Université Claude Bernard Lyon 1
Institut des Sciences et Techniques de Réadaptation
Département Orthophonie

N° de mémoire 2557

Mémoire d'Orthophonie

présenté pour l'obtention du

Certificat de capacité d'orthophoniste

Par

KAHN Déborah

Effet d'un entrainement rythmique moteur inspiré du Brain Ball® sur les compétences phonologiques et morphosyntaxiques d'enfants porteurs d'un Trouble Développemental du Langage (TDL)

Mémoire dirigé par

BOULENGER Véronique

Année académique

2024-2025

INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE READAPTATION

DEPARTEMENT ORTHOPHONIE

Directeur ISTR
Pr. Jacques LUAUTÉ

Équipe de direction du département d'orthophonie

Directeur de formation
Solveig CHAPUIS

Coordinateur de cycle 1
Claire GENTIL

Coordinateur de cycle 2
Ségolène CHOPARD

Responsables de l'enseignement clinique
Johanne BOUQUAND
Anaïs BOURRELY
Ségolène CHOPARD
Alice MICHEL-JOMBART

Responsables des travaux de recherche
Mélanie CANAULT
Floriane DELPHIN-COMBE
Claire GENTIL
Nicolas PETIT

Responsables de la formation continue
Johanne BOUQUAND

Responsable du pôle scolarité
Véronique VILLALON

Secrétariat de scolarité
Catherine DAVASSOU
Marina GARNIER
Alison RIVIERE

UNIVERSITE CLAUDE BERNARD LYON 1

Président
Pr. LINA Bruno

Vice-président CFVU
Mme CHEMELLE Julie-Anne

Vice-président CA
Mme CHARLES Sandrine

Vice-président CR
M. Arnaud BRIOUDE
Délégué de la Commission Recherche Secteur Santé

Directeur Général des Services
M. ROLLAND Pierre

1 Secteur Santé

U.F.R. de Médecine Lyon Est Doyen
Pr. RODE Gilles

U.F.R. de Médecine et de maïeutique Lyon-Sud Charles Mérieux Doyen
Pr. PAPAREL Philippe

U.F.R. d'Odontologie
Pr. MAURIN Jean-Christophe

Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques
Pr. DUSSART Claude

Institut des Sciences et Techniques de la Réadaptation (I.S.T.R.)
Pr LUAUTÉ Jacques

2 Secteur Sciences et Technologie

U.F.R. Faculté des Sciences
Directeur **M. DEZELLUS Olivier**

U.F.R. Biosciences
Directrice **Mme GIESELER Kathrin**

U.F.R. de Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (S.T.A.P.S.)
Directeur **M. BODET Guillaume**

Institut National Supérieure du Professorat et de l'Éducation (INSPé)
Directeur **M. CHAREYRON Pierre**

Institut des Sciences Financières et d'Assurance (I.S.F.A.)
Directeur **M. ROBERT Christian**

Observatoire Astronomique de Lyon
Directeur **M. GUIDERDONI Bruno**

POLYTECH LYON
Directeur **M. PERRIN Emmanuel**

Institut Universitaire de Technologie de Lyon 1 (I.U.T. LYON 1)
Directeur **M. MASSENZIO Mich**

RESUME

Le traitement de la parole et celui de la musique impliquent des zones cérébrales et des processus cognitifs communs, particulièrement concernant le rythme. Ce partage de ressources neuronales permet un transfert entre le traitement du rythme et celui du langage. La littérature révèle effectivement un bénéfice d'entrainements rythmiques sur les compétences langagières, notamment chez les enfants présentant un Trouble Développemental du Langage (TDL). De plus, le langage et l'action partagent des liens étroits : le mouvement corporel, en particulier les gestes rythmés fournissent un soutien sensorimoteur et bénéficient au traitement du langage.

Nous avons émis l'hypothèse qu'un entrainement de synchronisation rythmique intégrant le versant moteur améliorerait les compétences phonologiques et morphosyntaxiques d'enfants porteurs de TDL. L'entrainement mis en place s'inspire de la méthode Brain Ball® visant à stimuler la sphère sensorimotrice à l'aide d'activités motrices ludiques réalisées en rythme. Ces activités consistent à faire rebondir de petites balles ou à se passer des sacs lestés seul ou à plusieurs, au rythme de percussions enregistrées sur un support numérique. Dans un protocole de type pré-test/post-test, nous avons évalué l'effet de cet entrainement chez huit enfants porteurs d'un TDL de 7 à 9 ans. Leurs compétences en phonologie et en morphosyntaxe ont été examinées avant et après quatre semaines d'entrainement, et après une période contrôle de remédiation orthophonique « classique » de quatre semaines selon la méthode du *cross-over.* L'entrainement rythmique et moteur était composé de deux séances hebdomadaires, complétées par trois courtes séances à la maison.

Les résultats montrent que l'entrainement bénéficie significativement à certaines habiletés phonologiques et morphosyntaxiques, comme la répétition de pseudo-mots, la métaphonologie et la complétion de phrases, comparativement à la période contrôle. Ces données encourageantes ouvrent des perspectives pour la rééducation orthophonique des troubles du langage oral.

Mots-clés :

Rythme, langage, motricité, enfant, trouble développemental du langage, synchronisation, phonologie, morphosyntaxe.

ABSTRACT

Speech and music processing involve common brain areas and cognitive processes, particularly regarding rhythm. These shared neural resources allow for a transfer between rhythm and language processing. Indeed, the literature reveals a benefit of rhythmic training on language skills, particularly in children with Developmental Language Disorder (DLD). Furthermore, language and action share close links: body movement, particularly rhythmic gestures provide sensorimotor support and benefit language processing.

We hypothesized that training based on rhythmic synchronization and integrating the motor system would improve the phonological and morphosyntactic skills of children with DLD. The training implemented is based on the Brain Ball® method, which aims to stimulate the sensorimotor sphere using playful motor activities performed in time with rhythm. These activities consist of bouncing small balls or passing weighted bags alone or in groups, to the rhythm of percussion recorded on a digital medium. In a pre-test/post-test protocol, we evaluated the effect of such training in eight children aged 7 to 9 years old with DLD. Their phonological and morphosyntactic skills were examined before and after a 4-week training period, and after a 4-week control period of "classic" speech therapy remediation using the crossover method. Rhythmic and motor training consisted of two weekly sessions, supplemented by three short sessions at home.

The results show that training significantly benefits certain phonological and morphosyntactic skills, such as pseudoword repetition, metaphonology, and sentence completion, compared to the control period. These encouraging data open up perspectives for speech therapy for oral language disorders.

Keywords:

Rhythm, language, motor skills, child, developmental language disorder, synchronization, phonology, morphosyntax.

Aucun conflit d’intérêt n’implique l’étudiante ni la direction du mémoire.

Je déclare avoir utilisé un outil d’intelligence artificielle dans l’écriture de ce mémoire, tel que détaillé dans l’annexe G de ce mémoire.

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Tout d'abord, je souhaite exprimer ma profonde gratitude à Véronique Boulenger pour son accompagnement, la qualité de ses conseils, sa rigueur et le temps précieux qu'elle m'a consacré tout au long de ce travail.

Je souhaite également remercier l'ensemble des enseignants de la formation dont la richesse des enseignements m'a permis de construire des bases solides tout au long de mon parcours.

Un grand merci à Monsieur Pautonnier, qui m'a offert l'opportunité de bénéficier de sa formation et de m'accompagner dans ce projet.

Je suis également très reconnaissante envers Laure Leculier qui a pris de son temps et qui m'a fait part de conseils très pertinents.

Je tiens à adresser mes remerciements aux enseignants et aux écoles ayant pris le temps de s'intéresser au projet et de le mettre en œuvre.

Ma reconnaissance va également aux parents et aux enfants ayant participé au projet avec motivation et enthousiasme, contribuant ainsi de manière essentielle à l'avancée de ce travail.

Je n'oublie pas mes amies de promotion, dont le soutien constant et les encouragements ont été d'une grande valeur. Leur amitié a été un véritable moteur et j'ai eu de la chance de partager ces années riches et intenses à leurs côtés.

Enfin, je souhaite remercier chaleureusement ma famille, et particulièrement mes parents : mon père, toujours soucieux de ma réussite, et ma mère que j'ai tant sollicitée au fil de mes études, et qui a grandement contribué à l'élaboration de ce mémoire.

Un merci tout particulier à mon mari, pour sa patience, son soutien inconditionnel et sa compréhension durant ces mois de travail. Et bien sûr à mes enfants… qui n'ont certes pas toujours facilité mes années d'études mais qui m'ont apporté une joie immense et dont la présence aimante m'a portée, même dans les moments les plus exigeants.

Sommaire

I Partie théorique 1
1 Introduction 1
2 Rythme, musique et développement du langage 2
2.1 Liens entre rythme de la parole et rythmes du cerveau 2
2.2 Importance du rythme dans le développement langagier de l'enfant 3
2.3 Effet de la musique sur le développement et le traitement du langage 3
3 Traitement rythmique dans le TDL 5
3.1 Le TDL 5
3.2 Traitement du rythme et trouble du langage 5
3.3 Déficit de synchronisation auditivo-motrice chez les enfants porteurs d'un TDL 6
4 Entrainement rythmique et rééducation du TDL 8
4.1 Impact d'un entrainement rythmique sur les compétences en phonologie 8
4.2 Impact d'un entrainement rythmique sur les compétences en morphosyntaxe 9
4.3 Bénéfice d'un entrainement rythmique moteur sur les compétences langagières 10
5 Problématique et hypothèse théorique 11
II Méthode 12
1 Population 12
2 Matériel 12
2.1 Epreuve de rythme 13
2.2 Phonologie 13
2.3 Morphosyntaxe 13
2.4 Entrainement 14
3 Procédure 16
3.1 Procédure expérimentale 16
3.2 Protocole d'entrainement 17
III Résultats 18
1 Discrimination phonologique 19
2 Répétition de pseudo-mots 20
3 Métaphonologie 21
4 Jugement de grammaticalité 22
5 Complétion de phrases 23
6 Compréhension de phrases 23
IV Discussion et conclusion 25

1 Recontextualisation de l'étude 25
2 Effet de l'entrainement rythmique et moteur sur la phonologie 25
3 Effet de l'entrainement rythmique et moteur sur la morphosyntaxe 27
4 Limites et perspectives 29
V Références 32
VI Annexes .....

I Partie théorique

1 Introduction

Le traitement de la musique et celui de la parole impliquent des processus cognitifs et substrats neuronaux en partie communs (Fiveash et al., 2021 ; Kotz et al., 2018 ; Patel, 2008 ; Schön, 2010). Plus précisément, le rythme est au cœur de la musique mais aussi du langage. Le traitement du langage oral nécessite en effet des capacités rythmiques pour extraire les éléments linguistiques du flux acoustique continu. Si le signal musical présente une rythmicité parfaite, le signal de parole est quant à lui dit quasi-rythmique, c'est-à-dire que les informations acoustiques apparaissent à des intervalles relativement réguliers dans le temps. Par exemple, les syllabes sont produites à une fréquence moyenne de 4-8 Hz, soit 4 à 8 syllabes par seconde (Pellegrino et al., 2011). Dès le plus jeune âge, les enfants perçoivent les régularités rythmiques de leur langue, ce qui leur permet de segmenter le flux de parole pour former leurs premières représentations morphosyntaxiques (Mehler & Christophe, 1995).

Les enfants avec un trouble développemental du langage oral (TDL) présentant un déficit en particulier dans le domaine de la phonologie et/ou de la morphosyntaxe, rencontrent aussi des difficultés de perception du rythme (Corriveau & Goswami, 2009). Des études ont alors montré que l'utilisation d'un rythme régulier et facile à extraire bénéficierait aux compétences langagières (Canette et al., 2020ab ; Kraus et al., 2014). Le rythme semble donc être une piste intéressante pour enrichir les outils dont disposent les orthophonistes pour la rééducation des troubles du langage oral.

Le traitement du rythme implique en outre une synchronisation entre les aires motrices et auditives du cerveau. Mettre le corps en mouvement sur un rythme externe sollicite particulièrement ces connexions cérébrales et améliore la perception et la synchronisation rythmiques (Kotz et al., 2018 ; Manning & Schutz, 2013). Ces interactions auditivo-motrices sont essentielles pour la perception et la production du langage. Plus généralement, la perspective de la cognition incarnée considère que la cognition, et le langage en particulier, sont ancrés dans l'expérience sensorimotrice (Barsalou, 2008). Peut-on alors penser qu'une rééducation rythmique du langage impliquant le corps et la motricité sera particulièrement bénéfique dans le cadre du TDL ?

Nous exposerons tout d'abord les liens entre le traitement du langage et du rythme chez les enfants au développement typique ou avec des troubles du langage. Puis, nous mettrons en évidence l'intérêt d'une remédiation orthophonique par le rythme sur les compétences langagières, phonologiques et morphosyntaxiques en particulier, des enfants présentant un TDL. Enfin, nous décrirons l'entrainement rythmique et moteur que nous avons proposé à un groupe d'enfants TDL, et nous présenterons et discuterons les résultats obtenus.

2 Rythme, musique et développement du langage

2.1 Liens entre rythme de la parole et rythmes du cerveau

Le signal de parole est constitué d'unités rythmiques, allant de la syllabe aux mots et groupes de mots (Rosen, 1992). Le rythme syllabique permet notamment de créer des temps forts, telles que les syllabes accentuées, que l'auditeur peut repérer et exploiter pour faciliter la segmentation du flux auditif. Le cerveau possède également une activité rythmique caractérisée par les oscillations cérébrales (Buzsáki & Draguhn, 2004), qui correspondent à des fluctuations rythmiques de l'activité neuronale au repos, modulées lors de la réalisation de tâches cognitives. Ces oscillations se produisent à plusieurs fréquences, dont certaines sont proches des propriétés rythmiques de la parole, à savoir les bandes de fréquence delta (1-3 Hz), thêta (4-8 Hz) et gamma (30-80 Hz) (Berger, 1929). Cette correspondance entre les échelles temporelles de la parole et des oscillations cérébrales permet à ces dernières de se synchroniser sur la structure quasi-rythmique du signal verbal, afin de le segmenter en unités linguistiques pertinentes (phonèmes, syllabes, mots, groupes de mots) et ainsi de faciliter son traitement (Giraud & Poeppel, 2012 ; Peelle & Davis, 2012). Selon le modèle d'échantillonnage asymétrique (Poeppel, 2003), les oscillations thêta dans le cortex auditif droit permettraient d'extraire les unités syllabiques, alors que les oscillations gamma dans le cortex auditif gauche faciliteraient le découpage phonémique du signal. La synchronisation des oscillations delta sur le signal jouerait enfin un rôle dans le traitement des informations prosodiques plus lentes (Giraud & Poeppel, 2012).

Les modèles de synchronisation cérébrale sur la parole peuvent être mis en lien avec la théorie de l'attention dynamique (*Dynamic Attending Theory*; Jones, 1976 ; Large & Jones, 1999). Celle-ci suggère que les ressources attentionnelles, grâce aux oscillations neuronales, se synchronisent sur des éléments rythmiques externes afin de traiter les informations. L'attention fluctue dans le temps, des pics attentionnels alternant avec des « creux » où les ressources attentionnelles sont minimales. Les pics se synchronisent sur les éléments auditifs importants se produisant de façon périodique, de sorte à établir des prédictions temporelles (« temps forts » et « temps faibles »). L'activité neuronale s'amplifie alors de façon sélective sur les régularités temporelles du signal que ce soit pour la parole ou pour la musique, améliorant le traitement de l'information et la segmentation du signal (Cason & Schön, 2012).

Ainsi, le rythme guide les oscillations cérébrales (Fernandez-Merino et al., 2024) et leur synchronisation sur le signal externe contribue au traitement de la parole (Harding et al., 2019). Dans la suite, nous démontrerons que le rythme joue un rôle majeur dans le développement langagier de l'enfant dès le plus jeune âge.

2.2 Importance du rythme dans le développement langagier de l'enfant

Les nourrissons montrent une sensibilité précoce aux indices rythmiques et à la prosodie de leur langue (Goswami, 2011 ; Mehler & Christophe 1995). La prosodie est définie comme « le rythme et l'intonation des phrases et correspond aux variations de durée, de fréquence et de débit » (Millotte & Christophe, 2009).

