table in front of them. They were instructed to rest their head on a chinrest and written instructions were displayed on the monitor.

To familiarize the children with the experimental device and procedures, a training session was performed with a short text followed by a series of questions, both created using E-PRIME 2.0 (Richard & Charbonneau, 2009; Schneider et al., 2012). They were instructed to read at a normal pace, paying attention to the meaning of the text. After this familiarization phase, a fixation cross appeared in the upper left corner and participants were instructed to fixate it. When their eye position was aligned with the cross, the latter disappeared and a short story in French was displayed at the location of the cross. When the participants had finished reading the text, they had to fixate another cross at the bottom right corner of the screen. When their eye position reached it, the text disappeared and the trial was finished.

The short story in French contained 134 words. After reading the experimental text, the children had to answer five questions to check whether they had understood the content of the text. Each question came with four possible answers, with only one accurate answer.

Following this initial assessment, the children with developmental dyslexia in the ST and PSI groups received speech therapy according to their needs, following the Recommendations for Good Practice (Collège Français d'Orthophonie, 2022) provided by their speech therapists. This therapy consisted of a minimum of 25 sessions (half an hour each) over the following nine months, i.e., one session per week, considering holidays, in accordance with French practice. Speech therapists treat dyslexic children by trying to increase their ability to segment words into sounds, in other words, to increase their phonological awareness. To achieve this, they have a range of standardized exercises at their disposal. Examples of exercises commonly used by French-speaking speech therapists can be found in Pommée et al. (2022). Children in the PSI group received the usual speech and language therapy and also received a proprioceptive intervention, which aimed to correct spatial multisensory integration disorders (Quercia et al., 2015; Quercia & Marino, 2012). It combined the use of somatosensory lures acting through the trigeminal nerve (Chen et al., 2022) by active prisms (Quercia et al., 2015) oral neurostimulation (Alfredo et al., 1999); of somatosensory lures acting through the proprioceptive chains by tactile stimulation with proprioceptive insoles (Loureau et al., 2023); and breathing instructions (Bahammam et al., 1999). The proprioceptive intervention procedure for active prisms is well described in details in "The distinctive vertical heterophoria of dyslexics". (Quercia et al., 2015, p 1787–1789). After this initial prescription, the correction of spatial multisensory integration disorders by proprioceptive intervention was checked at two-, four-, and six-months post-intervention. Corrections were performed in three children, two by adapting the prisms and one by adapting the oral neurosensory stimulation. After the nine-month period, children in both groups took the Alouette-R test again, administered by their speech therapist. They also performed the reading test with eye-tracking measurements. The procedure was exactly the same as in the initial testing. To guarantee ethical compliance, the proprioceptive intervention was made available to the children of the ST group at the end of the study.

2.4. Dependent variables

After data collection, the Alouette-R test results were used to examine children's reading performance. The number of words correctly read during the three-minute period was computed and the standardized values of the Alouette-R test were used according to the children's age. Results were calculated in terms of standard deviation of reading performance (Lefavrais, 2005) and gain in performance, i.e., the difference between pre-test and post-test.

Eye movement patterns were examined using the first-fixation duration (FFD), gaze duration (GD) and saccade amplitude (SA) variables. The FFD corresponds to the duration of initial fixation of a word when approached from the left (i.e., the word has not already been skipped), representing an index of low-level visual stage underlying reading unaffected by word recognition (Pollatsek, Reichle & Rayner, 2006). GD represents the sum of all consecutive first-pass fixations made on a word prior to one eye movement to another word (i.e., lexical access, which corresponds to word recognition time). Finally, SA was calculated as the distance traveled by the eye between two fixations in the text. These three variables were calculated and obtained with the Dataviewer® eye-tracking software (SR-Research). Saccades and fixations were defined in terms of motion, acceleration, and velocity thresholds, using the default criteria implemented in the EyeLink software (a velocity threshold of 30°/sec and an acceleration threshold of 8000°/sec² were used).

2.5. Statistical analysis

As there were no previous studies on the evaluation of proprioceptive interventions in silent reading, we used data from oral reading to assess sample size as a function of a priori power. For the quality of reading in the Alouette-R test (Lefavrais, 2005), we chose to use the C index (number of words correctly read) as it presented the variable that was most affected by the level of reading. For a first-species risk of 0.05 and a power of 0.90, the number of participants per group was 12 (calculated using epiR package 0.9–30, Stevenson et al., 2017). We chose to exclude some participants with invalid eye tracking and Alouette-R Test data, so that of the 24 initially planned, only 19 were counted (Fig. 1. Study flowchart). As our statistical analyses provided significant findings, we had no reason to run the requested number of participants as suggested in the statistical power analysis.

The normality of the samples (Shapiro-Wilk test) and the homogeneity of variance (Levene's test) were checked for eye movement dependent variables in the three groups (PSI, ST and controls). Furthermore, t-tests were used to examine performance when reading aloud.

For eye-tracking data, a 3 (group: STI, ST, C) X 2 (time of testing: pre-test, post-test) analysis of variance (ANOVA) was carried out on the dependent variables (first fixation duration, gaze duration and saccade amplitude).

3. Results

3.1. Reading performance

In terms of gain in performance, we found a difference in the post-test results. Children in the ST group had a significantly lower gain in performance (-0.93) than those in the PSI group ($+1.16$), $t(17) = -2.23$, $p = 0.042$, Cohen's $d = 0.99$ (Table 2). This shows that children who received the proprioceptive intervention improved their reading level as measured by the Alouette-R test, while children who did not receive it stagnated.

3.2. Eye movement

The initial eye movement examination showed a significant change in eye movement patterns in children in the PSI group but not in children in the ST group. Fig. 2 depicts this pattern during reading in a child in the PSI group before and after the intervention. A qualitative analysis of this participant clearly showed that his/her eye movements improved after the proprioceptive intervention. In fact, he/she showed much shorter gaze durations and greater saccade amplitude, resulting in much smoother and fluent reading. Fig. 3.

3.2.1. First fixation duration

At pre-test, FFD was similar between dyslexic readers in the ST group (322 ms) and those assigned to in the PSI group (326 ms), $F(1,25) = 0.01$, $p = 0.9$, and both groups showed significantly longer FFD than readers in the control group (235 ms), $F(1,25) = 10.16$, $p = 0.004$. At post-test, FFD did not differ between the two dyslexic groups (ST=289 ms and PSI=274 ms), $F(1,25) = 0.3$, $p = 0.58$, although dyslexic children in both groups exhibited shorter FFD than at pre-test. Finally, neither dyslexic group differed from the normal readers, $F(1,25) = 3.38$, $p = 0.08$.

3.2.2. Gaze duration

Fig. 4 depicts overall GD results in dyslexic children in both groups (ST and PSI) at pre- and post-test and GD in normal readers. At pre-test, GD was similar between dyslexic readers in the ST (556 ms) and in the PSI groups (539 ms), $F(1,25) = 0.07$, $p = 0.7$, and both groups showed significantly longer GD than the normal readers (319 ms), $F(1,25) = 18.30$, $p = 0.0002$. At post-test, GD was shorter in the PSI group (376 ms) than in the ST group (467 ms), $F(1,25) = 4.94$, $p = 0.03$. In addition, children in the ST group still showed longer GD than normal readers, $F(1,25) = 13.34$, $p = 0.002$, whereas children in the PSI group showed a GD similar to that of the normal readers ($F(1,25) = 1.91$, $p = 0.18$).