Les résultats de plusieurs études ont révélé que des nouveau-nés sont capables de discriminer leur langue d'une langue étrangère uniquement sur la base d'indices prosodiques et rythmiques (Mehler et al., 1988 ; Nazzi & Ramus, 2003 ; Nazzi et al., 1998 ; Ramus & Mehler, 1999). Ortiz-Barajas et al. (2023) ont d'ailleurs montré en électroencéphalographie (EEG) que la synchronisation des oscillations delta et thêta chez le nouveau-né diffère pour des stimuli issus de langues rythmiquement différentes. Millotte & Christophe (2009) ont quant à eux rapporté que des enfants de 16 mois utilisent déjà les frontières prosodiques pour segmenter les mots dans une phrase. L'ensemble de ces résultats suggèrent que dès le plus jeune âge, les bébés sont sensibles aux indices prosodiques de leur langue. D'autres études chez des enfants plus âgés scolarisés en maternelle révèlent que les performances dans des épreuves rythmiques telles que des percussions corporelles sur le rythme de comptines sont significativement corrélées aux scores d'épreuves de phonologie (e.g., dénombrement de syllabes), de mémoire à court terme verbale et de dénomination rapide (Plart, 2021 ; Woodruff Carr et al., 2014). David et al. (2007) ont également montré que les capacités rythmiques d'enfants lecteurs dans une tâche de tapping sur des séquences musicales sont liées à leurs compétences en conscience phonologique et en dénomination rapide. Le développement des habilités rythmiques et celui de la conscience phonologique s'influencent donc mutuellement (Bolduc & Rondeau, 2015).

Cette courte revue de littérature révèle que le rythme est fondamental pour le développement langagier, ce qui suggère que des interventions rythmiques pourraient bénéficier au développement du langage.

2.3 Effet de la musique sur le développement et le traitement du langage

Dès la naissance, la musique peut avoir des bénéfices importants sur le développement du langage, comme en attestent les études ayant évalué l'effet d'entrainements musicaux chez des nourrissons. Le développement des gestes de communication pré-linguistiques de nourrissons de 6 mois, évalué avec l'inventaire du développement communicatif MacArthur-Bates, était par exemple supérieur après 6 mois d'expérience musicale active comparé à celui de nourrissons exposés passivement à la musique (Gerry et al., 2012). Une autre étude a néanmoins observé, grâce à une exposition même passive à la musique, une discrimination des sons de parole améliorée chez des bébés de 0 à 28 mois à risque de développer une dyslexie car ayant un proche dyslexique (Paula et al., 2023). Une amélioration du traitement

des sons de parole (meilleure détection des variations rythmiques et sensibilité aux structures temporelles) a également été décrite par Zhao et Kuhl (2016) chez des nourrissons de 9 mois ayant bénéficié de stimulations musicales (e.g., taper des rythmes avec l'aide d'adultes grâce à des jouets musicaux) par rapport à un groupe contrôle. Enfin, Dondena et al. (2021) ont décrit l'efficacité d'un entrainement musical et rythmique sur les compétences pré-linguistiques de nourrissons évalués à l'âge de 6 mois puis 12 mois grâce à l'échelle de Bayley (sous-test réceptif : comportement préverbal et compréhension verbale, et sous-test productif : babillage, gestes et discours précoce). Certains chercheurs ont par ailleurs montré, chez des enfants plus grands, que l'apprentissage de la musique améliore les capacités phonologiques (Choi et al., 2024 ; Lefebvre et al., 2019 ; Maclean et al., 1987). Par exemple, Bolduc et Lefebvre (2012) ont décrit une amélioration de la conscience phonologique chez 100 enfants (âge moyen de 4-6 ans) au développement typique après une intervention basée sur l'écoute et l'apprentissage de comptines, à raison de 40 minutes par semaine pendant 10 semaines.

Ainsi, de plus en plus d'études, étayées par différentes théories, suggèrent qu'un entrainement musical améliore la perception de la parole au cours du développement typique. Selon l'hypothèse OPERA (*Overlap-Precision-Emotion-Repetition-Attention* ; Patel, 2012), la formation musicale favorise la plasticité cérébrale et améliore les compétences linguistiques lorsqu'elle remplit cinq conditions : le chevauchement (les ressources neuronales se chevauchent entre la perception de la musique et celle de la parole), la précision (le traitement de la musique demande plus de précision pour encoder certaines caractéristiques acoustiques que le traitement de la parole), l'émotion (la musique provoque des émotions positives, ce qui augmente la motivation et l'engagement), la répétition (l'entrainement musical doit être répété le plus souvent possible pour favoriser le traitement des indices acoustiques et la plasticité, qui seront bénéfiques pour la parole) et l'attention (attention dirigée sur le flux sonore). Un entrainement musical engagera ces cinq principes, et en raison du partage de substrats cérébraux avec la parole, entrainera des bénéfices transférables aux compétences linguistiques. L'hypothèse de la synchronisation auditive précise (*Precise Auditory Timing Hypothesis*, PATH; Tierney & Kraus, 2014) suggère également qu'un entrainement musical conforme aux conditions de l'hypothèse OPERA améliore les compétences phonologiques grâce à la synchronisation neuronale, puisque le développement phonologique requiert l'intégration d'informations auditives temporelles. L'entrainement musical conduirait donc à une meilleure précision de la perception des sons de la parole (Fiveash & Tillmann, 2024).

La musique et le rythme ont donc un effet bénéfique sur le développement du langage de l'enfant au développement typique. Nous nous intéresserons dans la suite à la perception du rythme chez les enfants présentant un trouble développemental du langage oral.

3 Traitement rythmique dans le TDL

3.1 Le TDL

Le terme de trouble développemental du langage (TDL), ayant fait l'objet du consensus Catalise (Bishop et al., 2016), est aujourd'hui employé pour décrire les enfants présentant des difficultés langagières persistantes en production et/ou en réception, avec un impact fonctionnel scolaire et au quotidien, et pour lequel les causes ne sont pas biomédicales (e.g., déficience intellectuelle ou auditive) ni liées à un manque d'exposition à la langue (Maillart, 2018). Des comorbidités avec le trouble déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH), le trouble développemental de la coordination (TDC), ou encore le trouble spécifique du langage écrit (TSLE) sont souvent décrites. Le TDL regroupe donc des profils hétérogènes s'inscrivant dans un continuum de difficultés et nécessitant la mention du niveau de sévérité.

Le diagnostic repose sur des épreuves langagières, évaluant notamment la phonologie et la morphosyntaxe, afin de déterminer la présence d'un écart à la norme. De plus, en vue d'affiner le diagnostic, il convient de relever les facteurs de risque et de protection, les marqueurs de déviance (comme le trouble de l'évocation lexicale ou le déficit de mémoire à court terme selon Gérard, 1993), les dissociations dans le profil et d'observer les décalages en comparaison aux seuils d'alerte (par exemple : pas de babillage à 1-2 ans). Selon la HAS (2020), les facteurs de risque et de protection peuvent être environnementaux (milieu socio-économique, exposition à la langue, cohésion familiale), génétiques (antécédents familiaux, sexe), neurobiologiques (difficultés pré-/périnatales), ou cognitifs (bon niveau général, équilibre socio-émotionnel, habilités motrices etc.).

Différentes hypothèses sont étudiées comme causes du TDL : un défaut de l'input langagier, un trouble du traitement auditif (Tallal, 2000), un déficit de l'apprentissage du langage mais également un déficit du traitement rythmique (Huss et al., 2011). En effet, comme nous l'avons vu, la sensibilité au rythme peut prédire les capacités langagières (e.g. Bolduc & Rondeau, 2015 ; Woodruff Carr et al., 2014). Dans la suite, nous développerons particulièrement les études évaluant le traitement du rythme chez les enfants avec un TDL et son lien avec les troubles du langage.

3.2 Traitement du rythme et trouble du langage

Des études montrent que les enfants avec un trouble du langage présentent un déficit de perception et de production du rythme (Corriveau & Goswami, 2009 ; Planchou, 2014). En perception, Sallat & Jentschke (2015) ont rapporté que des enfants de 5 ans avec un TDL percevaient plus difficilement les changements de rythme dans des comptines connues que des enfants neurotypiques de 4 et 5 ans. En production, des enfants TDL de 4 à 5 ans présentent de plus faibles performances dans des tâches d'imitation de modèle rythmique sur battements de mains et sur des percussions que des enfants neurotypiques (Kreidler et al.,

2023). De même, taper le rythme d'une séquence musicale (Cumming et al., 2015a) ou fredonner un air (Caccia et al., 2021) est plus difficile pour des enfants avec un TDL que pour leurs pairs neurotypiques. Corriveau et al. (2007) ont en outre montré lors de tâches de traitement auditif et de langage que la majorité des enfants de 7 à 11 ans ayant un TDL obtiennent un score inférieur au groupe contrôle pour détecter le temps de montée de l'enveloppe d'amplitude des sons (appelé « *rise time* », correspondant au temps d'attaque du son) et la durée des sons, et que ces difficultés sont corrélées aux performances langagières, notamment en phonologie (voir aussi Richard & Goswami, 2015). Selon l'hypothèse « *prosodic phrasing* » (Cumming et al. 2015b), un déficit rythmique, notamment dans les basses fréquences, impacterait le traitement de la prosodie chez ces enfants. Cela affecterait leurs capacités langagières, en particulier leur développement phonologique et morphosyntaxique (Cumming et al., 2015ab ; Goswami et al., 2016).

Des chercheurs ont émis l'hypothèse que les enfants avec un trouble spécifique du langage écrit et par extension avec un TDL présenteraient une synchronisation atypique de leurs oscillations cérébrales sur le signal de parole, notamment dans les basses fréquences (Giraud & Poeppel, 2012 ; Goswami, 2011). Guiraud et al. (2018ab) suggèrent que ce déficit de synchronisation dans le TDL entrainerait des difficultés pour extraire les informations phonologiques et morphosyntaxiques nécessaires au bon développement du langage oral. Leurs résultats préliminaires dans une tâche d'écoute de phrases (Guiraud, 2017 ; Guiraud et al., 2018b) tendent à soutenir cette hypothèse avec un couplage moins fort entre le rythme de la parole et les rythmes cérébraux dans la bande thêta, correspondant à l'échelle syllabique, chez des enfants de 8-13 ans avec un TDL comparés à des enfants neurotypiques du même âge. De même, une étude de Peter et al. (2023) montre des réponses neuronales atypiques à la fréquence de 2 Hz (bande delta correspondant au rythme phrastique) chez des enfants de 7 à 12 ans atteints de TDL associé à une dyslexie. Une moins bonne extraction des informations rythmiques pourrait alors entrainer des représentations langagières moins précises. Ainsi, un traitement atypique du rythme serait considéré comme un facteur de risque de trouble du développement du langage (Ladányi et al.,2020 ; Nayak et al., 2024).

3.3 Déficit de synchronisation auditivo-motrice chez les enfants porteurs d'un TDL

Selon la théorie motrice de perception de la parole, le système de production des gestes articulatoires est impliqué dans la perception de la parole (Liberman, 1957 ; Liberman & Mattingly, 1985), qui repose donc sur des représentations multisensorielles. Les régions corticales motrices s'activent même sans intention de mouvement lors de la perception d'informations musicales (Stephan et al., 2018) et de la parole (D'Ausilio et al., 2009 ; Pulvermüller et al., 2006). Cette activité motrice contribue en outre aux performances en perception : l'inhibition temporaire du cortex moteur chez des adultes neurotypiques perturbe

la discrimination des phonèmes (Möttönen et al., 2013). Giraud et al. (2007) ont enfin relevé que les régions prémotrices oscillent naturellement dans les bandes de fréquence thêta et gamma, qui sont les fréquences pertinentes pour l'extraction respectivement, des syllabes et des phonèmes. Les réseaux moteurs et auditifs interagissent donc fonctionnellement que ce soit pour traiter la musique ou la parole (Fiveash et al., 2021 ; Kotz et al., 2018).

L'importance de cette synchronisation auditivo-motrice est soulignée dans plusieurs théories dont la théorie de l'attention dynamique vue précédemment (Large & Jones, 1999), qui suggère que l'activité motrice aide à synchroniser l'attention avec les évènements externes pertinents. Selon l'hypothèse ASAP (*Action Simulation for Auditory Prediction* ; Patel & Iversen, 2014), la perception d'un rythme repose sur un couplage entre les aires auditives et celles dédiées à la planification motrice. Le modèle PRISM (*Processus Rhythm in Speech and Music* ; Fiveash et al., 2021) met également en évidence l'importance du couplage sensori-moteur en plus du rôle des oscillations cérébrales et du traitement auditif précis.

Les liens entre les systèmes auditif et moteur lors du traitement de la musique et du langage sont souvent étudiés dans des tâches de tapping consistant à taper du doigt sur un rythme donné (Colling et al., 2017 ; Rathcke et al., 2021). Ainsi, chez l'adulte, suivre un rythme en tapant avec les doigts améliorerait la sélection de l'information, la précision de l'attention temporelle et la segmentation du flux auditif comparé à l'écoute seule (Fiveash et al., 2021 ; Morillon et al., 2014). Su & Poppel (2012) ont également montré que des adultes musiciens et des non-musiciens identifient mieux une pulsation dans une séquence auditive lorsqu'ils réalisent des mouvements rythmiques comme hocher la tête ou taper du pied plutôt qu'en écoutant passivement les sons. Le mouvement corporel a donc un effet mélioratif sur la stabilité de la synchronisation et l'identification de la pulsation. Ces capacités rythmiques sont d'ailleurs corrélées aux performances langagières. Woodruff Carr et al. (2014) ont ainsi montré que des enfants d'âge préscolaire n'arrivant pas à se synchroniser sur un battement, et ayant un encodage moins efficace du rythme, avaient des résultats inférieurs aux tests de langage précoce, notamment pour la phonologie, ainsi qu'aux tests de perception musicale.

Quelques études suggèrent que les enfants porteurs de TDL présentent un déficit de synchronisation auditivo-motrice. Chez des enfants avec un TDL de 7 à 11 ans, Corriveau & Goswami (2009) ont décrit des performances altérées pour toutes les épreuves langagières (e.g., répétition de pseudo-mots), mais aussi pour les tâches motrices rythmiques de tapping sur un métronome (à 1.5, 2 et 2.5 Hz), corroborant le lien entre trouble langagier et déficit auditivo-moteur. Ladányi et al. (2022) ont quant à eux comparé les performances rythmiques d'enfants TDL et neurotypiques lors d'exercices de tapping à différents rythmes (normal, rapide et lent). Les compétences des enfants avec un TDL étaient inférieures, à savoir que leurs battements étaient plus rapides que ceux de leurs pairs pour le rythme lent. Les performances rythmiques étaient de plus corrélées à celles en compréhension morphosyntaxique. D'autres

études chez des enfants dyslexiques cette fois ont montré des difficultés pour taper avec la main sur le rythme d'un métronome à une fréquence de 2.4 Hz, correspondant à la fréquence delta et au rythme phrastique (Colling et al., 2017 ; Flaugnacco et al., 2014). Ces difficultés étaient là encore corrélées aux compétences langagières des enfants, comme la phonologie.

Il convient néanmoins de souligner qu'il existe différentes compétences rythmiques reposant sur des ressources neuronales différentes (Tierney & Kraus, 2014). Launay et al. (2014) ont montré, en comparant des participants adultes avec un déficit rythmique à un groupe témoin, qu'il est tout à fait possible d'être capable de suivre le rythme d'un métronome mais d'être incapable de suivre celui d'une séquence rythmique musicale. Des déficits peuvent donc exister sur certaines compétences rythmiques tandis que d'autres sont intactes.

En résumé, les enfants avec un TDL présentent des difficultés de traitement du rythme et de synchronisation sensori-motrice, suggérant qu'un entrainement rythmique et moteur améliorerait la synchronisation cérébrale sur le flux de parole et conduirait à une meilleure perception des informations pertinentes.

4 Entrainement rythmique et rééducation du TDL

4.1 Impact d'un entrainement rythmique sur les compétences en phonologie

Des entrainements rythmiques proposés à des personnes neurotypiques suggèrent des améliorations phonologiques. En effet, chez des enfants tout-venant de maternelle, la conscience phonologique, la syllabation et la détection de rimes étaient améliorées après des formations musicales (Bhide et al., 2013 ; Moritz et al., 2013 ; Plart, 2021). Ces effets n'étaient pas observés chez un groupe témoin (Bolduc et al., 2021) ou un groupe ayant suivi un entrainement sportif (Degé & Schwarzer, 2011). Il convient néanmoins d'ajouter que l'étude de Bolduc et al. (2021) n'a pas montré d'avantage significatif de l'entrainement musical comparé à un entrainement moteur (sportif) proposé à un troisième groupe d'enfants. D'autres études n'ont cependant pas observé d'amélioration du traitement phonologique suite à un entrainement musical rythmique. L'étude de Yu et al. (2017) chez des étudiants tout-venant a montré une amélioration de la catégorisation sémantique mais pas d'amélioration phonologique significative suite à une formation musicale. Patscheke et al. (2018) ont quant à eux comparé les effets d'un entrainement rythmique et d'un entrainement axé sur la hauteur sur la conscience phonologique d'enfants neurotypiques âgés entre 4 et 6 ans. Seul l'entrainement sur la hauteur a donné lieu à une amélioration significative par rapport au groupe témoin ayant suivi un entrainement sportif.

Concernant les enfants porteurs de TDL, plusieurs études réalisées dans le cadre de mémoire d'orthophonie ont montré un bénéfice d'entrainements rythmiques sur les compétences phonologiques (Fromageau, 2019 ; Louvel, 2019). Fromageau (2019) a mené une étude auprès d'enfants TDL de 9 à 11 ans ayant suivi un entrainement musical de groupe

et entrainés individuellement sur l'application Poppins (anciennement appelée Mila) en parallèle pendant 3 mois (application proposant des activités rythmiques pour les enfants avec des troubles des apprentissages ; Vonthron & Yuen, 2018). Les enfants ayant suivi l'entrainement ont vu leur discrimination phonologique et leur dénomination rapide s'améliorer significativement par rapport au groupe sans entrainement. Dans une étude chez des enfants entre 4 et 6 ans avec un diagnostic de trouble phonologique sans diagnostic de TDL, Fénéon (2019) a également révélé qu'un entrainement rythmique (e.g., percussions corporelles, comptines, marche sur un tempo etc) a permis un transfert en post-test sur les compétences langagières avec l'amélioration de la dénomination et de la répétition comparé à une rééducation orthophonique classique.

En outre, plusieurs études se sont penchées sur l'influence du rythme sur les performances langagières dans le cadre de la dyslexie, qu'il convient de discuter même si elle ne fait pas l'objet du présent travail. Les résultats montrent là encore une amélioration des compétences phonologiques après un entrainement musical chez les enfants dyslexiques (Bonacina et al., 2015 ; Flaugnacco et al., 2015 ; Overy, 2003). Par ailleurs, Icht (2019) a montré que des adultes avec déficience intellectuelle ayant suivi des séances de Beatalk (exercices de rythmes vocaux) ont amélioré leur intelligibilité par rapport à ceux ayant suivi une rééducation orthophonique classique. Ces données corroborent l'idée que l'entrainement rythmique bénéfice aux compétences phonologiques, en termes d'intelligibilité de la parole.

Dans l'ensemble, la littérature suggère donc que l'entrainement rythmique améliore les compétences phonologiques dans le cas du développement typique et atypique. D'autres études révèlent également son impact dans le domaine morphosyntaxique.

4.2 Impact d'un entrainement rythmique sur les compétences en morphosyntaxe

Patel (2003) a proposé que le traitement syntaxique musical (i.e. structure musicale régie par des règles, par exemple lors de l'association de notes pour former des accords) et le traitement syntaxique dans le langage évoquent une réponse neuronale partagée (SSIRH : *Shared Syntactic Integration Resource Hypothesis*). Cela suggère des corrélats neuronaux communs au traitement de la syntaxe du rythme musical et du langage.

Ainsi, plusieurs études ont décrit des effets de transfert d'un entrainement rythmique sur les compétences en morphosyntaxe chez les enfants neurotypiques ou porteurs de TDL. La présentation d'amorces rythmiques ayant une métrique régulière, dont le rythme peut être facilement extrait, améliore les performances de jugement de grammaticalité de phrases par rapport à des amorces dont la métrique est irrégulière (Bedoin et al., 2016 ; Canette et al., 2020ab ; Przybylski et al., 2013 ; Schön & Tillmann, 2015). Chern et al. (2018) ont corroboré ce résultat chez des enfants neurotypiques âgés de 5 à 8 ans ; aucune différence entre les deux types d'amorces n'était en revanche observée pour des tâches contrôles non

linguistiques (e.g., tâche mathématique). L'amorçage rythmique faciliterait donc la segmentation de l'information verbale et son traitement syntaxique. Une amélioration de la segmentation de la parole par l'entrainement musical a également été démontrée par François et al. (2011, 2013). En 2013, ils ont comparé un groupe d'enfants neurotypiques de 8 ans ayant suivi une formation musicale à un groupe apparié ayant suivi une formation en peinture durant 2 ans. Les résultats ont montré que la capacité des enfants à extraire des pseudo-mots d'un flux de syllabes s'est significativement améliorée chez le groupe avec formation musicale.

Plusieurs mémoires d'orthophonie se sont penchés plus spécifiquement sur le TDL avec l'hypothèse que des entrainements rythmiques musicaux améliorent les compétences en syntaxe (Benhaim, 2020 ; Dunand-Cheraba, & Moles-Roulet, 2021 ; Louvel, 2019). Brittain (2023) a par exemple montré que des enfants de 6 à 13 ans porteurs d'un TDL réussissaient mieux des exercices de morphosyntaxe tels que la répétition de phrases complexes, ainsi qu'une tâche de répétition de pseudo-mots, suite à un entrainement rythmique sur vidéos en condition statique et dynamique (tapping, production rythmique, détection d'intrus rythmiques) durant 6 semaines. Cependant, il faut souligner que la plupart des études citées montrent uniquement des effets immédiats, les effets à plus long terme n'ayant pas été évalués. De plus, certaines études comme celles réalisées par Lafont (2022) et Fromageau (2019) ne révèlent pas d'amélioration significative en morphosyntaxe à la suite d'entrainements rythmiques basés sur l'application Poppins citée précédemment. Vidal (2013) a quant à elle proposé à des enfants « dysphasiques » un entrainement avec la TMR (thérapie mélodique et rythmée) souvent utilisée dans le cadre de la rééducation post AVC et qui utilise la reproduction de rythmes et la conversation rythmée. Le groupe contrôle d'enfants « dysphasiques » ayant uniquement suivi une rééducation classique s'est tout autant amélioré que celui ayant suivi la formation rythmique. Les bénéfices de l'entrainement rythmique étaient donc présents mais ils n'ont pas permis une amélioration plus importante des performances.

Dans l'ensemble, la littérature est encourageante quant à un effet positif de l'entrainement rythmique sur la phonologie et la morphosyntaxe chez des enfants porteurs de TDL. Associer un entrainement rythmique et une mobilisation du corps permettrait-il une synchronisation sensori-motrice encore plus efficace qu'un entrainement rythmique auditif seul ?

4.3 Bénéfice d'un entrainement rythmique moteur sur les compétences langagières

Comme nous l'avons vu précédemment, le traitement du rythme implique une synchronisation entre les régions corticales auditives et motrices. Réaliser des mouvements lors d'un entrainement rythmique permettrait alors d'amplifier ses effets. Par exemple, taper du doigt en rythme avec les syllabes d'une phrase améliore le traitement de la phrase par rapport à une situation sans tapping (Falk et al., 2017). Gindre (2024) montre, dans une tâche de lecture à haute voix chez des adultes neurotypiques, qu'un amorçage auditif avec

implication motrice (tapping) est plus bénéfique (nombre d'erreurs réduit, temps d'initiation de la parole plus court) qu'un amorçage auditif seul. Lorsque des participants marquent le rythme avec un mouvement, ils perçoivent mieux quand le son final arrive plus tard qu'attendu que lorsqu'ils sont immobiles (Manning & Schutz, 2013). Le rythme est donc mieux perçu lorsqu'on l'associe à un mouvement corporel (Schön et al., 2015) : utiliser un mouvement pour taper une pulsation faciliterait la détection du rythme (Su & Poppel, 2012).

Ces données suggèrent que des entrainements rythmiques intégrant la motricité et le corps pourraient améliorer la synchronisation des oscillations cérébrales sur le signal, et conduire à de meilleures performances langagières. Peu d'études à notre connaissance ont évalué l'effet d'entrainements mobilisant la motricité sur les compétences langagières des enfants avec un TDL. Lloret (2018) a montré que des enfants avec un TDL, de 4 ans 11 mois à 8 ans, ont vu leurs performances phonologiques en discrimination et en répétition de non-mots s'améliorer après un entrainement rythmique de 6 semaines proposant du tapping et des reproductions de rythmes variés de percussions dans des activités ludiques sur support numérique. Ce bénéfice a perduré au moins 6 semaines après l'entrainement alors qu'il n'a pas été observé après une période de remédiation orthophonique classique. Bhide et al. (2013) révèlent par ailleurs que des entrainements impliquant du tapping et l'imitation de rythmes chez des enfants en difficulté pour l'apprentissage de la lecture ont autant d'effets bénéfiques sur le langage, notamment sur la phonologie, qu'un entrainement de conversion graphème-phonème.

Comme évoqué précédemment, le cortex moteur joue un rôle fonctionnel dans le traitement de la parole (Möttönen et al., 2013), et l'entrainement au rythme renforce les connexions entre les systèmes auditif et moteur (Fiveash et al., 2021). Ainsi, entrainer la synchronisation auditivo-motrice en impliquant le corps pourrait amplifier les bénéfices sur le langage.

5 Problématique et hypothèse théorique

L'objectif de notre étude est de montrer l'intérêt d'une rééducation orthophonique basée sur le rythme en évaluant l'effet d'un entrainement rythmique moteur, nécessitant une synchronisation auditivo-motrice, sur les compétences langagières d'enfants porteurs d'un TDL. La littérature révèle l'importance du rythme pour le développement du langage et l'influence des capacités rythmiques sur les compétences langagières. Disposer de bonnes compétences rythmiques favorise le découpage du flux de parole en syllabes, en mots et en groupes de mots, et ainsi le traitement grammatical. Nous proposons ici un entrainement inspiré de la méthode « Brain Ball® » (https://brainball.fr/, créée par Pautonnier en 2016), composé d'activités courtes et ludiques consistant à mobiliser le corps pour réaliser de petits exercices en rythme. Notre hypothèse est qu'entrainer les enfants avec un TDL à bouger au rythme de séquences musicales améliorera leurs performances phonologiques et morphosyntaxiques comparé à la rééducation orthophonique habituelle seule.

II Méthode

1 Population

La population étudiée inclut huit enfants francophones (4 filles et 4 garçons) volontaires, âgés de 7 à 9 ans (âge moyen de 7 ans 8 mois) et ayant reçu un diagnostic de TDL par un.e orthophoniste (cf. Annexe A). Le recrutement a été réalisé au sein des écoles primaires privées de Villeurbanne. L'étude a été validée par le Comité d'Éthique de la Recherche (CER) de l'Université de Lyon (CER-UdL n° 2024-10-10-003 ; cf. Annexe B), après déclaration du traitement des données personnelles auprès du Service de Protection des Données (SPD) du CNRS. Nous avons recueilli le consentement éclairé et signé des représentants légaux de chaque enfant et le consentement oral des enfants. Nous avons inclus dans l'étude les enfants de langue maternelle française, de 7 à 9 ans, diagnostiqués TDL par un.e orthophoniste et bénéficiant d'un suivi orthophonique régulier. Nous avons exclu les enfants avec un bilinguisme précoce (seconde langue apprise avant l'âge de 5 ans), un Trouble de l'Attention avec ou sans Hyperactivité TDA/H, un Trouble Développemental de la Coordination TDC (ou dyspraxie), un Trouble du Spectre Autistique TSA, une déficience intellectuelle et ceux avec une formation musicale. Nous avons exclu les TSA, les enfants bilingues et les enfants avec déficience intellectuelle afin de disposer des profils langagiers les plus « purs » possible. Pour la même raison, nous avions prévu d'exclure les enfants présentant un Trouble Spécifique du Langage Ecrit (TSLE), mais compte tenu de la réalité clinique, les enfants avec un TDL de cet âge ont le plus souvent un TSLE associé. Nous avons donc retiré ce critère de la liste des critères d'exclusion pour favoriser le recrutement des participants. Les enfants avec un TDA/H ou un TDC ont été exclus car la méthode Brain Ball® nécessite une attention particulière ainsi que des capacités motrices préservées. Inclure des enfants avec ce type de trouble pourrait biaiser les résultats attendus sur le langage oral. Nous avons choisi la limite d'âge inférieure de 7 ans puisque la méthode Brain Ball® est déconseillée avant cet âge. Elle nécessite en effet des compétences motrices et de coordination qui ne sont pas suffisamment développées avant l'âge de 7 ans.

2 Matériel

Les compétences langagières des enfants ont été évaluées trois fois selon un protocole en *cross-over*, avant et après une première période (entrainement rythmique ou rééducation orthophonique habituelle), et après une seconde période (respectivement, rééducation orthophonique ou entrainement rythmique). Cette évaluation langagière pré- et post-test a été réalisée à l'aide d'épreuves issues de différentes batteries standardisées afin de pouvoir réaliser trois tests (pré-test / post-test 1 / post-test 2) incluant des items différents mais de difficulté comparable pour minimiser l'effet test/retest.

2.1 Epreuve de rythme

Nous avons réalisé une épreuve de rythme afin d'évaluer les compétences rythmiques initiales des enfants avant de débuter l'entrainement. Lors de ce test, l'enfant devait taper pendant une minute sur un tambour à l'aide d'une baguette au rythme d'un métronome à 1.5 Hz, soit 90 battements par minute. Les productions ont été enregistrées à l'aide de l'application Dictaphone sur smartphone. Les données n'ont cependant pas été analysées dans le cadre du mémoire et ne seront donc pas présentées.

2.2 Phonologie

Nous avons proposé aux enfants une épreuve de discrimination phonologique à partir des tests d'EVALEO 6-15 (Launay et al., 2018) et de l'ELDP (Macchi et al., 2012). À partir de ces batteries, nous avons sélectionné 54 paires de pseudo-mots pour constituer trois listes différentes de 18 paires chacune. Ces listes ont été enregistrées sur l'application Dictaphone d'un smartphone et proposées lors des trois tests différents (pré-test / post-test1 / post-test 2 ; une liste par test). Chaque test était donc composé de 18 paires de pseudo-mots. Les items répartis dans les 3 tests ont été appariés en termes de difficulté (nombre de syllabes et paires minimales). L'enfant devait dire si les deux pseudo-mots qu'il entendait étaient pareils ou pas pareils (avec autant d'items « pareils » que « pas pareils » dans chaque liste). Une bonne réponse était cotée 1, le score maximal était donc de 18 par test.

La seconde épreuve de phonologie était la répétition de pseudo-mots réalisée à l'aide des tests EVALEO 6-15 et de la BALE (Cogni-Sciences, 2010). À partir de ces batteries, nous avons sélectionné 36 items au total, répartis dans trois listes différentes, une pour chaque test (pré-test / post-test 1 / post-test 2). Chaque test était ainsi composé de 12 pseudo-mots à répéter, le score maximal étant de 12. Les items ont été appariés en termes de difficulté (nombre de syllabes, présence ou non de groupe consonantique) entre les trois tests.

Enfin, une épreuve de métaphonologie basée sur les tests EVALEO 6-15 et de la BALE a été effectuée avec, pour chacun des trois tests, 7 suppressions de phonèmes initiaux dont 3 inclus dans des mots et 4 dans des pseudo-mots, et 6 suppressions de phonèmes finaux dont 3 dans des mots et 3 dans des pseudo-mots. Les items ont été appariés entre les trois listes (pour les trois tests) selon la longueur des mots et la présence ou non d'un groupe consonantique. Une bonne réponse était cotée 1, le score maximal était donc de 13 par test.

2.3 Morphosyntaxe

Nous avons réalisé un test de jugement de grammaticalité de phrases grâce aux épreuves de EXALANG 5-8 (Thibault et al., 2010), EXALANG 8-11 (Thibault et al., 2012) et EVALEO 6-15. Vingt phrases ont été sélectionnées à partir de ces batteries et nous avons créé 25 phrases supplémentaires en prenant soin de les apparier à celles des batteries, afin de disposer de suffisamment d'items pour les trois tests (45 phrases au total). Il s'agissait pour l'enfant de dire

si les phrases entendues étaient grammaticalement correctes ou non. Chaque test comportait 15 phrases dont 5 correctes et 10 non correctes. Pour chaque test, 6 à 7 phrases étaient issues de l'une des trois batteries et 8 à 9 phrases étaient les phrases créées par nos soins. Les phrases ont été appariées entre les trois tests selon leur construction morphosyntaxique, leur longueur et la nature de l'unité morphosyntaxique erronée (pronominalisation, flexion verbale, préposition, genre et nombre des pronoms). Une bonne réponse était cotée 1, le score maximal était donc de 15 par test.