3.2.3. Saccade amplitude

Fig. 5 depicts SA in both groups of children with developmental dyslexia (ST and PSI) at pre- and post-test and in normal readers. At pre-test, saccade amplitude was similar between dyslexic readers in the ST (2.87°) and PSI groups (2.93°), $F(1,25) = 0.11$, $p = 0.74$, and it was significantly lower in both groups than in the normal readers (3.34° , $F(1,25) = 18.30$, $p = 0.001$). At post-test, SA was greater in the PSI group (3.42°) than in the ST group (2.94° , $F(1,25) = 4.94$, $p = 0.05$). While children in the ST group still showed lower saccade amplitude than the control group ($F(1,25) = 5.11$, $p = 0.03$), children in the PSI group showed a similar GD to that

Table 2

Mean and standard deviation of reading performance (C-index Alouette-R test standard deviation) and gain in performance in the Speech Therapy group and in the Proprioceptive and Speech Intervention group at pre- and post-test.

	Speech therapy group	Proprioceptive and speech intervention group	p	Cohen's d
Pre-test	-2.830.65	-2.992.22	0834	0098
Post-test	-3.76 1.87	-1.83 1.92	0050	0967
Gain of performance	-0.93.56	+ 1.16 ±2.47	0044	0999

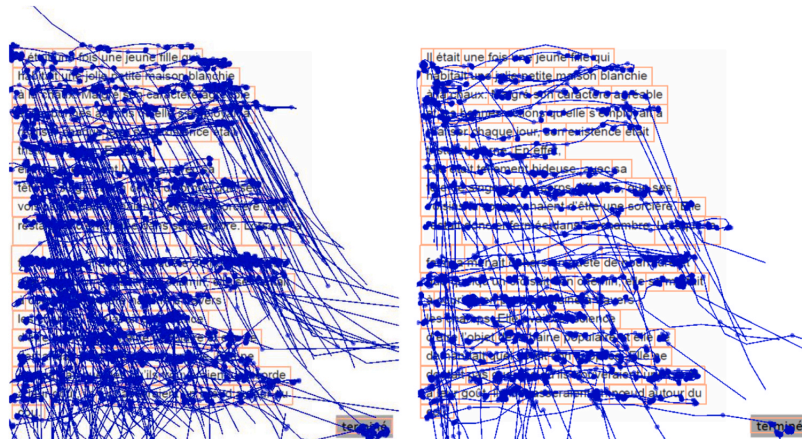


Fig. 2. Eye movement pattern of a child in proprioceptive and speech intervention group during reading before (left panel) and after (right panel) intervention.

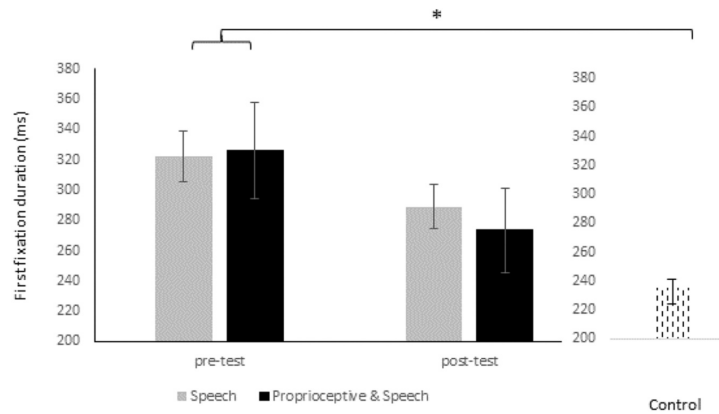


Fig. 3. Mean and standard error for first fixation in dyslexic children in both Speech Therapy and Proprioceptive and Speech Intervention groups at pre- and post-test evaluations. Mean and standard error for first fixation in control group (right).

observed in the normal readers ($F(1,25) = 0.01$, $p = 0.90$).

3.3. Answers to questions

The rate of correct responses to the five questions after reading remained statistically unchanged for the ST (57 % to 47 %, $t(7) = 0.9$, $p = 0.38$) and PSI groups (53 % to 41 %, $t(8) = 0.88$, $p = 0.39$), both pre- and post-intervention. These results were inferior to those of normal readers, who obtained a much higher rate of correct answers (91 %, all $p = 0.005$, for all comparisons of children with developmental dyslexia and controls at pre- and post-test).

3.4. Undesirable events

We did not identify any adverse events, nor did we note any abandonment on the part of the children.

4. Discussion

The goal of this study was to test the effects of a proprioceptive intervention on reading performance and eye movements in

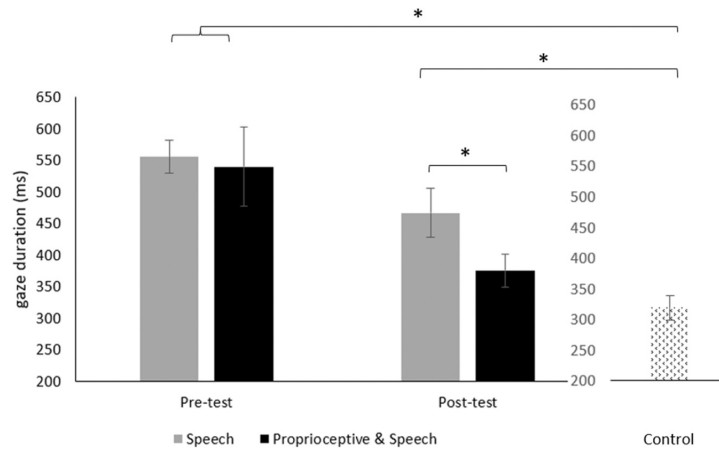


Fig. 4. Mean and standard error for gaze duration in dyslexic children in both Speech Therapy and Proprioceptive and Speech Intervention groups at pre- and post-test evaluations. Mean and standard error for gaze duration in control group (right).

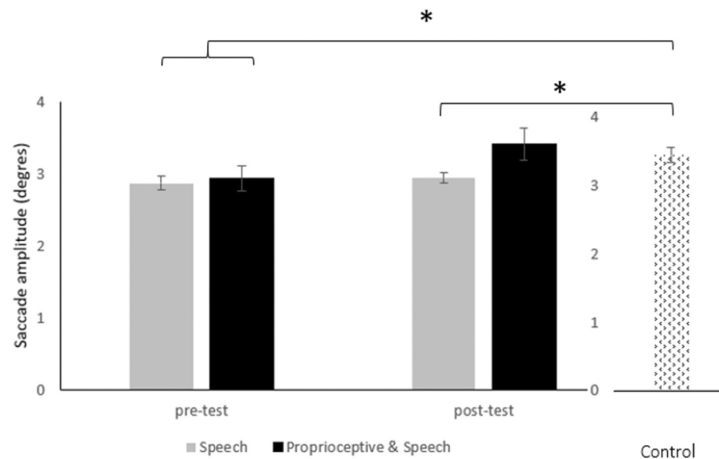


Fig. 5. Mean and standard error for saccade amplitude in dyslexic children in both Speech Therapy and Proprioceptive and Speech Intervention groups at pre- and post-test evaluations. Mean and standard deviation for saccade amplitude in control group (right).

children with developmental dyslexia. Our results validated our initial hypothesis as they showed improved reading performance and eye movements in children with developmental dyslexia who participated in the proprioceptive intervention. These results and their implications are discussed below.