Une épreuve de complétion de phrases a également été proposée afin d'évaluer la morphosyntaxe en production. Nous avons pour cela utilisé le TCG (Test de Closure Grammaticale-Révisé ; Deltour, 2002) et la batterie de test ELO (Khomsi, 2001). Chacun des trois tests comportait 27 complétions de phrases à réaliser à l'aide d'un support imagé (2 images par item, l'une pour la partie de la phrase proposée à l'oral et l'autre pour la suite de la phrase à produire par l'enfant). Les phrases issues des deux batteries ont été réparties dans les trois tests selon leur niveau de difficulté, en fonction de leur construction morphosyntaxique et de l'élément morphosyntaxique attendu en production (genre et nombre du nom et des pronoms, flexion verbale, déterminant, préposition etc.). Cinq items ont néanmoins été présentés dans les 3 tests, en l'absence d'autres phrases de difficulté comparable. Une bonne réponse était cotée 1, le score maximal était donc de 27 par test.

Enfin, nous avons évalué la compréhension de phrases à partir de l'E.CO.S.SE (Lecocq, 1998). L'enfant devait désigner la bonne image parmi 4 selon la phrase proposée à l'oral. L'E.CO.S.SE est composé de 23 blocs de 4 phrases. Chaque bloc évalue un élément syntaxique différent. Par exemple, le bloc 5 évalue la phrase négative simple, le bloc 16 évalue les propositions relatives sujet, en « qui ». Nous avons donc réalisé les 3 tests en répartissant, dans chaque test, les phrases de chaque bloc afin de garantir un équilibre en termes de construction syntaxique, de nature des énoncés et d'élément évalué pour chaque item (phrase relative, pronominalisation, négation, déterminant, phrase passive, verbe à l'infinitif, coréférence, comparatif, adjectifs ordinaux etc.). Dix items du premier test ont été repris dans le 3ème test uniquement, en l'absence d'autres phrases comportant exactement la même construction syntaxique. Les tests étaient composés de 33 phrases chacun. Une bonne réponse était cotée 1, le score maximal était donc de 33 par test.

2.4 Entrainement

L'entrainement incluait des activités motrices rythmiques et ludiques issues de la méthode Brain Ball® (https://brainball.fr/) dont j'ai suivi la formation en début d'année. Nous avons utilisé, en début d'entrainement, différents instruments de musique (tambour, maracas, grelots) pour sensibiliser les enfants au rythme, puis des sacs de sable lestés et des petites balles en caoutchouc pour les activités rythmiques. Nous avons également fourni à chaque enfant le

matériel nécessaire pour s'entrainer à la maison (un sac et une balle) ainsi que quatre courtes vidéos de consignes de 5 à 10 minutes, permettant de réaliser certains exercices en autonomie. Ainsi, l'enfant pouvait réaliser l'entrainement en imitant ce qui était effectué sur la vidéo en rythme avec la musique. Les entrainements réalisés avec l'enfant pendant les séances et ceux réalisés en autonomie à domicile ont été effectués sur des rythmes de métronome et sur des musiques couplées d'un son de métronome à différentes fréquences (63, 75, 80 ou 83 battements par minute, soit entre 1.1 et 1.4 Hz ; séquences musicales fournies par le créateur de la méthode Brain Ball®) afin de faciliter la perception du rythme tout en se laissant porter par la musique.

Créé en 2016 par Régis Pautonnier, éducateur spécialisé, batteur et jongleur, le Brain Ball® se pratique à l'aide de petits sacs de grains, de balles de rebond, de petits ballons, de balles sensorielles, de bracelets sonores et d'anneaux lestés. Cette méthode s'appuie sur toute une série de mouvements rythmés, déclinés seul, en binôme ou en groupe, et effectués sur des boucles rythmiques ou musicales. Le principe de base est de faire circuler des sacs de grains dans l'espace de façon précise, et de faire rebondir une ou plusieurs balles au sol tout en marquant un rythme défini et dirigé par l'animateur. L'objectif est l'installation de la rythmique dans le corps : musicalité du geste, vitesse des mouvements corrélés à la pulsation et perception du rythme répété et de la musique qui cadrent et guident le geste. La dynamique centrale des exercices est donc la régularité et l'exécution en rythme. Cette méthode a initialement été créée pour développer la concentration, la coordination, la coopération et la confiance. Dans ce « lieu » qu'est le rythme, plusieurs sphères dialoguent et s'ajustent les unes aux autres : la sphère auditive (bruit des balles, des sacs, des boucles rythmiques), la sphère visuelle (dans le suivi des objets se déplaçant dans l'espace) et la sphère tactile. La composante auditive est fondamentale, elle est à la base de chaque exercice et guide l'apprentissage des mouvements. Cette méthode est donc axée sur un renforcement auditivo-moteur. En effet, dans la mesure où le traitement du rythme implique un découpage régulier de séquences temporelles, le geste apparait comme une action consciente qui rassemble à la fois les notions d'espace et de temps. L'ambiance rythmique et sonore a alors pour effet de soutenir les praxies en calant les différents gestes dans la pulsation donnée. La majorité des exercices de Brain Ball® s'accompagnent de guides sonores : boucle rythmique ou musicale, métronome. La rythmique peut être sur 2, 3, 4 temps. Toutefois, au cours des entrainements réalisés, il est nécessaire de faire entendre le geste avec les sons produits : par les balles qui rebondissent, qu'on attrape ou que l'on fait passer dans l'autre main, ou par les sacs qui « atterrissent » dans les mains ou que l'on plaque dans l'autre main.

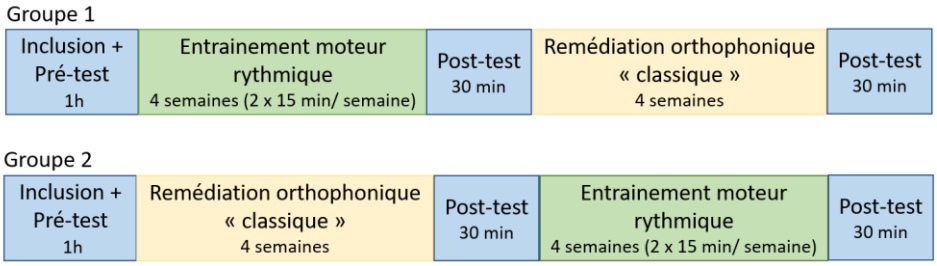
3 Procédure

3.1 Procédure expérimentale

La procédure expérimentale consistait en un protocole de type pré-test / post-test permettant de mesurer les habiletés langagières avant et après une période soit d'entrainement moteur rythmique soit de remédiation orthophonique « classique » (période contrôle), avec contrebalancement de l'ordre des périodes en fonction du groupe de participants (Figure 1). Chaque enfant a continué à bénéficier de sa rééducation orthophonique habituelle pendant la période d'entrainement rythmique. Cette procédure de *cross-over* a permis de réaliser des comparaisons intra-sujets et évité d'inclure un groupe d'enfants bénéficiant de l'entrainement et un groupe n'en bénéficiant pas, contournant ainsi les difficultés souvent rencontrées pour apparier les deux groupes sur un certain nombre de variables (âge, sexe, sévérité du trouble langagier etc.).

Figure 1

Illustration du protocole expérimental selon la méthode du cross-over.



Après avoir répondu favorablement à l'annonce de recrutement diffusée au sein des écoles et dans des cabinets d'orthophonie (cf. Annexes C et D), l'enfant et au moins l'un de ses représentants légaux ont été reçus à l'école de l'enfant pour un entretien (avec lecture de la notice d'information et signature du formulaire de consentement pour les représentants légaux, et consentement oral de l'enfant), permettant de vérifier que l'enfant remplissait les critères de sélection pour l'étude. La première évaluation pré-test a été réalisée à la même occasion dans une salle isolée pour une durée d'environ 20 à 30 minutes. Les épreuves ont toujours été réalisées dans le même ordre en commençant par la phonologie (discrimination, répétition de pseudo-mots puis métaphonologie), puis la morphosyntaxe (jugement de grammaticalité, complétion de phrases puis compréhension de phrases). Selon la méthode *cross-over*, l'enfant a ensuite été inclus dans l'un des deux groupes. S'il était dans le Groupe 1 (Figure 1), il a d'abord réalisé l'entrainement moteur rythmique à raison de deux séances par semaine pendant quatre semaines. Après la période d'entrainement, ses compétences langagières (phonologie et syntaxe) ont à nouveau été évaluées à l'école. Puis au bout de quatre semaines sans entrainement (rééducation orthophonique uniquement), le deuxième post-test a été réalisé à l'école également. La procédure a été identique pour un enfant inclus dans le

deuxième groupe excepté qu'il a d'abord réalisé la période de remédiation habituelle, puis la période d'entrainement au Brain Ball®.

3.2 Protocole d'entrainement

L'entrainement a consisté en huit séances au total, soit deux par semaine (le lundi et le mercredi) réparties sur quatre semaines (cf. Annexe E). Chaque séance durait 15 minutes. Lors de la première séance, nous avons effectué une sensibilisation au rythme avec les instruments de musique, puis nous avons débuté par des exercices individuels avec les sacs lestés. Par la suite, nous avons réalisé les exercices en binôme (l'enfant et moi-même) avec les sacs lestés. À partir de la 4ème séance, nous avons abordé les exercices rythmiques avec les balles. À chaque séance, nous avons repris un exercice de la séance précédente afin de mettre en confiance les enfants et de respecter un ordre de difficulté progressif des exercices au cours du protocole. Au cours d'une séance, chaque nouvel exercice a été réalisé d'abord sans musique puis sur métronome, puis sur musique couplée à un métronome, dans un premier temps de manière individuelle puis en binôme. Les exercices réalisés ont été effectués sur différents rythmes que ce soit lorsque le métronome était utilisé seul ou couplé avec une séquence musicale. Nous avons d'abord travaillé sur des rythmes en deux temps puis en milieu de protocole, nous avons proposé des exercices en quatre temps. Les exercices consistaient par exemple, pour l'enfant seul, à passer le sac lesté ou la balle de la main droite à la main gauche sur un rythme donné. En binôme, cela pouvait consister à se placer face à face et à se passer le sac ou à faire rebondir la balle de la main gauche de l'un à la main droite de l'autre, puis de la main gauche à la main droite pour faire une boucle complète. Chaque séance d'entrainement comportait trois exercices d'environ 5 minutes chacun.

Selon les compétences motrices des enfants, certains exercices ont dû être adaptés (cf. Annexe A) : ralentissement du rythme, balle plus grosse du fait de difficultés pour rattraper la petite balle. Nous avons également encouragé les enfants et leurs représentants légaux à réaliser certaines activités à domicile, si possible trois fois par semaine pendant 5 à 10 minutes (les jours où aucune séance d'entrainement n'était proposée). Une vidéo explicative et le matériel nécessaire (sacs lestés et balles) leur ont été fournis ; nous leur avons également fourni un petit journal de bord permettant de suivre l'entrainement, et d'indiquer les séances effectuées et toute remarque éventuelle.

Les vidéos d'entrainement à la maison ont été conçues pour être réalisées trois fois par semaine et duraient 5 à 10 minutes chacune. L'enfant devait à chaque fois cocher dans son journal de bord s'il avait réalisé l'entrainement ou non. Les entrainements étaient individuels et consistaient à se passer le sac de la main droite à la main gauche en rythme et inversement, puis à faire rebondir la balle avec la main droite, puis avec la main gauche, toujours en rythme.

Enfin les enfants devaient faire rebondir la balle en la faisant passer de la main droite à la main gauche (« en V »).

Le protocole a débuté le 20 novembre pour le premier groupe et s'est terminé le 20 décembre. Pour le second groupe, il a débuté le 8 janvier et s'est terminé le 7 février. L'entrainement a été effectué au sein de l'école de l'enfant dans une salle isolée et calme pour les huit séances.

III Résultats

Compte tenu du faible échantillon de participants (n=8), nous avons réalisé des tests non paramétriques de Wilcoxon avec le logiciel JASP (JASP Team, 2025). Ces tests ont permis de comparer les scores obtenus par les enfants à chaque épreuve en pré-test et post-test, suite à l'entrainement rythmique d'une part, et après la période contrôle d'autre part.

Nous avons complété nos analyses par un modèle linéaire à effets mixtes (Baayen, 2008; Baayen et al., 2008) afin d'évaluer l'influence de variables telles que l'ordre des périodes et l'effet de maintien de l'entrainement. Bien qu'une taille d'échantillon plus importante aurait permis de renforcer la fiabilité de ces analyses, cette approche statistique permet de modéliser à la fois la variabilité liée à des facteurs contrôlés dits « effets fixes », et celle liée à des facteurs non contrôlés dits « effets aléatoires » (e.g., liés aux participants). Elle s'avère ainsi plus sensible que les méthodes reposant sur le moyennage des données telles que l'analyse de variance (ANOVA). Le modèle mixte utilisé a intégré trois effets fixes : l'ordre chronologique des périodes (ortho-rythme vs rythme-ortho ; désigné « Ordre »), l'entrainement (entrainement rythmique vs rééducation orthophonique classique ; nommé « Rythme »), et leur interaction (Ordre × Rythme) afin de déterminer si l'effet de l'entrainement rythmique diffère selon l'ordre des périodes. Un troisième effet fixe a été ajouté au modèle, permettant d'analyser un possible maintien de l'amélioration des performances en deuxième période (effet « Maintien » ou « *Carry-over effect* ») sachant que la moitié des participants avaient déjà suivi l'entraînement rythmique durant la première période. Le modèle incluait enfin le facteur Sujets comme effet aléatoire. Ce modèle a été testé sur les 6 variables dépendantes de notre étude, à savoir les scores obtenus par les enfants aux 6 épreuves langagières : discrimination phonologique, répétition de pseudo-mots, métaphonologie, jugement de grammaticalité, complétion de phrases et compréhension de phrases. Les analyses statistiques par modèles mixtes ont été effectuées grâce au logiciel R (R Development Core Team, 2016). La normalité de la distribution des résidus a été vérifiée avec le test de Shapiro-Wilk (Shapiro & Wilk, 2007) afin de valider l'ajustement du modèle linéaire à effets mixtes. Dans la suite, nous présenterons les résultats obtenus par épreuve, avec un seuil de significativité alpha fixé à 5 %. La significativité est indiquée sur les figures par une astérisque (* indique une différence

significative avec p < .05, ** une différence significative avec *p* < .01 et *** une différence significative avec *p* < .001).

De manière générale, les enfants ont été très motivés par l'entrainement et ont montré beaucoup d'intérêt pour les exercices proposés ainsi que pour les entrainements à réaliser à la maison. Le premier groupe s'est entrainé quasiment tous les jours à la maison mais pour le deuxième groupe, le suivi a été plus difficile. Le deuxième groupe a globalement effectué moins d'entrainements à la maison que le premier, même s'ils en ont réalisé minimum deux par semaine (la recommandation initiale étant de trois). En outre, le protocole d'entrainement a été quelque peu différent selon les profils d'enfants. Certains enfants ont pu aller au bout du protocole mis en place, voire plus loin que ce qui était prévu (exercices en groupe proposé par Brain Ball®), alors que d'autres ne l'ont pas réalisé jusqu'au bout. En effet, malgré l'absence de diagnostic de TDC (Trouble Développemental de la Coordination), trois enfants sur les huit ont eu des difficultés avec la manipulation de la balle (cf. Annexe A). Il a donc été nécessaire de passer plus de temps sur les exercices avec les sacs, de simplifier des exercices de balles (proposition de balles plus grosses par exemple), et de ne pas en proposer certains.

1 Discrimination phonologique

Les scores obtenus par les participants correspondent au nombre de paires de pseudo-mots correctement discriminées.

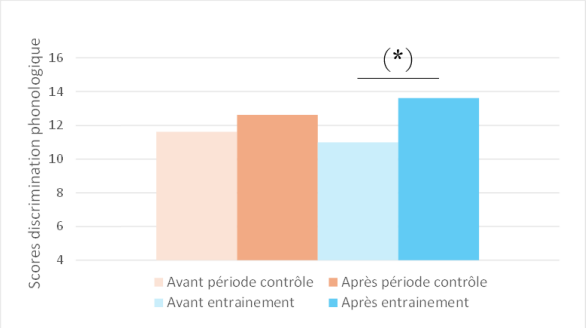


Figure 2

Moyenne des scores de l'ensemble des participants en discrimination phonologique en pré-test et post-test, pour la période contrôle de remédiation orthophonique seule, et pour l'entrainement rythmique moteur. (*) indique une différence significative entre conditions uniquement pour une seule des deux analyses réalisées (ici le test de Wilcoxon).

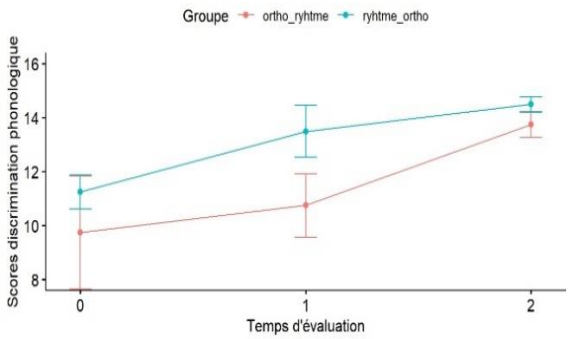


Figure 3

Moyenne et erreurs standards des scores de discrimination phonologique selon les groupes (i.e. ordre des périodes) et les temps d'évaluation (0 correspond au pré-test, 1 au post-test 1 et 2 au post-test 2). ortho_rythme : période de remédiation orthophonique puis entrainement rythmique (Groupe 2). rythme_ortho : entrainement rythmique puis remédiation orthophonique (Groupe 1).

Le test de Wilcoxon, qui compare les performances en pré-test et post-test des enfants pour chaque période, montre un effet significatif de l'entrainement rythmique moteur sur la discrimination phonologique (W = 0, p =.018), ce qui n'est pas le cas pour la période contrôle de remédiation orthophonique seule (W = 6.50, p = .233). En effet, comme illustré sur la Figure 2, le score moyen de discrimination de pseudo-mots augmente entre le pré-test avant entrainement (M = 11) et le post-test après entrainement (M = 13.63), alors que l'évolution est plus faible lorsqu'on compare les résultats avant et après la période contrôle (respectivement, M = 11.62 et M = 12.63). Cependant, le modèle mixte qui considère d'autres facteurs et qui prend en compte la variabilité inter-individuelle, ne met pas en évidence d'effet significatif du facteur Rythme (t(17) = 0.78, p = .448), et donc pas d'amélioration significative des performances en discrimination phonologique après l'entrainement rythmique par rapport à la période sans entrainement. En effet, l'observation des performances individuelles (cf. Figure S1 en Annexe F) montre que sur huit enfants, quatre se sont nettement améliorés (P2, P4, P5 et P7) après l'entrainement rythmique, alors que l'amélioration a été plus faible chez deux d'entre eux (P6 et P8) et nulle chez deux autres (P1 et P3). En outre, cinq enfants sur les huit ont amélioré leurs performances (dont trois plus franchement : P1, P7 et P8) après la période contrôle. Nous ne relevons pas d'effet significatif de Maintien des performances (t(17) = 1.11, p = .283) ni d'effet d'Ordre (t(15) = 0.53, p = .603), ou d'interaction entre les facteurs Rythme et Ordre (t(13) = 0.21, p = .840 ; Figure 3). Les scores globaux des participants ne diffèrent donc pas selon l'ordre des périodes.

Selon le type de test statistique utilisé, les résultats varient donc, ce qui ne nous permet pas de conclure clairement quant à un effet significatif de l'entrainement rythmique sur la discrimination phonologique chez les enfants inclus.

2 Répétition de pseudo-mots

La Figure 4 montre que le nombre moyen de pseudo-mots correctement répétés augmente entre le pré-test avant entrainement (M = 4.88) et le post-test après entrainement (M = 8.25), alors que les performances avant et après la période contrôle évoluent peu (respectivement M = 6.50 et M = 6.67). Ces observations sont confirmées par le test de Wilcoxon qui montre que l'amélioration des performances est significative après l'entrainement rythmique (W = 0, p = .007) mais pas après la période contrôle (W = 6, p =.783). L'analyse par modèle mixte met également en évidence un effet significatif de l'entrainement (facteur Rythme) sur la répétition de pseudo-mots par rapport à la période sans entrainement (t(14) = 4.26, p < .001). L'effet de Maintien des performances n'est en revanche pas significatif (t(14) = 1.32, p = .208 ; Figure 5, différence entre les temps 1 et 2 pour le groupe rythme_ortho) et nous ne notons pas d'effet significatif de l'Ordre chronologique des périodes (t(13) =1.80, p = .095). Cependant, une interaction significative entre les facteurs Rythme et Ordre (t(13) = -2.28, p = .041) est mise en

évidence par le modèle. Les performances suite à l'entrainement rythmique diffèrent selon les groupes, avec des améliorations plus importantes pour le groupe ayant bénéficié de l'entrainement rythmique d'abord (rythme_ortho sur la Figure 5), comparé à l'autre groupe (ortho_rythme), même si ce dernier s'est également amélioré (cf. Figure S2, Annexe F pour les performances individuelles).

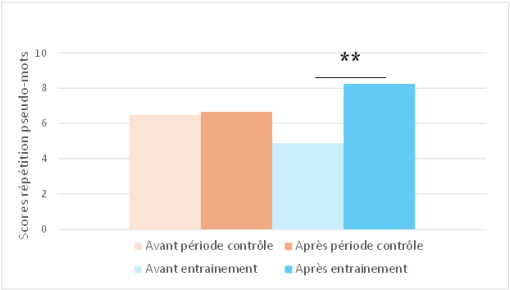


Figure 4

Moyenne des scores de l'ensemble des participants en répétition de pseudo-mots en pré-test et en post-test, pour chaque période.

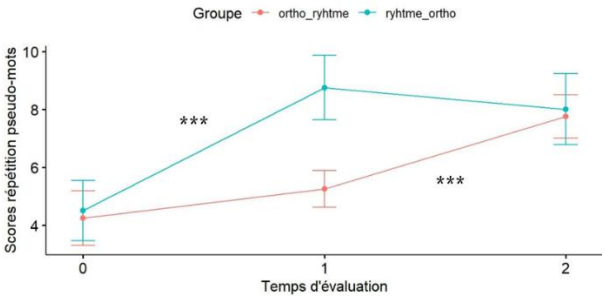


Figure 5

Moyenne et erreurs standards des scores de répétition de pseudo-mots selon les groupes et les temps d'évaluation.

3 Métaphonologie

Nous observons que les performances en métaphonologie s'améliorent entre le pré-test avant entrainement (M = 5.50) et le post-test après entrainement (M = 9.13) en comparaison à celles avant et après la période contrôle (respectivement M = 8.25 et M = 7.86 ; Figures 6 et 7). L'étude des performances individuelles montre que les huit participants se sont améliorés suite à l'entrainement rythmique (cf. Figure S3, Annexe F). Le test de Wilcoxon révèle un effet significatif de l'entrainement sur les scores des enfants (W = 0, p = .007) mais pas d'effet de la période contrôle (W = 14, p = .524).

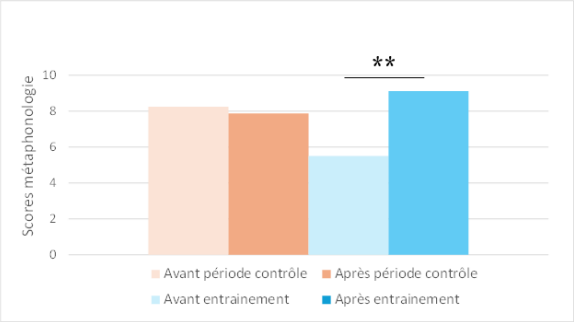


Figure 6

Moyenne des scores de l'ensemble des participants en métaphonologie en pré-test et post-test pour chaque période.

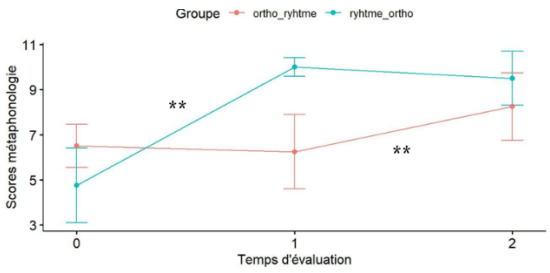


Figure 7

Moyenne et erreurs standards des scores de métaphonologie selon les groupes et les temps d'évaluation.

Les analyses par modèle mixte confirment ces résultats et montrent une amélioration significative des scores en métaphonologie suite à l'entrainement par rapport à la période sans entrainement ($t(16) = 3.19$, $p = .005$). L'effet de Maintien des performances n'est en revanche pas significatif ($t(16) = 1.73$, $p = .102$; Figure 7). Nous ne relevons pas non plus d'effet d'Ordre ($t(14) = 0.104$, $p = .918$) ni d'interaction entre les facteurs Rythme et Ordre ($t(13) = -1.761$, $p = .101$). L'effet de l'entrainement rythmique est donc présent que ce soit pour les enfants ayant commencé par l'entrainement ou ceux ayant commencé par la période sans entrainement (Figure 7).

4 Jugement de grammaticalité

Les moyennes des scores de jugement de grammaticalité augmentent de 6.88 avant l'entrainement à 9.13 suite à l'entrainement, tandis qu'elles diminuent sensiblement de 8.25 à 8.13 suite à la période contrôle (Figure 8). Selon le test de Wilcoxon, cette amélioration des performances avec l'entrainement n'est pas significative même si elle approche du seuil de significativité ($W = 5$, $p = .072$). Aucun effet significatif de la période contrôle n'est relevé ($W = 9$, $p = .785$). Le modèle mixte met en revanche en évidence une amélioration significative des performances au jugement de grammaticalité par rapport à la période sans entrainement ($t(19) = 2.13$, $p = .046$; Figure 9). Comme illustré sur la Figure S4 en Annexe F, les performances augmentent en effet pour cinq participants sur huit suite à l'entrainement (P1, P2, P5, P6, P8), alors que seuls trois enfants s'améliorent après la période contrôle (P4, P6, P8). Nous ne relevons pas d'effet significatif de Maintien des performances ($t(19) = 1.40$, $p = .177$) ni d'effet d'Ordre ($t(19) = -0.12$, $p = .908$) ou d'interaction entre les facteurs Rythme et Ordre ($t(19) = -0.84$, $p = .411$).

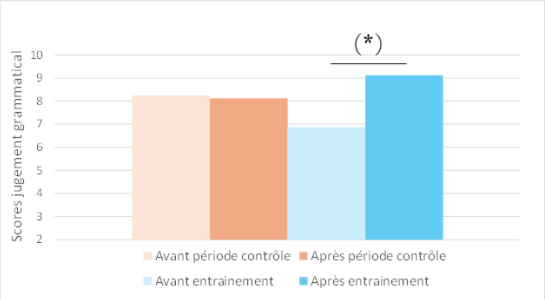


Figure 8

Moyenne des scores de l'ensemble des participants en jugement de grammaticalité en pré-test et post-test pour chaque période. (*) indique une différence significative entre les conditions pour le modèle mixte et un effet tendanciel pour le test de Wilcoxon.

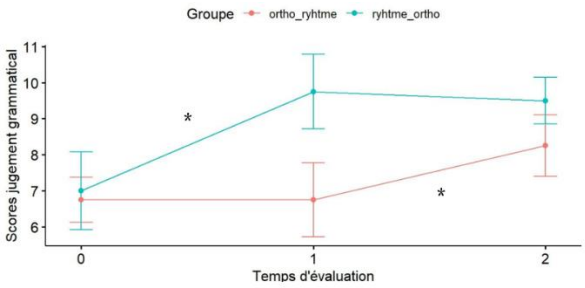


Figure 9

Moyenne et erreurs standards des scores de jugement de grammaticalité selon les groupes et les temps d'évaluation.

Selon le type de test utilisé, les résultats diffèrent quelque peu puisque la prise en compte des différences inter-individuelles dans le modèle mixte suggère une amélioration en jugement grammatical suite à l'entrainement même s'il est difficile de conclure fermement sur cet effet.

5 Complétion de phrases

Le test de Wilcoxon montre un effet significatif de l'entrainement rythmique avec une différence entre les scores au pré-test et au post-test pour la complétion de phrases (W = 0, p = .007 ; Figure 10). La différence entre pré- et post-test après la période contrôle n'est par contre pas significative (W = 11, p = 1). En effet, la moyenne des scores en complétion de phrases s'améliore considérablement suite à l'entrainement rythmique en passant de 12.38 à 17.25, comparativement à la période sans entrainement où elle reste sensiblement la même, de 15.38 à 15.25. Le modèle mixte confirme l'effet significatif de l'entrainement rythmique sur les compétences morphosyntaxiques en expression (t(15) = 2.50, p = .024) et révèle également un effet significatif de Maintien des compétences (t(15) = 4.27, p < .001). L'amélioration des performances des enfants ayant commencé par l'entrainement a ainsi perduré suite à la deuxième période sans entrainement (Figure 11 ; différence entre t1 et t2 pour le groupe rythme_ortho). Ceci est observé chez les quatre enfants du groupe 1 (cf. Figure S5, Annexe F). Nous n'observons pas d'effet significatif d'Ordre (t(14) = -1.53, p = .148), ni d'interaction Rythme × Ordre (t(13) = 0.65, p = .526). L'entrainement rythmique bénéficie donc à la complétion de phrases, quel que soit l'ordre dans lequel il a été proposé.

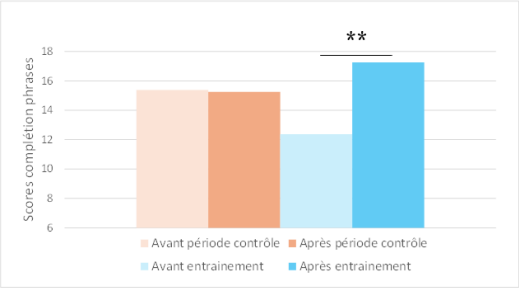


Figure 10

Moyenne des scores de l'ensemble des participants en complétion de phrases en pré-test et post-test pour chaque période.

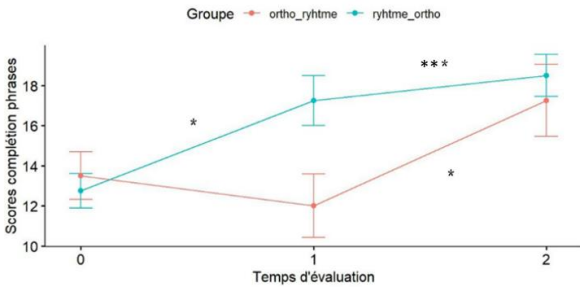


Figure 11

Moyenne et erreurs standards des scores de complétion de phrases selon les groupes et les temps d'évaluation.

6 Compréhension de phrases

Nous observons une amélioration des scores moyens en compréhension de phrases suite à l'entrainement puisque ceux-ci passent de 22.25 en pré-test à 25.25 en post-test, alors que l'évolution est plus faible, de 23.75 à 24.50, suite à la période avec rééducation orthophonique uniquement (Figure 12). Le test de Wilcoxon révèle un effet significatif de l'entrainement sur les performances morphosyntaxiques en compréhension (W = 1.50, p = .021), alors que l'effet de la période contrôle n'est pas significatif (W = 12.50, p = .482).

Cependant, lorsque les analyses prennent en compte les effets d'Ordre et d'interaction entre Rythme et Ordre, ainsi que le facteur Sujets en effet aléatoire, les résultats diffèrent. En effet, l'entrainement n'a pas d'effet significatif sur la morphosyntaxe en compréhension selon le modèle mixte ($t(13) = 0.09$, $p = .933$), bien que six enfants sur huit (excepté P1 et P2) se soient améliorés (cf. Figure S6, Annexe F). On note malgré tout un effet significatif de Maintien pour tous les participants ayant bénéficié de l'entrainement en première période ($t(13) = 3.60$, $p = .003$; Figure 13 et Figure S6, Annexe F). L'effet d'Ordre ($t(13) = -1.61$, $p = .131$) n'est pas significatif, en revanche l'interaction Rythme × Ordre approche du seuil de significativité ($t(12) = 2.13$, $p = .054$). Ce dernier résultat suggère que les enfants du groupe 2 ayant réalisé l'entrainement après la période contrôle tendent à s'améliorer de façon plus importante après l'entrainement que les enfants du groupe 1 ayant bénéficié de l'entrainement en premier (quatre enfants sur quatre pour le groupe 2 vs deux enfants sur quatre pour le groupe 1, cf. Figure S6, Annexe F).

Les résultats diffèrent donc selon les analyses statistiques utilisées, ce qui ne nous permet pas d'affirmer clairement l'amélioration en compréhension de phrases suite à l'entrainement rythmique.

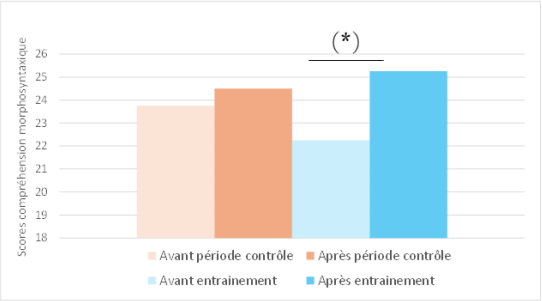


Figure 12

Moyenne des scores de l'ensemble des participants en compréhension de phrases en pré-test et post-test pour chaque période. (*) indique une différence significative entre conditions uniquement pour le test de Wilcoxon.