The main finding of this study is that children with developmental dyslexia can improve their reading capabilities thanks to a proprioceptive intervention. It is the first time that the effect of such an intervention on silent reading performance is proven. This certainly constitutes a new and important milestone in the management of children with developmental dyslexia. DD is primarily related to reading and writing issues but, as many researchers have previously suggested, DD it may also encompass broader difficulties (Snowling et al., 2020). Our results show that the latter might be reduced by a specific proprioceptive intervention.

Such an intervention is a global process, aiming to correct spatial multisensory integration disorders (Quercia et al., 2007; Quercia and Marino, 2017). Our findings confirm the effectiveness of a proprioceptive intervention on reading skills in developmental dyslexia (Quercia et al., 2007; Quercia et al., 2012, 2015; Sampaio et al., 2009), attentional problems (Quercia et al., 2011) and automaticity (i. e., double task) (Vieira et al., 2009). For the first time in children with developmental dyslexia, they show that the action of trigeminal stimulation on proprioception (Chen et al., 2022) improves saccades, motor prediction (van de Walle de Ghelcke et al., 2021), visual cognitive functions (i.e., lexical access) and therefore, the quality of the determination of retinal input (Roll et al., 1991; Zhao et al.,

2023). Reading ability is known to be subsumed complex fine eye movement patterns (Franzen et al., 2021). Our results clearly show an improvement in eye movement patterns during reading in the children who were involved in the proprioceptive intervention (cf. Fig. 2). Before the intervention, eye movements were disorganized (Fig. 2, left panel), while after the intervention, gaze was much clearer and less erratic (Fig. 2, right panel). To our knowledge, our study is the first to show such an improvement in eye movement patterns after a proprioceptive intervention.

After the proprioceptive intervention, the children with developmental dyslexia had reduced gaze duration and greater saccade amplitude than their peers who did not participate in the intervention. The children in the PSI group showed similar results to those in the control group (Fig. 1, Table B). Saccade amplitude is generally indexed to the difficulty of reading: it decreases when the text is difficult and increases when the text is easy (Rayner, 1998). We can therefore suggest that our data (decrease in GD and increase in saccade amplitude) are consistent with an improvement in reading in the PSI group only. These results are also in line with recent results showing that reading improvement due to color manipulation in children with developmental dyslexia is associated with eye movement improvements (Razuk et al., 2018). Interestingly, a proprioceptive intervention does not change eye movement patterns directly, it changes them indirectly by means of a general change at the multisensory level (Quercia et al., 2015). As a result, children with developmental dyslexia can read faster and more fluently.

We propose a proprioceptive model of dyslexia which focuses on the mechanisms of sensory integration and automatic reading. The presence of a perceptual and spatial multisensory integration disorder (Quercia et al., 2020; Quercia et al., 2015) associated with proprioceptive dysfunction would disrupt the processes involved in the creation of the auditory and visual percepts necessary for the recognition of sounds, letters, words and phonological awareness, and would disrupt the processes involved in automatic (Vieira et al., 2009) reading at three levels. It would disrupt it at the level of prediction (i.e., visual saccades), at the level of cerebellar control (i.e., the comparison between the copy of efferences (Munuera & Duhamel, 2020) and the proprioceptive feedback) and at the level of consolidation (i.e., during the transfer from short-term procedural memory to long-term procedural memory during REM sleep (Torres et al., 2021; Hedenius et al., 2021).

However, some limitations in our study should be mentioned. The first limitation is that we were unable to assess the IQ of normo-readers children. The second limitation is that we started from a sample of 27 children recruited by speech and language therapists to reach the target population of 24 children (sample size calculated according to power), but only 19 followed the full procedure, which explains this smaller sample (see Fig. 1). The third limitation is that the evaluation of the proprioceptive intervention was global, and that we did not evaluate sub-interventions such as sleep (Gorgoni et al., 2020; Guillemineault & Pelayo, 1998; Torres et al., 2021). We plan to do so in a future study.

DD is characterized by resistance to intervention, as confirmed by our results for oral and silent reading, which stagnated for the ST group. Our results confirmed the efficacy of the addition a proprioceptive intervention on reading abilities in children with developmental dyslexia by analyzing eye movements (Quercia et al., 2007; Quercia et al., 2015; Sampaio et al., 2009; Quercia and Marino, 2012). Such interventions should thus be implemented to improve children with developmental dyslexia by conducting, in line with previous findings, a long-term proprioceptive intervention with a control group, which is now needed to confirm the present findings.

Role of the funding source

This work was supported by the Visual Sciences and Cultures Research Federation (FR CNRS 2052 SCV) and by a financial help from the French Research National Agency from the Future Investment Program (reference: ANR-21-ESRE-0030 – Equipex+ Continuum). The purchase of the glasses and insoles needed for this work was financed by donations from the “Collectif PEPS association”, which has now been dissolved.

CRedit authorship contribution statement

Jose Barela: Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Validation. **Laurent Sparrow:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Validation, Supervision, Conceptualization, Formal analysis, Funding acquisition, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Software. **Luc Virlet:** Conceptualization, Data curation, Formal analysis, Investigation, Methodology, Project administration, Resources, Software, Supervision, Validation, Visualization, Writing – original draft, Writing – review & editing. **Patrick Berquin:** Writing – review & editing. **Cedrick T Bonnet:** Writing – review & editing, Writing – original draft, Visualization, Validation, Supervision, Project administration, Methodology.

Data Availability

Data will be made available on request.

Acknowledgements

Many thanks to Anne Deprey, Delphine Douce Florence Durieu, and Dorothée Pollart, speech and language therapists, for their time and involvement in setting up this study. Thank you to the 22 speech therapists for their participation in this work and thank you to the families and dyslexic children for agreeing to take part in this study in the knowledge that there was randomization.

Data

The protocol and data are available upon request to the corresponding author.

Disclosure

The authors report no conflicts of interest in this work.

References

- Aghababian, V., & Nazir, T. A. (2000). Developing normal reading skills: Aspects of the visual processes underlying word recognition. *Journal of Experimental Child Psychology*, 76(2), 123–150. <https://doi.org/10.1006/jecp.1999.2540>
- Alfredo, Marino, Philippe, Villeneuve, & Pierre-Marie, Gagey (1999). Postural stomatognathic reflexes. *Posture and gait*, 9(Supl 1).
- American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorder Fifth* (DSM-5-TR 5e edition).
- Bahammam, A. S., Tate, R., Manfreda, J., & Kryger, M. H. (1999). Upper airway resistance syndrome: effect of nasal dilation. *Sleeping Stage, and Sleeping Position*, 22(5), 592–598. <https://doi.org/10.1093/sleep/22.5.592>
- Barela, J. A., Dias, J. L., Godoi, D., Viana, A. R., & de Freitas, P. B. (2011). Postural control and automaticity in dyslexic children: The relationship between visual information and body sway. *Research in Developmental Disabilities*, 32(5), 1814–1821. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.03.011>
- Bonifacci, P., Tobia, V., Sansavini, A., & Guarini, A. (2023). Eye-movements in a text reading task: A comparison of preterm children, children with dyslexia and typical readers. Article 3. *Brain Sciences*, 13(3). <https://doi.org/10.3390/brainsci13030425>
- Chen, Y., Gong, X., Ibrahim, S. I. A., Liang, H., & Zhang, J. (2022). Convergent innervations of mesencephalic trigeminal and vestibular nuclei neurons onto oculomotor and pre-oculomotor neurons-Tract tracing and triple labeling in rats. *PLoS One*, 17(11), Article e0278205. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0278205>
- Collège Français d'Orthophonie. (2022). Recommendations for Good Practice in the Assessment, Prevention and Remediation of Written Language Disorders in Children and Adults. Method: Formalised Consensus Recommendations.Paris. https://www.college-francais-orthophonie.fr/wp-content/uploads/2022/03/RECOS_LE.pdf
- Committee on Children With Disabilities American Academy of Pediatrics, American Academy of Ophthalmology, & American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus. (1998). Learning Disabilities, Dyslexia, and Vision: A Subject Review. *Pediatrics*, 102(5), 1217–1219. <https://doi.org/10.1542/peds.102.5.1217>
- Da Cunha, H., & Da Silva, O. (1986). [Postural deficiency syndrome. Its importance in ophthalmology]. *J Fr Ophtalmol*, 9, 747–755 (Google Scholar).
- de Freitas, P. B., Pedão, S. T., & Barela, J. A. (2014). Visuomotor processing and hand force coordination in dyslexic children during a visually guided manipulation task. Article 10. *Research in Developmental Disabilities*, 35(10). <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.06.002>
- Ecalte, J. (2004). De l'évaluation en lecture: étude préliminaire à l'élaboration d'un nouveau test en identification de mots écrits. *Timé-3 Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, 79, 296–304. <https://www.anaerevue.com/app/download/7768778881/ANAE+N°+79++Octobre+2004++Volume+16+.pdf?t=1616417768>
- Franzen, L., Stark, Z., & Johnson, A. P. (2021). Individuals with dyslexia use a different visual sampling strategy to read text. Article 1. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-84945-9>
- Gorgoni, M., Scarpelli, S., Reda, F., & De Gennaro, L. (2020). Sleep EEG oscillations in neurodevelopmental disorders without intellectual disabilities. *Sleeping Medicine Reviews*, 49, Article 101224. <https://doi.org/10.1016/j.smrv.2019.101224>
- Gueguen, J., Hassler, C., & Falissard, B. (2016). Evaluation Délelött l'efficacité Déluân traitement proprioceptif Délelött Louisiana dyslexie. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.24523.69924>
- Guilleminault, C., & Pelayo, R. (1998). Sleep-disordered breathing in children. *Annals of Medicine*, 30(4), 350–356. <https://doi.org/10.3109/07853899809029934>
- Handler, S. M., Fierston, W. M., & the Section on Ophthalmology and Council on Children with Disabilities, American Academy of Ophthalmology, American Association for Pediatric Ophthalmology and Strabismus, and American Association of Certified Orthoptists. (2011). Learning disabilities, dyslexia, and vision. *Pediatrics*, 127(3), e818–e856. <https://doi.org/10.1542/peds.2010-3670>
- Hedenius, M., Lum, J. A. G., & Bølte, S. (2021). Alterations of procedural memory consolidation in children with developmental dyslexia. *Neuropsychology*, 35(2), 185–196. <https://doi.org/10.1037/neu0000708>, Epub 2020 Nov 19. PMID: 33211512.
- Kimel, E., Lieder, I., & Ahissar, M. (2022). Repeated series learning revisited with a novel prediction on the reduced effect of item frequency in dyslexia. Article 1. *Scientific Reports*, 12(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16805-z>
- Laprevotte, J., Papathanis, C., Saltarelli, S., Quercia, P., & Gaveau, J. (2021). Movement detection thresholds reveal proprioceptive impairments in developmental dyslexia. Article 1. *Scientific Reports*, 11(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79612-4>
- Lefavrais, P. (2005). *Alouette-R: test d'analyse de la vitesse en lecture à partir d'un texte*. Éditions du centre de psychologie appliquée.
- Loureau, S., Poulain, R., Cappe, C., & Janin, M. (2023). Les variations tactiles plantaires influencent-elles les Hétérophories Verticales. *Movement & Sport Sciences - Science & Motricité*. <https://doi.org/10.1051/sm/2023015>
- Munuera, J., & Duhamel, J. R. (2020). The role of the posterior parietal cortex in saccadic error processing. *Brain Struct Funct*, 225(2), 763–784. <https://doi.org/10.1007/s00429-020-02034-5>, Epub 2020 Feb 17. PMID: 32065255.
- Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., Berry, E. L., Jenkins, I. H., Dean, P., & Brooks, D. J. (1999). Association of abnormal cerebellar activation with motor learning difficulties in dyslexic adults. Article 9165. *The Lancet*, 353(9165). [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(98\)909165-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(98)909165-X)
- Pollatsek, A., Reichle, E. D., & Rayner, K. (2006). Tests of the E-Z Reader model: Exploring the interface between cognition and eye-movement control. Article 1. *Cognitive Psychology*, 52(1). <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2005.06.001>
- Pommée, T., Balaguer, M., Maclair, J., Pinquier, J., & Woisard, V. (2022). Assessment of adult speech disorders: current situation and needs in French-speaking clinical practice. *Logopedics Phoniatrics Vocology*, 47(2), 92–108. <https://doi.org/10.1080/14015439.2020.1870245>
- Quercia, P., Demougeot, L., Dos Santos, M., & Bonnetblanc, F. (2011). Integration of proprioceptive signals and attentional capacity during postural control are impaired but subject to improvement in dyslexic children. *Experimental Brain Research*, 209(4), 599–608. <https://doi.org/10.1007/s00221-011-2593-3>
- Quercia, P., & Marino, A. (2012, mai). Impact de la modification du Maddox postural sur l'identification des mots écrits chez le dyslexique. (Impact of postural Maddox modification on written word identification in dyslexics.) [Communication affichées]. CEN STIMCO (centre expertise national en stimulation cognitive), Dijon. http://www.dysproprioception.fr/documents/pdf/12_DYS_10.pdf
- Quercia, P., & Marino, A. (2017). Oeil et Bouche Capteur rétino-trigéminal, Manuel Pratique. (Eye and Mouth Retino-trigeminal Sensor, Practical Manual.) (Ed. Française).
- Quercia, P., Pozzo, T., Marino, A., Guillemant, A. L., Cappe, C., & Gueugneau, N. (2020). Children with dyslexia have altered cross-modal processing linked to binocular fusion: a pilot study. *Clinical Ophthalmology*, 14, 437–448. <https://doi.org/10.2147/OPH.S226690>
- Quercia, P., Quercia, M., Feiss, L. J., & Allaert, F. (2015). The distinctive vertical heterophoria of dyslexics. *Clinical Ophthalmology (Auckland, N Z)*, 9, 1785–1797. <https://doi.org/10.2147/OPH.S88497>
- Quercia, P., Seigneure, A., Chariot, S., Bron, A., Creuzot-Garcher, C., & Robichon, F. (2007). [Proprioception changes induced by prismatic glasses wear in children suffering from developmental dyslexia]. *Journal Français D'ophtalmologie*, 30(4), 380–389. [https://doi.org/10.1016/s0181-5512\(07\)89608-2](https://doi.org/10.1016/s0181-5512(07)89608-2)