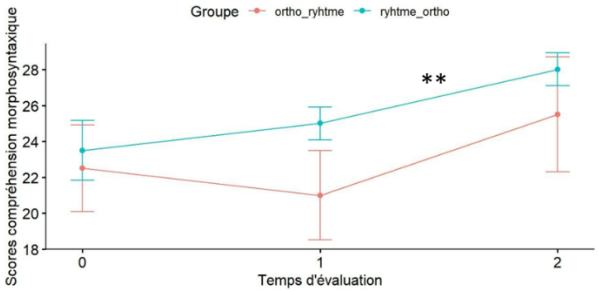


Figure 13

Moyenne et erreurs standards des scores de compréhension de phrases selon les groupes et les temps d'évaluation.

Pour résumer, nous observons des effets significatifs clairs de l'entrainement rythmique sur les performances en répétition de pseudo-mots, en métaphonologie et en complétion de phrases, quelle que soit l'approche statistique utilisée. Un effet significatif de maintien des performances est en outre observé pour la complétion de phrases. L'effet de l'entrainement sur le jugement de grammaticalité semble quant à lui tendanciel. Pour la discrimination phonologique et la compréhension de phrases, les résultats diffèrent selon les tests statistiques utilisés, avec malgré tout un effet de maintien des compétences morphosyntaxiques en compréhension après la période d'entrainement. Les modèles mixtes

ont également permis d'écarter un effet d'ordre pour toutes les variables, à savoir que les scores obtenus par les enfants n'ont pas été influencés par l'ordre des périodes d'entrainement ou de contrôle. L'interaction Rythme × Ordre est significative pour la répétition de pseudo-mots où un groupe semble avoir davantage bénéficié de l'entrainement lorsque celui-ci était proposé en premier, et dans une moindre mesure pour la compréhension de phrases où c'est le groupe qui a réalisé l'entrainement en deuxième période qui s'est le plus amélioré.

IV Discussion et conclusion

1 Recontextualisation de l'étude

Cette étude avait pour objectif de tester l'effet d'un entrainement rythmique et moteur sur le langage de huit enfants de 7 à 9 ans porteurs de TDL. L'entrainement a été réalisé à partir de la méthode Brain Ball® pendant quatre semaines et a été comparé à une période de même durée de rééducation orthophonique seule selon un design en *cross-over*. Les participants ont été répartis en deux groupes : le premier a commencé par la période d'entrainement et a poursuivi avec la période contrôle, et le second a fait l'inverse. Les performances langagières ont été évaluées à trois reprises : avant l'entrainement, après l'entrainement et après la période contrôle pour le premier groupe (et pour le second, avant la période contrôle, après la période contrôle puis après l'entrainement). Notre hypothèse était que l'entrainement sensori-moteur au Brain Ball® bénéficierait aux performances phonologiques et morphosyntaxiques des enfants porteurs d'un TDL.

2 Effet de l'entrainement rythmique et moteur sur la phonologie

Le rythme joue un rôle essentiel dans le traitement du langage puisque le signal de parole suit un schéma quasi-rythmique. En effet, identifier les régularités rythmiques bénéficie dès le plus jeune âge à la segmentation du flux de parole, ce qui permet un bon développement langagier (Mehler & Christophe, 1995 ; Millotte & Christophe, 2009). Des corrélations entre les compétences rythmiques et langagières sont ainsi souvent retrouvées pour la phonologie (Moritz et al., 2013 ; Plart, 2021). Nous avions donc émis l'hypothèse qu'un entrainement rythmique et moteur basé sur le Brain Ball® améliorerait les performances phonologiques des enfants porteurs d'un TDL. Les différentes analyses statistiques menées révèlent que l'entrainement a significativement bénéficié à certaines compétences phonologiques, à savoir la répétition de pseudo-mots et la métaphonologie, avec une amélioration des scores suite à l'entrainement chez les huit enfants inclus. Cette amélioration n'a pas été mise en évidence après la période contrôle, ce qui souligne la spécificité de l'entrainement mis en place. L'entrainement rythmique semble donc avoir bénéficié aux compétences phonologiques des enfants avec TDL, ce qui confirme les données de précédentes études montrant par exemple les effets du rythme sur la conscience phonologique (Bhide et al., 2013) et la production phonologique (Fénéon, 2019 ; Lloret, 2018 ; Louvel, 2019). Nous pouvons ainsi supposer que

l'implication du corps en rythme (dans les mouvements avec le sac de sable et la balle) a favorisé la mise en lien des systèmes auditif et moteur (Fiveash et al., 2021) et a permis de diriger l'attention sur le signal externe afin d'obtenir une meilleure synchronisation rythmique (théorie de l'attention dynamique ; Jones, 1976). Cette synchronisation sensori-motrice favorisée aurait alors bénéficié au découpage de la parole entendue et à la perception des syllabes et des phonèmes (Harding et al., 2019), améliorant par conséquent les capacités en répétition de pseudo-mots et en métaphonologie chez les enfants.

Il est important de souligner que ces améliorations consécutives à l'entrainement rythmique n'ont pas différé selon les groupes, à savoir selon si l'enfant a débuté par l'entrainement ou par la période contrôle, ce qui exclut un simple effet test-retest. Nos données actuelles ne montrent pas d'effet de maintien dans le temps des compétences en phonologie puisque les performances des quatre enfants ayant bénéficié de l'entrainement en première période n'ont pas continué de s'améliorer de manière significative en seconde période. Un plus grand échantillon ou un entrainement de plus longue durée seraient nécessaires pour déterminer une éventuelle persistance de l'effet de l'entrainement rythmique moteur sur la phonologie.

Les résultats à l'épreuve de discrimination phonologique semblent plus mitigés avec un effet bénéfique significatif de l'entrainement mis en évidence dans une seule des deux analyses statistiques menées. En effet, au regard des performances individuelles, six enfants sur huit se sont améliorés suite à l'entrainement mais cinq enfants se sont également améliorés suite à la période contrôle (dont trois ayant progressé lors de l'entrainement). Cela pourrait expliquer l'effet moins important de l'entrainement pour cette épreuve. L'échec potentiel de l'effet de l'entrainement sur la perception phonologique ne confirme donc pas notre hypothèse, un échantillon plus important permettrait là encore de fournir plus d'éléments en sa faveur ou non. Ce résultat ne soutient pas non plus la littérature qui décrit souvent une amélioration de la discrimination phonologique pour des entrainements relativement similaires chez des enfants porteurs de TDL (Fromageau, 2019 ; Lloret, 2018). Cette divergence pourrait s'expliquer d'une part par le fait que ces études ont été menées sur un plus grand nombre d'enfants (respectivement 14 et 18). D'autre part, l'étude de Fromageau (2019) a été réalisée sur une période plus longue (un trimestre), ce qui a pu permettre une amélioration plus importante des compétences de discrimination phonologique. Notons toutefois que certaines études n'ont pas montré pas d'effets du rythme sur la conscience phonologique (e.g., suppression ou reconnaissance du phonème initial, détection de rimes etc.), en tout cas chez des personnes neurotypiques (Patscheke et al., 2018 ; Yu et al., 2017).

Dans l'ensemble, les résultats sont prometteurs puisqu'ils révèlent un effet significatif de l'entrainement rythmique sur certaines compétences phonologiques évaluées (métaphonologie et répétition de pseudo-mots), même si les résultats en discrimination phonologique sont moins concluants. L'entrainement aurait donc permis aux enfants d'affiner

leur sensibilité aux informations auditives temporelles (en accord avec la *Precise Auditory Timing Hypothesis*, PATH; Tierney & Kraus, 2014), améliorant la production et la manipulation des phonèmes (Fiveash & Tillmann, 2024).

3 Effet de l'entrainement rythmique et moteur sur la morphosyntaxe

Les résultats en morphosyntaxe confirment partiellement notre hypothèse selon laquelle l'entrainement au Brain Ball® bénéficierait aux compétences morphosyntaxiques des enfants porteurs d'un TDL, avec des améliorations sur certaines des compétences évaluées seulement. En particulier, la production morphosyntaxique avec l'épreuve de complétion de phrases s'est significativement améliorée, avec une progression des scores chez la totalité des enfants suite à l'entrainement rythmique, ce qui n'est pas le cas pour la période contrôle. De façon tout à fait intéressante, on observe un maintien des performances lors de la deuxième période pour les enfants ayant bénéficié de l'entrainement en première période. Les enfants du premier groupe ont donc encore bénéficié de l'entrainement un mois plus tard. Comme pour la phonologie, les résultats n'ont pas différé selon si les enfants ont débuté par l'entrainement ou par la période contrôle. Même si peu d'études à notre connaissance ont prouvé l'effet du rythme sur la morphosyntaxe chez les enfants porteurs de TDL (Brittain, 2023), nos résultats corroborent l'idée selon laquelle l'entrainement au rythme, sur des séquences rythmiques relativement lentes, permet une meilleure segmentation de la parole entendue (Fiveash et al., 2021 ; Francois et al., 2013) et ainsi l'extraction des éléments morphosyntaxiques des phrases, ce qui faciliterait ensuite la production d'énoncés cohérents. Conformément à la littérature, nous nous attendions à observer des effets de l'entrainement rythmique sur le jugement de grammaticalité de phrases (Bedoin et al. 2016 ; Chern et al., 2018 ; Schön & Tillmann, 2015). Nos résultats restent cependant nuancés, avec un effet significatif ou proche de la significativité en fonction de l'analyse statistique réalisée. Ces données sont donc encourageantes et tendent à suggérer un potentiel bénéfice de l'entrainement rythmique, qui conduit à une amélioration des scores pour juger de la grammaticalité des phrases entendues chez cinq enfants sur huit. Un effectif plus important pourrait probablement confirmer ce résultat. Il faut noter que les études montrant des bénéfices du rythme sur des tâches de jugement de grammaticalité utilisent souvent des amorces rythmiques (i.e. séquences auditives régulières) après lesquelles les phrases sont présentées immédiatement. La procédure dans notre étude était différente puisque nous avons évalué les compétences grammaticales des enfants après un entrainement rythmique d'un mois. Cette procédure est plutôt comparable à celle mise en place dans certains mémoires d'orthophonie qui n'ont pas observé d'effets de l'entrainement sur le jugement de grammaticalité (Fromageau, 2019 ; Lafont, 2022). Si nos résultats se confirmaient sur un plus grand

échantillon d'enfants, cela suggèrerait que des améliorations sont possibles même lorsque l'épreuve langagière est proposée après un délai de plusieurs semaines.

Enfin, peu d'études à notre connaissance montrent des effets significatifs d'entrainements rythmiques sur les performances en compréhension de phrases (Benhaim, 2020). Notre étude révèle à cet égard des résultats quelque peu mitigés, avec une amélioration des scores à l'épreuve de compréhension de phrases après l'entrainement au Brain Ball® chez six enfants sur huit mais qui n'apparait significative que dans une seule analyse statistique réalisée. Les résultats suggèrent en outre une interaction de l'effet de l'entrainement avec l'ordre dans lequel il a été proposé : trois enfants sur quatre s'améliorent dans le groupe ayant réalisé l'entrainement en deuxième période, tandis que seulement deux enfants s'améliorent dans le groupe l'ayant réalisé en première période (avec des améliorations moins importantes). Même si les profils des enfants inclus et les groupes sont les plus homogènes possible (Annexe A), il n'est pas exclu que des différences interindividuelles influent sur l'évolution des performances des enfants. En effet, nous remarquons que les quatre enfants pour lesquels le protocole a été simplifié (P1, P2, P6 et P7; Annexe A), sont souvent parmi ceux dont les scores diminuent suite à l'entrainement ou pour qui les améliorations sont les moins franches (Annexe F). Par exemple, pour l'épreuve de compréhension de phrases, P1 et P2 voient leur score diminuer en post-test alors que ce n'est pas le cas des deux autres enfants de leur groupe chez qui le protocole a été appliqué comme prévu initialement.

Nos données actuelles ne nous permettent donc pas de tirer de conclusion claire, ni de valider notre hypothèse sur l'effet du Brain Ball® sur la compréhension de phrases. Il serait nécessaire d'intégrer plus de participants pour observer les effets sur une plus grande cohorte afin d'approfondir la recherche. Peu d'études à ce jour ont intégré la motricité à leur entrainement comme c'est le cas dans le Brain Ball®, et nous pouvons espérer que, sur un plus grand échantillon d'enfants, bouger en rythme pourrait constituer une plus-value et améliorer de manière significative les scores de compréhension morphosyntaxique. En effet, impliquer le corps en tapant en rythme par exemple permet une meilleure détection du rythme (Falk et al., 2017 ; Schön et al., 2015 ; Su & Poppel, 2012). Réaliser des exercices avec des balles et des sacs sur un rythme relativement lent pourrait alors bénéficier au traitement des unités de la phrase et par conséquent à la compréhension en morphosyntaxe.

Dans l'ensemble, nos résultats sont prometteurs et suggèrent que l'entrainement Brain Ball®, impliquant de travailler avec des séquences rythmiques à des fréquences comprises entre 1.1 et 1.4 Hz, soit le rythme delta/phrastique, bénéficie à la morphosyntaxe en production mais que cet effet est plus mitigé sur les performances en compréhension. L'entraînement a malgré tout probablement renforcé la synchronisation aux indices externes rythmiques, ce qui aurait favorisé une meilleure extraction des unités prosodiques jouant un rôle clé dans la structure grammaticale des phrases. Cela aurait permis aux enfants d'affiner leur analyse des

indices morphosyntaxiques, d'améliorer leurs capacités de prédiction des marqueurs morphosyntaxiques (Cason & Schön, 2012) et donc de mieux produire les phrases.

Enfin, nous pouvons rappeler que les enfants ont été très motivés et ont pris beaucoup de plaisir à réaliser les exercices du Brain Ball®, ce qui a sûrement contribué à l'efficacité de l'entrainement proposé.

4 Limites et perspectives

À notre connaissance, aucune étude n'a mis en place d'entrainement rythmique chez des enfants porteurs de TDL avec une implication similaire du corps et de la motricité. En effet, les études expérimentales évaluant l'effet du rythme sur le langage et impliquant le système sensori-moteur intègrent le plus souvent des exercices de tapping et de percussions sur des séquences rythmiques (Gindre, 2024 ; Ladányi, 2022 ; Rathcke et al., 2021). Dans notre travail, nous avons souhaité mettre davantage l'accent sur l'aspect moteur en impliquant des mouvements du corps plus complexes et une coordination sensori-motrice fine. En effet, les exercices Brain Ball® en binôme nécessitent des mouvements de tout le corps et une coordination précise comme pour envoyer en boucle une balle, voire deux, au partenaire et la récupérer en rythme.

Nous avons veillé à minimiser autant que possible les biais dans notre étude, mais certaines limites peuvent néanmoins être identifiées.

Tout d'abord, concernant la population de l'étude, notre échantillon était de huit enfants, ce qui est relativement faible pour une étude expérimentale. Cependant, compte tenu des difficultés de recrutement dans les écoles, des critères de sélection à respecter, du temps que l'entrainement a nécessité et du temps alloué pour ce travail de mémoire, il aurait été difficile d'intégrer davantage d'enfants à l'entrainement au Brain Ball®. Nous avons donc fait au mieux pour recruter un maximum d'enfants dans le temps imparti tout en ayant des profils TDL les plus purs possible.

Ensuite, concernant les épreuves d'évaluation langagière, nous avons minimisé la possibilité d'un effet test/retest en proposant des tests différents aux trois temps d'évaluation (pré-test, post-test 1 et post-test 2), distants de quatre semaines. Nous avons pour cela regroupé différentes batteries de tests standardisées pour créer, pour chaque épreuve, trois listes d'items en les appariant de notre mieux en termes de difficultés. Cela a toutefois pu engendrer des biais dans les résultats obtenus comme la possibilité que certains items aient malgré tout été plus difficiles à traiter dans un test que dans un autre. De plus, certains tests comportent moins d'items que dans les batteries standardisées : par exemple, nous avons proposé aux enfants 12 pseudo-mots à répéter alors que le test d'EVALEO 6-15 en comporte 20, ce qui pourrait affecter la fiabilité des résultats. De plus, il aurait été préférable de créer un 4ème test afin de réaliser une évaluation pré-test/post-test pour la période d'entrainement et

une évaluation pré-test/post-test pour la période contrôle, ce qui n'a pas été possible pour des questions d'organisation et de disponibilité des enfants et de leurs parents (e.g., temps imparti pour la réalisation du mémoire, vacances scolaires). Créer un 4ème test composé d'items différents des trois autres tests à partir des mêmes batteries parait néanmoins difficile.