- Rayner, K. (1998). Eye movements in reading and information processing: 20 years of research. Article 3. *Psychological Bulletin*, 124(3). <https://doi.org/10.1037/0033-2909.124.3.372>
- Razuk, M., & Barela, J. A. (2014). Dyslexic children suffer from less informative visual cues to control posture. *Research in Developmental Disabilities*, 35(9), 1988–1994. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.03.045>
- Razuk, M., Perrin-Fievez, F., Gerard, C. L., Peyre, H., Barela, J. A., & Bucci, M. P. (2018). Effect of colored filters on reading capabilities in dyslexic children. *Research in Developmental Disabilities*, 83, 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2018.07.006>
- Richard, L., & Charbonneau, D. (2009). An introduction to E-Prime. Article 2. *Tutorials in Quantitative Methods for Psychology*, 5(2). <https://doi.org/10.20982/tqmp.05.2.p068>
- Richlan, F. (2020). The functional neuroanatomy of developmental dyslexia across languages and writing systems. *Frontiers in Psychology*, 11. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2020.00155>
- Roll, R., Velay, J. L., & Roll, J. P. (1991). Eye and neck proprioceptive messages contribute to the spatial coding of retinal input in visually oriented activities. *Experimental Brain Research*, 85(2), 423–431. <https://doi.org/10.1007/BF00229419>
- Sampaio, P. R., Lamas, F. M., & da Silva, J. U. (2009). Prismatic lenses and developmental dyslexia. *Pediatrics (Sao Paulo)*, 31(4), 227–233.
- Schneider, W., Eschman, A., & Zuccolotto, A. (2012). *E-Prime User's Guide*. Pittsburgh: Psychology Software Tools, Inc.,
- Snowling, M. J., Hulme, C., & Nation, K. (2020). Defining and understanding dyslexia: Past, present and future. Article 4. *Oxford Review of Education*, 46(4). <https://doi.org/10.1080/03054985.2020.1765756>
- Stevenson, M., Nunes, T., Heuer, C., Marshall, J., Sanchez, J., Thornton, R., Reiczigel, J., Robison-Cox, J., Sebastiani, P., & Solymos, P. (2017). Tools for the analysis of epidemiological data. *Package EpiR: CRAN*.
- Toffalini, E., Giofrè, D., Pastore, M., Carretti, B., Fraccadori, F., & Szűcs, D. (2021). Dyslexia treatment studies: A systematic review and suggestions on testing treatment efficacy with small effects and small samples. *Behavior Research Methods*, 53(5), 1954–1972. <https://doi.org/10.3758/s13428-021-01549-x>
- Torres, A. R., Mota, N. B., Adamy, N., Naschold, A., Lima, T. Z., Copelli, M., Weissheimer, J., Pegado, F., & Ribeiro, S. (2021). Selective Inhibition of Mirror Invariance for Letters Consolidated by Sleep Doubles Reading Fluency. *Current Biology*, 31(4), 742–752.e8. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2020.11.031>
- van de Walle de Ghelcke, A., Skoura, X., Edwards, M. G., Quercia, P., & Papaxanthis, C. (2021). Action representation deficits in adolescents with developmental dyslexia. *Journal of Neuropsychology*, 15(2), 215–234. <https://doi.org/10.1111/jnp.12220>
- Viana, A. R., Razuk, M., Freitas, P. B. de, & Barela, J. A. (2013). Sensorimotor integration in dyslexic children under different sensory stimulations. *PLOS ONE*, 8(8), Article e72719. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0072719>
- Vieira, S., Quercia, P., Michel, C., Pozzo, T., & Bonnetblanc, F. (2009). Cognitive demands impair postural control in developmental dyslexia: A negative effect that can be compensated. *Neuroscience Letters*, 462(2), 125–129. <https://doi.org/10.1016/j.neulet.2009.06.093>
- Wilmot, A., Hasking, P., Leitão, S., Hill, E., & Boyes, M. (2023). Understanding Mental Health in Developmental Dyslexia: A Scoping Review. Article 2. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(2). <https://doi.org/10.3390/ijerph20021653>
- Zhao, Z., Ahissar, E., Victor, J. D., & Rucci, M. (2023). Inferring visual space from ultra-fine extra-retinal knowledge of gaze position. Article 1. *Nature Communications*, 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-35834-4>

Annexe 2 : Proprioception et dysproprioception : de la physiologie au tableau clinique
Virlet, Réalités ophtalmologiques – n°321- Mai 2025 – Cahier 1- p 1-6
Avec l'accord de la revue : Réalités ophtalmologiques
<https://www.realites-ophtalmologiques.com>

■ Le dossier – Dysproprioception

Proprioception et dysproprioception : de la physiologie au tableau clinique

RÉSUMÉ : La proprioception est un sens intéroceptif qui joue un rôle essentiel dans le couplage perception-action, qui nous permet d'interagir avec notre environnement. Le couplage perception-action permet d'anticiper les actions, et permet aussi la mise en place des modèles internes nécessaires à l'automatisation des apprentissages, tels que le contrôle moteur, le langage ou la lecture. Le couplage perception-action permet la mise en évidence d'erreurs, de les corriger et de mettre en place un nouveau modèle interne nécessaire aux futures anticipations. L'examen clinique de la proprioception évalue la distribution du tonus musculaire, la stabilité spatiale, et l'intégration multi-sensorielle. La dysfonction proprioceptive est définie par une altération dans ces trois domaines. Il existe trois formes cliniques : douloureuse (musculaire), pseudo-vertigineuse (spatiale), et cognitive (perceptive). Sa prise en charge implique souvent la proprioception oculaire.



L.-M. VIRLET
Université de Lille, CNRS, UMR 9193 – SCALab
Sciences cognitives et sciences affectives, LILLE.

■ Physiologie de la proprioception

La proprioception est un sens méconnu et diffus découvert par Sherrington au début du xx^e siècle. C'est un sens intéroceptif qui permet d'interroger et de connaître l'état du corps nécessaire à la création d'un référentiel spatial, à la connaissance de la direction et de la vitesse des mouvements des segments corporels dans l'espace, à la régulation du tonus musculaire et à la construction du schéma corporel.

La proprioception participe au codage de l'orientation de tous les organes sensoriels extéroceptifs. En effet, à quoi me sert de voir si je ne sais pas où se trouve ce que je vois. Tous les sens extéroceptifs dépendent de la proprioception qui serait le sens premier [1].

Mais surtout, la proprioception participe aux mécanismes d'automatisation sensori-motrice, nécessaires aux apprentissages, par son implication dans les cinq étapes de la perception et de l'automatisation du couplage perception-action [2].

La proprioception utilise des mécanorécepteurs répartis dans tout l'organisme, dont les fuseaux neuromusculaires dans les muscles, les organes tendineux de Golgi à la jonction musculo-tendineuse, et les corpuscules de Pacini et de Ruffini au niveau des ligaments et des capsules articulaires. Pour les muscles oculaires les organes tendineux sont les palissades de Dogiel.

Il existe deux types de voies nerveuses de la proprioception, consciente et inconsciente. La voie consciente se projette sur le cortex sensitif primaire, selon une somatotopie très précise proportionnelle à l'importance fonctionnelle et au nombre de mécanorécepteurs. Les voies inconscientes se projettent sur le cervelet par une voie directe (faisceau spinocérébelleux dorsal), et par une voie indirecte (faisceau spinocérébelleux ventral croisé de Gowers).

La proprioception ne fonctionne **jamais de façon isolée mais toujours en couple, avec trois modèles intriqués** assurant

Le dossier – Dysproprioception

un lien permanent entre extéroception et intéroception.

● **Localement** : elle est couplée à une surface sensible adjacente, et la fonction proprioceptive est ainsi indissociable de l'information donnée par l'organe sensoriel lui-même [3]. En pratique clinique, on utilise essentiellement quatre couples :

- rétine et muscles oculaires ;
- muqueuse buccale antérieure et certains muscles de l'oralité ;
- oreille interne et muscles sous-occipitaux ;
- surface plantaire et proprioception des capsules articulaires du pied. Notez que les informations proprioceptives oculaires et celles provenant du couple oral empruntent toute deux la voie trigémينية.

● **À distance** : les chaînes musculaires lient *sensoriellement* des muscles opérant pour la même action et les organes sensoriels extéroceptifs qui y sont liés. Il existe un couplage entre la proprioception oculaire et cervicale pour le codage spatial : ainsi une modification proprioceptive expérimentale au niveau des muscles oculaires droits supérieurs, des muscles trapèzes et des extenseurs des membres inférieurs donnent la même illusion de déplacement du regard [4]. Ce couplage à distance s'ajoute au couplage local entre la rétine (glissement rétinien de l'image) et la proprioception des muscles droits supérieurs.

● **Au niveau central** : par le couplage perception-action de la perception et de l'automatisation [5] qui comporte cinq étapes :

- l'**intégration multisensorielle** en fonction de l'action en cours sous la dépendance de l'état de stress et des capacités attentionnelles [6]. Les conséquences de l'intégration multisensorielle sont perceptives, d'ordre spatial et influencent le contrôle tonique ;
- l'**anticipation et la prédiction sensorimotrice** d'après les données intégrées et les modèles internes ;

– la **décision** qui lance les commandes de l'action vers les effecteurs et les copies d'efférence vers le cervelet ;

– le **contrôle** au niveau du cervelet de l'action prédite de la copie d'efférence et l'action réalisée par le *biofeedback* pour déterminer les erreurs et leurs corrections ;

– l'**adaptation des modèles internes et leur mémorisation** à long terme lors du sommeil paradoxal.

Lorsqu'une action est automatisée, la proprioception ne joue plus alors qu'un rôle de correcteur d'erreur. Ainsi par exemple, dans des conditions normales, la proprioception oculaire n'est pas utilisée pour la localisation visuelle. Elle est cependant contrôlée en permanence pour être incorporée dans l'estimation de la position de l'œil lorsqu'une discordance avec la copie d'efférence de la commande motrice est détectée [7].

La sensibilité extrême des capteurs proprioceptifs et leur intégration dans un système multi modulaire ayant des entrées multifocales fait que sa régulation suit un **mode dynamique non linéaire** [8]. Il n'y a donc pas de **proportionnalité entre une modification proprioceptive et l'effet obtenu**. Une modification très faible et raisonnée (par exemple un prisme de 0,25Δ) peut ainsi avoir une conséquence très forte sur le

tonus à distance. Parce qu'il s'agit d'un système dynamique, et non pas linéaire, la conséquence d'une modification, même minime, doit être **contrôlée immédiatement**.

“La sensibilité proprioceptive pourrait être un sens premier indispensable à l'émergence de la conscience de soi en tant qu'être capable d'action. De sorte que nos actions, connues de nous, seraient à même de donner du sens à nos cinq autres sens dont elles déterminent la maturation fonctionnelle, l'exercice et la mise à jour.” Jean-Pierre Roll [1].

Physiopathologie de la dysfonction proprioceptive

Une dysfonction proprioceptive s'accompagne d'altération des différentes étapes du couplage perception-action, avec comme conséquences des troubles d'intégration multisensorielle qui sont au centre des formes cliniques :

- **d'ordre tonique** : une asymétrie de la distribution du tonus musculaire en position de base lors du regard droit devant à la manœuvre de convergence podale (**encadré I**) ;
- **d'ordre spatial** : une instabilité référentielle mise en évidence par la présence de micro-hétérophories verticales labiles (HVL) [9] (**encadré II**) ;



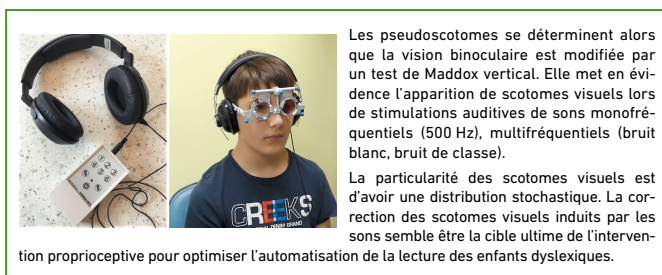
La manœuvre de convergence podale consiste à évaluer la distribution du tonus au niveau des muscles impliqués dans la rotation externe des hanches en base et lors de stimulations. Le sujet est en décubitus le regard droit devant, l'examineur empaume les talons et fait un mouvement de rotation interne lent et puisant jusqu'au blocage, il peut alors déterminer l'état de la distribution tonique.

La distribution tonique lors du regard droit devant est normalement symétrique. En cas de dysfonction proprioceptive, nous retrouvons une asymétrie de la distribution du tonus. La MCP permet de rechercher une altération des réflexes posturaux, ce qui correspond à des réponses inadéquates lors de stimulations codifiées, par exemple en cas de rotation de la tête à gauche, je dois obtenir une augmentation du tonus à droite, si c'est l'inverse, cela correspond à une altération des réflexes posturaux (ARP).

Encadré I : Manœuvre de convergence podale.



Encadré II : Maddox perceptif (Indice de Maddox Perceptif: IMP).



Encadré III : Pseudoscotomes visuels.

— **d'ordre perceptive**: la présence de scotomes visuels induits par des sons ou des vibrations [10], la présence d'un déficit proprioceptif de la détection des mouvements lents [11] (**encadré III**).

Et pour les autres étapes, la présence de troubles attentionnels [12], d'altération de la prédiction motrice [13], d'altération de la mémoire de travail [14], et d'altération de la mémoire procédurale (modèle interne) à long terme qui se manifeste globalement par une altération des mécanismes d'automatisation, dont l'automatisation de la lecture tel que l'effet de la fréquence des mots de haute fréquence [15].

■ Tableaux cliniques

Martins Da Cunha avait observé qu'une grande partie des patients douloureux chroniques présentaient des examens complémentaires normaux malgré une symptomatologie complexe. Il proposait que cette symptomatologie clinique complexe soit liée à une dysfonction proprioceptive et visuelle [16]. Sa description initiale comportait la présence potentielle de signes d'ordre musculaire (céphalées, rachialgies, arthralgies, douleurs thoraciques ou abdominales), d'ordre spatial (vertiges, nausées, chutes inexplicables, entorses à répétition) et d'ordre perceptif (diplopie, scotome, vision trouble,

asomatognosie, dysmétrie, sensation de parésie, paresthésies, troubles spécifiques des apprentissages comme la dyslexie).