Un autre point concerne les entrainements au Brain Ball® qui ont nécessité un investissement des enfants mais également de leurs parents tout au long du protocole. Pour un entrainement intensif, il est possible que la mise en place d'exercices à la maison soit indispensable afin d'observer des bénéfices sur le langage tels que rapportés dans notre étude. L'entraînement à domicile, bien que limité à 5 à 10 minutes et généralement motivant pour les enfants, a tout de même occupé certaines de leurs fins de journée ainsi que celles de leurs parents. Nous pouvons ainsi envisager des perspectives pour les séances d'orthophonie, mais cela impliquerait probablement un entraînement sur une durée plus longue afin de limiter l'investissement demandé aux enfants et aux parents à domicile.

Nous pouvons enfin souligner qu'il ne s'agit pas d'appliquer un protocole mais d'adapter la formation Brain Ball® à chaque enfant. En effet, chaque enfant avait un niveau de synchronisation rythmique, de coordination, de concentration et de motricité différent : certains ont réalisé tous les exercices rythmiques prévus dans le protocole alors que d'autres ont eu plus de difficultés. Par conséquent, il a été nécessaire d'adapter les différents exercices au profil de chacun. En effet, trois enfants parmi les huit ont difficilement intégré les exercices de manipulation de balles (rattraper la balle en rythme par exemple). Il a été indispensable de passer plus de temps sur les exercices avec les sacs lestés, d'intégrer une plus grosse balle aux exercices, d'en simplifier certains, de ralentir certains rythmes voire parfois de rester sur des rythmes de métronome sans y ajouter de séquences musicales. Nous avons considéré que diminuer la difficulté des exercices nous éviterait de perdre trop de temps sur un travail qui serait davantage moteur que rythmique et qui nous détournerait de nos objectifs initiaux. Pour d'autres enfants au contraire, nous avons même pu réaliser des exercices de groupe à trois (en prenant les enfants par deux) au cours de la dernière semaine. Cela n'était pas prévu dans le protocole expérimental initial mais leur motivation et leur progression nous ont permis d'aller plus loin (surtout avec les enfants du premier groupe, ayant suivi l'entrainement en première période).

Nos premiers résultats suite à l'entrainement au Brain Ball® corroborent non seulement les résultats de la littérature quant à l'effet des entrainements rythmiques sur les compétences langagières des enfants TDL mais ils les étendent également en s'appuyant sur l'implication et la coordination motrice. De plus, ils ouvrent de nouvelles perspectives quant à leur impact potentiel sur la morphosyntaxe, un aspect encore peu documenté.

Dans l'ensemble, notre étude ouvre des perspectives intéressantes pour l'orthophonie. En effet, nous pouvons imaginer que l'entrainement au Brain Ball® pourrait tout à fait être intégré

à des séances d'orthophonie pour des enfants porteurs de TDL : avec ou sans entrainement à la maison, en groupe ou avec l'orthophoniste uniquement. Compte tenu de la grande motivation des enfants au cours de l'entrainement (certains enfants ont souhaité s'entrainer tous les jours et tous ont pris énormément de plaisir à réaliser les entrainements), cela permettrait également de motiver davantage les patients avec une rééducation plus ludique qui ne porte pas uniquement sur des exercices langagiers. Cette motivation pourrait ainsi être bénéfique à leur rééducation orthophonique.

Il serait ainsi intéressant de poursuivre cette étude avec un échantillon plus important d'enfants porteurs de TDL et idéalement avec un protocole expérimental un peu plus long, de six semaines par exemple, à raison de deux ou trois séances d'entrainement par semaine, et de deux courtes séances à la maison pour soulager le suivi à la maison tout en s'assurant d'un entrainement intensif. Nous pourrions également évaluer l'effet du Brain Ball® sur les compétences rythmiques des enfants. Même si nous n'avons pas analysé l'évolution de ces performances dans la présente étude, qualitativement, la synchronisation rythmique nous a semblé meilleure suite à l'entrainement et il serait intéressant d'objectiver cette observation. Évaluer de façon plus approfondie les effets du Brain Ball® sur la phonologie et la morphosyntaxe chez les enfants porteurs de TDL pourrait enfin également passer par l'évaluation d'un éventuel maintien des performances sur du long terme, avec une évaluation *follow-up* plusieurs semaines après l'arrêt de l'entrainement.

Conclusion

Dans la continuité des recherches existantes, notre objectif était de démontrer que le développement des compétences de synchronisation rythmique et motrice, à travers la méthode Brain Ball®, pouvait renforcer les capacités phonologiques et morphosyntaxiques des enfants avec un TDL. Les résultats présentés sont très prometteurs et ouvrent de nouvelles pistes de remédiation pour la rééducation orthophonique. Bien que de plus en plus reconnus par les orthophonistes pour leur efficacité en rééducation, les exercices rythmiques restent encore peu exploités, insuffisamment connus et font l'objet de recherches scientifiques encore limitées. Nous ne pouvons donc qu'inviter les orthophonistes à sensibiliser leurs patients au rythme tout en mobilisant la motricité des enfants lors des entrainements rythmiques. Il apparait important de développer des outils axés sur le rythme et impliquant le corps afin de soutenir la prise en soin orthophonique

V Références

Baayen, R. H. (2008). Analyzing Linguistic Data: A Practical Introduction to Statistics using R. *Cambridge University Press*.

Baayen, R. H., Davidson, D. J., & Bates, D. M. (2008). Mixed-Effects Modeling with Crossed Random Effects for Subjects and Items. *Journal of Memory and Language*, 59(4), 390-412.

Barsalou, L. W. (2008). Grounded cognition. *Annual Review of Psychology*, *59*, 617-645. https://doi.org/10.1146/annurev.psych.59.103006.093639

Bedoin, N., Brisseau, L., Molinier, P., Roch, D., & Tillmann, B. (2016). Temporally Regular Musical Primes Facilitate Subsequent Syntax Processing in Children with Specific Language Impairment. *Frontiers in Neuroscience*, 10, 245. https://doi.org/10.3389/fnins.2016.00245

Benhaïm, O. (2020). *Amorçage rythmique : Renforcement d'un entraînement morphosyntaxique et transfert à l'attention soutenue d'enfants TDL*. [Mémoire orthophonie]. Sorbonne université de Paris.

Berger, H. (1929). Uber das Elektrenkephalogramm des Menschen. European Archives of Psychiatry and Clinical Neuroscience, 87(1), 527–570. https://doi.org/10.1007/BF01797193

Bhide, A., Power, A., & Goswami, U. (2013). A Rhythmic Musical Intervention for Poor Readers: A Comparison of Efficacy With a Letter-Based Intervention. *Mind, Brain, and Education*, *7*(2), 113-123. https://doi.org/10.1111/mbe.12016

Bishop, D. V. M., Snowling, M. J., Thompson, P. A., Greenhalgh, T., & CATALISE consortium. (2016). CATALISE: A Multinational and Multidisciplinary Delphi Consensus Study. Identifying Language Impairments in Children. *PloS One,* 11(7), e0158753. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0158753

Bolduc, J., Gosselin, N., Chevrette, T., & Peretz, I. (2021). The impact of music training on

inhibition control, phonological processing, and motor skills in kindergarteners: A randomized control trial. *Early Child Development and Care*, 191(12), 1886-1895. https://doi.org/10.1080/03004430.2020.1781841

Bolduc, J., & Rondeau, J. (2015). Rythmons les apprentissages ! *Langage et pratiques,* 56,15-22.

Bolduc, J., & Lefebvre, P. (2012). Using Nursery Rhymes to Foster Phonological and Musical Processing Skills in Kindergarteners. *Creative Education*, 03(04), 495-502. https://doi.org/10.4236/ce.2012.34075

Bonacina, S., Cancer, A., Lanzi, P. L., Lorusso, M. L., & Antonietti, A. (2015). Improving reading skills in students with dyslexia: The efficacy of a sublexical training with rhythmic background. *Frontiers in Psychology*, 6. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01510

Brain Ball® - Jonglage coopératif, rythmique et musical. (s.d.). Consulté 15 avril 2025, à l'adresse https://brainball.fr/

Brittain, E. (2023). *Effets d'un entraînement rythmique de 2 périodes de 3 semaines sur les compétences langagières d'enfants ayant un Trouble Développemental du Langage* [Mémoire orthophonie]. Université Lyon 1

Buzsáki, G., & Draguhn, A. (2004). Neuronal oscillations in cortical networks. Science (New York, N.Y.), 304(5679), 1926 1929. https://doi.org/10.1126/science.1099745

Caccia, M., & Lorusso, M. L. (2021). The processing of rhythmic structures in music and prosody by children with developmental dyslexia and developmental language disorder. *Developmental Science*, 24(1), e12981. https://doi.org/10.1111/desc.12981

Canette, L.-H., Fiveash, A., Krzonowski, J., Corneyllie, A., Lalitte, P., Thompson, D., Trainor, L., Bedoin, N., & Tillmann, B. (2020a). Regular rhythmic primes boost P600 in grammatical error processing in dyslexic adults and matched controls. *Neuropsychologia*, 138, 107324. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.107324

Canette, L.-H., Lalitte, P., Bedoin, N., Pineau, M., Bigand, E., & Tillmann, B. (2020b). Rhythmic and textural musical sequences differently influence syntax and semantic processing in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 191, 104711. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2019.104711

Cason, N., & Schön, D. (2012). Rhythmic priming enhances the phonological processing of speech. *Neuropsychologia*, 50(11), 2652-2658. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2012.07.018

Chern, A., Tillmann, B., Vaughan, C., & Gordon, R. L. (2018). New evidence of a rhythmic priming effect that enhances grammaticality judgments in children. J*ournal of experimental child psychology,* 173, 371-379. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2018.04.007

Choi, W., Veronica K., Siu-Hang K, Alfredo B. (2024). Examining the Cognitive and Perceptual Perspectives of Music-to-Language Transfer: A Study of Cantonese-English Bilingual Children. *Journal of Experimental Child Psychology* 249, 106069. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2024.106069.

Cogni-Sciences. (2010). *Batterie Analytique du Langage Ecrit (BALE)*. UPMF. https://dle.ac-mayotte.fr/La-batterie-analytique-du-langage-ecrit-Outil-cognisciences-BALE.html

Colling, L. J., Noble, H. L., & Goswami, U. (2017). Neural Entrainment and Sensorimotor Synchronization to the Beat in Children with Developmental Dyslexia: An EEG Study. *Frontiers in Neuroscience*, 11, 360. https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00360

Corriveau, K. H., & Goswami, U. (2009). Rhythmic motor entrainment in children with speech and language impairments: Tapping to the beat. *Cortex*, 45(1), 119-130. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.09.008

Corriveau, K., Pasquini, E., & Goswami, U. (2007). Basic auditory processing skills and specific language impairment: A new look at an old hypothesis. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research,* 50(3), 647-666. https://doi.org/10.1044/1092-

4388(2007/046)

Cumming, R., Wilson, A., Leong, V., Colling, L., & Goswami, U. (2015a). Awareness of Rhythm Patterns in Speech and Music in Children with Specific Language Impairments. *Frontiers in Human Neuroscience*, 9. https://doi.org/10.3389/fnhum.2015.00672

Cumming, R., Wilson, A., & Goswami, U. (2015b). Basic auditory processing and sensitivity to prosodic structure in children with specific language impairments: A new look at a perceptual hypothesis. *Frontiers in Psychology,* 6. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2015.00972

D'Ausilio, A., Pulvermüller, F., Salmas, P., Bufalari, I., Begliomini, C., & Fadiga, L. (2009). The Motor Somatotopy of Speech Perception. *Current Biology*, *19*(5), 381-385. https://doi.org/10.1016/j.cub.2009.01.017

David, D., Wade-Woolley, L., Kirby, J. R., & Smithrim, K. (2007). Rhythm and reading development in school-age children: A longitudinal study. *Journal of Research in Reading*, 30(2), 169-183. https://doi.org/10.1111/j.1467-9817.2006.00323.x

Degé, F., & Schwarzer, G. (2011). The Effect of a Music Program on Phonological Awareness in Preschoolers. *Frontiers in Psychology*, 2. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2011.00124

Deltour, J.-J. (2002). *Test de Closure Grammaticale TCG-R : Version révisée*. Application des Techniques Modernes.

Dondena, C., Riva, V., Molteni, M., Musacchia, G., & Cantiani, C. (2021). Impact of Early Rhythmic Training on Language Acquisition and Electrophysiological Functioning Underlying Auditory Processing: Feasibility and Preliminary Findings in Typically Developing Infants. *Brain Sciences*, 11(11), Article 11. https://doi.org/10.3390/brainsci11111546

Dunand-Cheraba, S., & Moles-Roulet, N. (2021). *Remédiation phonologique et morphosyntaxique par la musique : Enfants avec Trouble Développemental du Langage (TDL*). (Mémoire orthophonie). Sorbonne Université.

Falk, S., Volpi-Moncorger, C., & Dalla Bella, S. (2017). Auditory-motor rhythms and speech processing in French and German listeners. *Frontiers in Psychology*, *8*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.00395

Fénéon, P. (2019). *Effets d'un entraînement rythmique multimodal sur les habiletés phonologiques d'enfants d'âge préscolaire présentant un trouble phonologique* [Mémoire orthophonie]. Université Lyon 1.

Fernández-Merino, L., Lizarazu, M., Molinaro, N., Kalashnikova, M. (2024). Temporal Structure of Music Improves the Cortical Encoding of Speech. *bioRxiv*, 14 juin 2024. https://doi.org/10.1101/2024.06.14.598982.

Fiveash, A., & Tillmann, B. (2024). *Shared Mechanisms for the Processing of Rhythm in Music and Speech*. OSF. https://doi.org/10.31234/osf.io/hnk9t

Fiveash, A., Bedoin, N., Gordon, R. L., & Tillmann, B. (2021). Processing rhythm in speech and music : Shared mechanisms and implications for developmental speech and language disorders. *Neuropsychology*, *35*(8), 771-791. https://doi.org/10.1037/neu0000766

Flaugnacco, E., Lopez, L., Terribili, C., Montico, M., Zoia, S., & Schön, D. (2015). Music Training Increases Phonological Awareness and Reading Skills in Developmental Dyslexia : A Randomized Control Trial. *PloS One*, *10*(9), e0138715. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0138715

Flaugnacco, E., Lopez, L., Chiara, T., Zoia, S., Buda, S., Tilli, S., Monasta, L., Montico, M., Ronfani, L., Sila, A., & Schön, D. (2014). Rhythm Perception and Production Predict Reading Abilities in Developmental Dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience* 8, 392. https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.00392.