Aujourd'hui, le tableau clinique de la dysfonction proprioceptive est décrit à partir du triangle de la dysproprioception, illustrant l'aspect pathologique des trois grandes fonctions de la proprioception (**fig. 1**). Insistons sur le fait qu'après exclusion de toute pathologie organique, le diagnostic de syndrome de dysfonction proprioceptive (SDP) nécessite impérativement la présence de signes subjectifs et objectifs dans ces trois domaines, et ce, jour et nuit.

Selon l'importance des signes dans tel ou tel domaine, on distingue trois grandes formes cliniques:

- forme musculaire: les troubles du contrôle moteur dominant, avec une posture et un tonus asymétrique entraînant des douleurs musculaires diurnes. S'y ajoutent des troubles respiratoires nocturnes à type d'apnées ou de syndrome de haute résistance, qui sont secondaires à une dystonie diaphragmatique;
- forme spatiale ou pseudo-vertigineuse: le patient a beaucoup de difficultés à se situer dans l'espace qui l'entoure, surtout quand il est en mouvement;
- forme cognitive ou perceptive: dominée par les troubles d'intégration multisensorielle. C'est dans cette forme que se trouvent les patients avec troubles d'apprentissage, toujours accompagnés de troubles du sommeil lors du sommeil paradoxal qui permet la consolidation de la mémoire procédurale.

Quand la sensorialité orale est très perturbée, on parle de syndrome de dysperception orale (SDO). L'examen constate des troubles de déglutition, des anomalies orthodontiques et d'importants troubles du sommeil.

■ Le triangle de la proprioception

Il illustre les trois grands domaines dans lesquels intervient fortement la

Le dossier – Dysproprioception

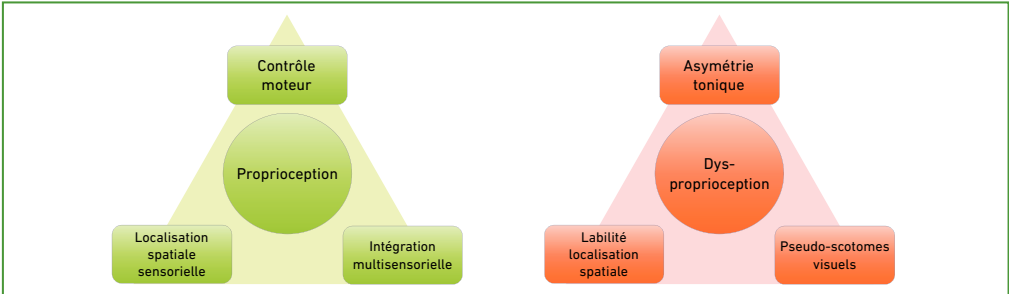


Fig. 1 : Triangles de la proprioception et de la dysproprioception.

proprioception et sert de fil conducteur pour l'examen clinique (fig. 1). Ainsi, l'examen clinique de la proprioception va examiner les trois conséquences principales de l'intégration multisensorielle : au niveau du contrôle moteur, au niveau spatial et au niveau perceptif. À noter que le déroulé de l'examen clinique et de la prise en charge proprioceptive suivent l'ordre historique des découvertes (moteur, spatiale, puis perceptif)

et l'ordre d'efficacité de la mise en place de la prise en charge proprioceptive.

Recherche clinique du SDP

1. Le questionnaire

Depuis la description *princeps* de Da Cunha [16] (encadré IV) ont été ajoutés les signes correspondant à des troubles

du sommeil. Dans le cas particulier de la dyslexie a été élaboré un questionnaire spécifique (voir chapitre sur la dyslexie).

2. L'inspection

Va rapidement évaluer des signes d'une anomalie du contrôle tonique et de la localisation spatiale en recherchant une attitude scoliotique, une bascule avec ou sans rotation des épaules et du bassin, et un appui plantaire en valgus (fig. 2).

3. L'examen clinique

L'examen va explorer le triangle de la dysproprioception, domaine après domaine. Il est codifié et emprunte des tests qui ont été choisis en raison de leur qualité informative et pour permettre une collaboration interprofessionnelle avec un langage commun.



Fig. 2 : Inspection.

Signes cardinaux	Manifestations cliniques
Douleurs	Céphalées, douleurs rétro-oculaires, thoraciques ou abdominales, arthralgies, rachialgies
Déséquilibre	Nausées, étourdissement, vertige, chutes inexplicables
Signes ophtalmologiques	Asthénopie, vision trouble, diplopie, scotomes directionnels
Signes de nature proprioceptive	Dysmétrie, somatognosie proprioceptive, erreurs d'appréciation du schéma corporel
Signes non cardinaux	Manifestations cliniques
Articulaires	Syndrome de l'articulation temporo-mandibulaire, torticolis, lumbago, périarthrite, entorses
Neuro-musculaires	Parésies, défaut de contrôle moteur des extrémités
Neuro-vasculaires	Paresthésies des extrémités, phénomène de Raynaud
Cardio-circulatoires	Tachycardie, lipothymie
Respiratoires	Dyspnée, fatigue
ORL	Bourdonnements, surdité
Psychiques	Dyslexie, dysgraphie, agoraphobie, défaut d'orientation, défaut de localisation spatiale et droite-gauche, défaut de concentration, pertes de mémoire, asthénie, anxiété, dépression

Encadré IV : Symptômes princeps du SDP par Da Cunha.

Il demande peu de matériel :

- écran et verre de Maddox ;
- point lumineux positionné à 3 m, calibré en taille et en intensité (0,7 mm et 100 lumens à 2 cm de la source lumineuse) pour obtenir un trait rouge très fin (les points lumineux habituellement utilisés en ophtalmologie ne conviennent pas) ;
- générateur d'impulsions sonores sinusoïdales (mono/multi-fréquentiel, uni/biaural) connecté à un casque isolant des interférences osseuses ;
- prismes d'essai de grand diamètre (0,25Δ à 3Δ) préservant la vision périphérique ;
- table d'examen.

4. Test de la distribution du tonus musculaire

La manœuvre de convergence podale (MCP) permet de renseigner le praticien sur la qualité du contrôle moteur, et elle étudie les réactions toniques des muscles stabilisateurs du bassin lors de la modification d'une information sensorielle extéroceptive ou intéroceptive à distance (*encadré I*).

Ces réactions réflexes ont nécessité une proprioception de qualité pour se mettre en place dans l'enfance et pour rester normales ensuite. Elles sont communes à tous les êtres humains. Quand elles sont absentes ou inversées, on parle d'altération des réflexes posturaux (ARP). Si une stimulation spécifique (par exemple un prisme) ne permet pas de gérer une ARP au moment même de l'examen, alors il faut avoir recours à un praticien de médecine manuelle. La MCP permet également d'évaluer le retentissement nocturne des différents types de respiration et donne des arguments sur la présence ou non de troubles du sommeil.

5. Test de stabilité de la localisation spatiale

Le test de Maddox vertical est utilisé pour évaluer la localisation spatiale visuelle. La caractéristique recher-

chée est la présence d'une labilité des réponses lors de stimulations sensorielles à distance proposées en suivant un protocole précis. Les hétérophories verticales constatées sont de très faible valeur, seulement visibles si on respecte les caractéristiques du point lumineux [9] (*encadré II*).

6. Test d'intégration multisensorielle

Le test d'intégration multisensorielle recherche l'apparition de pertes visuelles induites par des sons monofréquentiels, multifréquentiels et par les bruits de classe. Ces pseudoscotomes visuels peuvent aussi être induits par des vibrations [10] (*encadré III*).

■ Principes du traitement

Il est possible de modifier localement la proprioception en agissant sur la surface sensible qui lui est associée. Toute action locale aura un retentissement à distance grâce aux chaînes musculaires d'informations proprioceptives qui unissent les capteurs extéroceptifs. Les stimulations sont toujours asymétriques et extrêmement ténues. L'objectif optimal du traitement vise à corriger les troubles de la distribution tonique, de la localisation spatiale, les troubles perceptifs, ainsi que les conséquences nocturnes de la dysproprioception.

1. Prismes

En modifiant la direction des faisceaux lumineux parvenant à la rétine et en profitant du fait que tout décalage rétinien sur un œil provoque des modifications musculaires de l'autre œil (réflexe de fusion), il est possible de modifier très précisément le tonus des muscles oculaires. L'action des prismes peut être modulée en modifiant leur axe ou leur puissance. La modification du tonus modifie le retour proprioceptif et donc l'état proprioceptif global du patient. La puissance des prismes varie de 0,25 à 3 dioptries, au-delà la réponse devient

phasique, passive. (Lire dans ce numéro l'article *Prescription des prismes "actifs" dans les dysfonctions proprioceptives*, de Patrick Quercia.)

2. ALPH

Ces petites surélévations placées à des endroits très précis des incisives, avec une épaisseur de quelques dizaines de microns, modifient les relations entre lèvres, langue et muqueuse orale lors de la déglutition et stimulent spécifiquement les ligaments desmodontaux. Ces mécanorécepteurs ont une sensibilité "exquise" à des variations micrométriques. (Lire dans ce numéro l'article *Interaction entre système visuel et oral : rôle de la proprioception*, d'Alfredo Marino.)

3. Orthèse plantaire

Elles comportent des surépaisseurs de quelques millimètres (0,5 à 3 mm en général) situées à des endroits déterminés précisément en suivant une cartographie des mécanorécepteurs de la surface plantaire. (Lire dans ce numéro l'article *Le podologue dans la prise en charge du syndrome de dysfonction proprioceptive*, de Marc Janin.)

4. Respect de postures ergonomiques

Elles ont été établies à partir des études européennes sur l'ergonomie au travail et ont pour but de minimiser la fatigue musculaire.

5. Exercices respiratoires avant le coucher

Indispensables pour assurer une bonne ventilation pendant toutes les phases du sommeil, ils permettent une récupération attentionnelle et la mise en place de nouveaux circuits cérébraux pendant les phases de sommeil paradoxal qui gèrent la plasticité cérébrale, ce qui correspond à la mise en place de la mémoire procédurale à long terme. Aucune prise en charge proprioceptive n'est réellement durable sans eux.

Le dossier – Dysproprioception

6. Traitement manuel

Il est nécessaire en complément des autres modalités thérapeutiques chaque fois que les phénomènes d'hypertonie sur les chaînes musculaires résistent à l'emploi de stimulations adaptées. Les endroits d'hypertonie installée sont identifiés lors de l'étude de l'intégration multisensorielle.

Conclusion

La proprioception, parent pauvre de la médecine, est un sens complexe qui interagit avec toutes les informations que nous recevons de notre environnement et de notre propre corps. Susceptible de dysfonctionner, elle peut être la cause de signes cliniques très divers et déroutants pour le praticien. La proprioception est au cœur des processus de la perception et de l'automatisation du couplage perception-action nécessaire aux apprentissages. Il existe pourtant un examen clinique codifié pour l'explorer et proposer un traitement adapté.

BIBLIOGRAPHIE

1. ROLL JP. La Proprioception : Un sens premier ? Résonances Européennes du Rachis, 2005, 14(42). https://www.demauroy.net/files_pdf/rer42/rer42-2.pdf.
2. BERNSTEIN NA. *The Co-ordination and Regulation of Movements*, Pergamon Press, 1967.
3. ZHAO Z, AHISSAR E, VICTOR JD *et al*. Inferring visual space from ultra-fine extra-retinal knowledge of gaze position. *Nat Commun*, 2023;14:269.
4. ROLL R, VELAY JL, ROLL JP. Eye and neck proprioceptive messages contribute to the spatial coding of retinal input in visually oriented activities. *Exp Brain Res*, 1991;85:423-431.
5. CENSOR N, SAGI D, COHEN LG. Common mechanisms of human perceptual and motor learning. *Nat Rev Neurosci*, 2012;13:658-664.
6. CAPPE C, ROUILLER EM, BARONE P. Cortical and Thalamic Pathways for Multisensory and Sensorimotor Interplay. In M. M. Murray & M. T. Wallace (Éds.), *The Neural Bases of Multisensory Processes*. CRC Press/Taylor & Francis, 2012. <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK92866/>
7. BALSLEV D, MITCHELL AG, FARIA PJM *et al*. Proprioceptive contribution to oculomotor control in humans. *Hum Brain Mapp*, 2022;43:5081-5090.
8. VIRLET L, SPARROW L, BERQUIN P *et al*. Proprioceptive intervention stabilizes the chaos of a non-linear system in dyslexic children. *Int J Psychol*, 2024;59(S1):230-274.
9. QUERCIA P, QUERCIA M, FEISS LJ *et al*. The distinctive vertical heterophoria of dyslexics. *Clin Ophthalmol*, 2015;9:1785-1797.
10. QUERCIA P, POZZO T, MARINO A *et al*. Children with Dyslexia Have Altered Cross-Modal Processing Linked to Binocular Fusion. A Pilot Study. *Clin Ophthalmol*, 2020;14:437-448.
11. LAPREVOTTE J, PAPAXANTHIS C, SALTARELLI S *et al*. Movement detection thresholds reveal proprioceptive impairments in developmental dyslexia. *Sci Rep*, 2021;11:299.
12. QUERCIA P, DEMOUGEOT L, DOS SANTOS M *et al*. Integration of proprioceptive signals and attentional capacity during postural control are impaired but subject to improvement in dyslexic children. *Exp Brain Res*, 2011;209:599-608.
13. VAN DE WALLE DE GHELCKE A, SKOURA X, EDWARDS MG *et al*. Action representation deficits in adolescents with developmental dyslexia. *J Neuropsychol*, 2021;15:215-234.
14. VIEIRA S, QUERCIA P, MICHEL C *et al*. Cognitive demands impair postural control in developmental dyslexia : A negative effect that can be compensated. *Neurosci Lett*, 2009;462:125-129.
15. VIRLET L, SPARROW L, BARELA J *et al*. Proprioceptive intervention improves reading performance in developmental dyslexia : An eye-tracking study. *Res Dev Disabil*, 2024;153:104813.
16. MARTINS DA CUNHA H. Le syndrome de déficience posturale. Son intérêt en ophtalmologie. *J Fr Ophthalmol*, 1986; 9:747-55.

L'auteur a déclaré ne pas avoir de liens d'intérêts concernant les données publiées dans cet article.

|