François, C., Chobert, J., Besson, M., & Schön, D. (2013). Music Training for the Development of Speech Segmentation. *Cerebral Cortex*, 23(9), 2038-2043. https://doi.org/10.1093/cercor/bhs180

Francois, C., & Schön, D. (2011). Musical expertise boosts implicit learning of both musical and linguistic structures. *Cerebral Cortex* (New York, N.Y.: 1991), 21(10), 2357-2365. https://doi.org/10.1093/cercor/bhr022

Fromageau, M. (2019). *Effet de la pratique du rythme musical sur le langage des enfants porteurs de troubles spécifiques du langage oral et écrit* [Mémoire d'orthophonie]. Université de Nantes

Gérard, C.-L. (1993). L'enfant dysphasique. Bruxelles : De Boeck Université. *Revue des sciences de l'éducation*, 21(2), 418. https://doi.org/10.7202/031797ar

Gerry, D., Unrau, A., & Trainor, L. J. (2012). Active music classes in infancy enhance musical, communicative and social development. *Developmental science, 15*(3), 398-407. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2012.01142.x

Gindre, A. (2024). *Du rythme à la parole : effet d'amorces rythmiques langagières, non langagières et musicales modulées par l'engagement moteur sur le temps d'initiation de la parole.* [Thèse de doctorat, Université de Toulouse]. Français. NNT: 2024TLSEJ048

Giraud, A.-L., & Poeppel, D. (2012). Cortical oscillations and speech processing: Emerging computational principles and operations. *Nature Neuroscience*, 15(4), 511-517. https://doi.org/10.1038/nn.3063

Giraud, A.-L., Kleinschmidt, A., Poeppel, D., Lund, T. E., Frackowiak, R. S. J., & Laufs, H. (2007). Endogenous Cortical Rhythms Determine Cerebral Specialization for Speech Perception and Production. *Neuron*, 56(6), 1127-1134. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.09.038

Goswami, U (2016). Rhythmic perception, music and language in children with SLI. *The Nuffield Foundation- Centre for Neuroscience in education*. https://www.cne.psychol.cam.ac.uk/people/themes/nuffield

Goswami, U. (2011). A temporal sampling framework for developmental dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(1), 3-10. https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.10.001

Guiraud, H., Bedoin, N., Krifi-Papoz, S., Herbillon, V., Caillot-Bascoul, A., Gonzalez-Monge, S., & Boulenger, V. (2018a). Don't speak too fast ! Processing of fast rate speech in children with specific language impairment. *PloS One*, *13*(1), e0191808. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0191808

Guiraud, H., Hincapié, A.-S., Jerbi, K., & Boulenger, V. (2018b). Perception de la parole et oscillations cérébrales chez les enfants neurotypiques et dysphasiques. *XXXIIe Journées d'Études sur la Parole*, 222-230. https://doi.org/10.21437/JEP.2018-26

Guiraud, H. (2017). *Symphonie des oscillations cérébrales lors de la perception de la parole : Études comportementale et en magnétoencéphalographie chez les enfants neurotypiques et dysphasiques* [Thèse de doctorat, Université de Lyon]. https://theses.hal.science/tel-01887759

HAS, (s. d.) *Troubles du neurodéveloppement : Repérage et orientation des enfants à risque*. Haute Autorité de Santé. https://www.has sante.fr/jcms/p_3161334/fr/troubles-du- neurodeveloppement-reperage-et-orientation-des-enfants-a-risque

Harding, E. E., Sammler, D., Henry, M. J., Large, E. W., & Kotz, S. A. (2019). Cortical tracking of rhythm in music and speech. *NeuroImage*, 185, 96–101

Huss, M., Verney, J. P., Fosker, T., Mead, N., & Goswami, U. (2011). Music, rhythm, rise time perception and developmental dyslexia: Perception of musical meter predicts reading and phonology. *Cortex*, 47(6), 674-689. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2010.07.010

Icht, M. (2019). Introducing the Beatalk technique: Using beatbox sounds and rhythms to

improve speech characteristics of adults with intellectual disability. *International Journal of Language & Communication Disorders*, 54(3), 401-416. https://doi.org/10.1111/1460-6984.12445

Jacquier-Roux, M., Lequette, C., Pouget, G., Valdois, S., & Zorman, M. (2010). BALE : Batterie Analytique du Langage Ecrit. Grenoble, Laboratoire des sciences de l'éducation, groupe cogni-sciences.

JASP Team. (2025). JASP (Version 0.19.3) [Computer software]. https://jasp-stats.org/

Jones, M. R. (1976). Time, our lost dimension: Toward a new theory of perception, attention, and memory. *Psychological Review*, 83(5), 323-355.

Khomsi, A. (2001). *ELO : Évaluation du langage oral : manuel*. ECPA, les Éd. du Centre de psychologie appliquée.

Kotz, S. A., Ravignani, A., & Fitch, W. T. (2018). The Evolution of Rhythm Processing. *Trends in Cognitive Sciences*, 22(10), 896-910. https://doi.org/10.1016/j.tics.2018.08.002

Kraus, N., Slater, J., Thompson, E. C., Hornickel, J., Strait, D. L., Nicol, T., & White-Schwoch, T. (2014). Music enrichment programs improve the neural encoding of speech in at-risk children. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 34(36), 11913-11918. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1881-14.2014

Kreidler, K., Janet V., Goffman, L. (2023). Children With Developmental Language Disorder Show Deficits in the Production of Musical Rhythmic Groupings. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*: JSLHR 66, 11 4481-4496. https://doi.org/10.1044/2023_JSLHR-23-00197

Ladányi, E., Novakovic, M., Boorom, O. A., Aaron, A. S., Scartozzi, A. C., Gustavson, D. E., Nitin, R., Bamikole, P. O., Vaughan, C., Fromboluti, E. K., Schuele, C. M., Camarata, S. M., McAuley, J. D., & Gordon, R. L. (2022). Using Motor

Tempi to Understand Rhythm and Grammatical Skills in Developmental Language Disorder and Typical Language Development. *Neurobiology of Language (Cambridge, Mass.)*, *4*(1), 1-28. https://doi.org/10.1162/nol_a_00082

Ladányi, E., Persici, V., Fiveash, A., Tillmann, B., & Gordon, R. L. (2020). Is atypical rhythm a risk factor for developmental speech and language disorders? Wiley *Interdisciplinary Reviews. Cognitive Science*, 11(5), e1528. https://doi.org/10.1002/wcs.1528

Lafon, L. (2022). *Apport d'un entrainement de synchronisation rythmique pour stimuler le traitement syntaxique d'enfants porteurs d'un trouble développemental du langage* [Mémoire d'orthophonie]. Université de Montpellier

Large, E. W., & Jones, M. R. (1999). The dynamics of attending: How people track time-varying events. *Psychological Review*, 106(1), 119-159. https://doi.org/10.1037/0033- 295X.106.1.119

Launay, L., Maeder, C., Roustit, J., Touzin, M. (2018). EVALEO 6-15—Batterie d'évaluation du langage oral et du langage écrit chez les sujets de 6 à 15 ans. *Rééducation orthophonique*, *273*, 93-135.

Launay, J., Grube, M., & Stewart, L. (2014). Dysrhythmia: A specific congenital rhythm perception deficit. *Frontiers in Psychology*, 5. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00018

Lecocq, P. (1998.). E.CO.S.SE. : Une épreuve de compréhension syntaxo-sémantique. *Psychologie cognitive.* 2-85939-497-4

Lefebvre, P., Bolduc, J., & Guay, J.-D. (2019). Chapitre 3. Musique et développement de la conscience phonologique : L'apport des comptines au cours de la petite enfance. In Remédiation orthophonique par la musique (p. 63-80). De Boeck Supérieur. https://doi.org/10.3917/dbu.estie.2019.01.0061

Liberman, A. M. (1957). Some Results of Research on Speech Perception. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 29(1), 117-123. https://doi.org/10.1121/1.1908635

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

Lloret, E. (2019). *Effet d'un entrainement rythmique auditivo-moteur sur le trouble phonologique d'enfants porteurs d'un Trouble Développemental du Langage* [Mémoire orthophonie]. Université Lyon 1

Louvel, M. (2019). *Élaboration et évaluation d'un outil rééducatif musical à destination des enfants dysphasiques* [Mémoire orthophonie]. Université Caen.

Macchi, L., Vansteene, C., Timmermans, N., & Boidein, F. (2013). Epreuve Lilloise de Discrimination Phonologique (ELDP) : Présentation et illustration par deux études de cas cliniques. *Cahiers de l'Association Scientifique et Ethique des Logopèdes Francophones*, *10*(3), 3-22.

Maclean, M., Bryant, P., & Bradley, L. (1987). Rhymes, nursery rhymes, and reading in early childhood. *Merrill-Palmer Quarterly*, 33(3), 255-281.

Maillart, C. (2018). Chapitre 4. L'apprentissage du langage chez les enfants présentant un trouble développemental du langage (TDL). In *Neuropsychologie de l'enfant* (p. 68-81). De Boeck Supérieur. https://doi.org/10.3917/dbu.roy.2018.01.0068

Manning, F., & Schutz, M. (2013). « Moving to the beat » improves timing perception. *Psychonomic Bulletin & Review*, 20(6), 1133-1139. https://doi.org/10.3758/s13423- 013-0439-7

Mehler, J., & Christophe, A. (1995). Maturation and learning of language in the first year of life. *In The cognitive neurosciences* (p. 943-954). The MIT Press.

Mehler, J., Jusczyk, P., Lambertz, G., Halsted, N., Bertoncini, J., & Amiel-Tison, C. (1988). A precursor of language acquisition in young infants. *Cognition*, 29(2),

143-178. https://doi.org/10.1016/0010-0277(88)90035-2

Millotte, S., & Christophe, A. (2009). À la découverte des mots : Le rôle de la prosodie dans l'acquisition du lexique et de la syntaxe. *Enfance*, 3(3), 283-292. https://doi.org/10.3917/enf1.093.0283

Morillon, B., Schroeder, C. E., & Wyart, V. (2014). Motor contributions to the temporal precision of auditory attention. *Nature Communications*, *5*, 5255. https://doi.org/10.1038/ncomms6255

Moritz, C., Yampolsky, S., Papadelis, G., Thomson, J., & Wolf, M. (2013). Links between early rhythm skills, musical training, and phonological awareness. *Reading and Writing*, 26(5), 739-769. https://doi.org/10.1007/s11145-012-9389-0

Möttönen, R., Dutton, R., & Watkins, K. E. (2013). Auditory-motor processing of speech sounds. *Cerebral Cortex* (New York, N.Y.: 1991), 23(5), 1190-1197. https://doi.org/10.1093/cercor/bhs110

Nayak, S., Ladányi, E., Eising, E., Mekki, Y., Nitin, R., Bush, C. T., et al. (2024). Capacités du rythme musical et risque de troubles et de troubles du développement de la parole et du langage : épidémiologiques et polygéniques association. *Prépublication PsyArXiv*. doi :10.31234/osf.io/kcgp5.

Nazzi, T., & Ramus, F. (2003). Perception and acquisition of linguistic rhythm by infants. *Speech Communication*, 41(1), 233-243. https://doi.org/10.1016/S0167- 6393(02)00106-1

Nazzi, T., Bertoncini, J., & Mehler, J. (1998). Language discrimination by newborns: Toward an understanding of the role of rhythm. J*ournal of Experimental Psychology. Human Perception and Performance*, 24(3), 756-766. https://doi.org/10.1037//0096- 1523.24.3.756

Ortiz-Barajas, M., Guevara, J., Gervain, J. (2023). Neural Oscillations and Speech Processing at Birth. *iScience* 26, 11, 108187. https://doi.org/10.1016/j.isci.2023.108187.

Overy, K. (2003). Dyslexia and music. From timing deficits to musical intervention. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 999, 497-505. https://doi.org/10.1196/annals.1284.060

Patel, A., & Iversen, J. (2014). The evolutionary neuroscience of musical beat perception: the Action Simulation for Auditory Prediction (ASAP) hypothesis. *Frontiers in systems neuroscience 8 (2014): 57. https://doi.org/10.3389/fnsys.2014.00057*

Patel, A. D. (2012). The OPERA hypothesis: Assumptions and clarifications. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1252, 124-128. https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2011.06426.x

Patel, A. D. (2008). Music, language, and the brain. Oxford University Press.

Patel, A. D. (2003). Language, music, syntax and the brain. *Nature Neuroscience*, 6(7), 674-681. https://doi.org/10.1038/nn1082

Patscheke, H., Degé, F., & Schwarzer, G. (2018). The effects of training in rhythm and pitch on phonological awareness in four- to six-year-old children. *Psychology of Music*, 47, 030573561875676. https://doi.org/10.1177/0305735618756763

Paula, V., Vesa, P., Anastasia, G., Anja, T., Laurel J, T., & Teija, K. (2023). Beneficial effects of a music listening intervention on neural speech processing in 0-28-month-old children at risk for dyslexia. *Developmental Science*, 26(5), e13426. https://doi.org/10.1111/desc.13426

Peelle, J., & Davis, M. (2012). Neural Oscillations Carry Speech Rhythm through to Comprehension. *Frontiers in Psychology*, 3. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpsyg.2012.00320

Pellegrino, F., Coupé, C., & Marsico, E. (2011). Across-Language Perspective on Speech Information Rate. *Language,* 87(3), 539-558. https://doi.org/10.1353/lan.2011.0057

Peter, V., Goswami, U., Burnham., Kalashnikova, M. (2023). Impaired neural entrainment to low frequency amplitude modulations in English-speaking children with dyslexia or dyslexia and DLD. *Brain and Language,* 236, 105217. https://doi.org/10.1016/j.bandl.2022.105217.

Planchou, C. (2014). Traitements auditifs non verbaux et troubles du développement du langage oral : Perception et production musicales [Thèse de doctorat, Université Lille 3]. https://www.theses.fr/2014LIL30034

Plart, P. (2021). *Les bénéfices de la pratique du rythme musical sur le développement de la conscience phonologique des enfants de maternelle*. [Mémoire Master Métiers de l'Enseignement, de l'Éducation et de la Formation]. Université de Bordeaux

Poeppel, D. (2003). The analysis of speech in different temporal integration windows: Cerebral lateralization as 'asymmetric sampling in time'. *Speech Communication*, 41(1), 245-255. https://doi.org/10.1016/S0167-6393(02)00107-3

Przybylski, L., Bedoin, N., Krifi-Papoz, S., Herbillon, V., Roch, D., Léculier, L., Kotz, S. A., & Tillmann, B. (2013). Rhythmic auditory stimulation influences syntactic processing in children with developmental language disorders. *Neuropsychology*, 27(1), 121-131. https://doi.org/10.1037/a0031277

Pulvermüller, F., Huss, M., Kherif, F., Moscoso del Prado Martin, F., Hauk, O., & Shtyrov, Y. (2006). Motor cortex maps articulatory features of speech sounds. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *103*(20), 7865-7870. https://doi.org/10.1073/pnas.0509989103

Ramus, F. (2002). Language discrimination by newborns: Teasing apart phonotactic, rhythmic, and intonational cues. *Annual Review of Language Acquisition*, 2, 85-115. https://doi.org/10.1075/arla.2.05ram

Ramus, F., & Mehler, J. (1999). Language identification with suprasegmental cues : A study based on speech resynthesis. *The Journal of the Acoustical Society of America,* 105(1), 512-521. https://doi.org/10.1121/1.424522

Rathcke, T., Lin, C.-Y., Falk, S., & Bella, S. D. (2021). Tapping into linguistic rhythm. *Laboratory Phonology: Journal of the Association for Laboratory Phonology*, 12(1), 11. https://doi.org/10.5334/labphon.248

Richards, S., & Goswami, U. (2015). Auditory Processing in Specific Language Impairment (SLI): Relations With the Perception of Lexical and Phrasal Stress. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*: JSLHR, 58(4), 1292-1305. https://doi.org/10.1044/2015_JSLHR-L-13-0306

Rosen, S. (1992). Temporal information in speech: Acoustic, auditory and linguistic aspects. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. *Series B, Biological Sciences*, 336(1278), 367-373. https://doi.org/10.1098/rstb.1992.0070

Sallat, S., & Jentschke, S. (2015). Music Perception Influences Language Acquisition: Melodic and Rhythmic-Melodic Perception in Children with Specific Language Impairment ». *Behavioural Neurology*, 606470. https://doi.org/10.1155/2015/606470.

Schön, D., & Tillmann, B. (2015). Short- and long-term rhythmic interventions: Perspectives for language rehabilitation. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1337, 32-39. https://doi.org/10.1111/nyas.12635

Schön, D., Gordon, R., Campagne, A., Magne, C., Astésano, C., Anton, J.-L., & Besson, M. (2010). Similar cerebral networks in language, music and song perception. *NeuroImage*, 51(1), 450-461. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.02.023

Schön, D., Gordon, R. L., & Besson, M. (2005). Musical and linguistic processing in song perception. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1060, 71-81. https://doi.org/10.1196/annals.1360.006

Shapiro, S. S. & Wilk, M. B. (2007*).* An analysis of variance test for normality (complete samples)*. Biometrika.* https://doi.org/10.1093/biomet/52.3-4.591

Stephan, M. A., Lega, C., & Penhune, V. B. (2018). Auditory prediction cues motor preparation in the absence of movements. *NeuroImage,* 174, 288-296. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.03.044

Su, Y.-H., & Pöppel, E. (2012). Body movement enhances the extraction of temporal structures in auditory sequences. *Psychological Research*, 76(3), 373-382. https://doi.org/10.1007/s00426-011-0346-3

Tallal, P. (2000). Experimental studies of language learning impairments: From research to remediation. In Speech and language impairments in children: Causes, characteristics, intervention and outcome (p. 131-155). *Psychology Press.*

Thibault M-P., Lenfant, M., & Helloin, M.-C. (2012). *Exalang 8-11* : Bilan informatisé pour l'examen du langage et des compétences transversales chez l'enfant de 8 à 11 ans

Thibault M-P., Lenfant, M., & Helloin, M.-C. (2010). *Exalang 5-8* : Bilan informatisé pour l'examen du langage et des compétences transversales chez l'enfant de 5 à 8 ans

Tierney, A., & Kraus, N. (2014). Auditory-motor entrainment and phonological skills : Precise auditory timing hypothesis (PATH). *Frontiers in Human Neuroscience*, 8. https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fnhum.2014.00949

Vidal, C. (2013). *Intérêts et limites de l'utilisation de la Thérapie Mélodique et Rythmée dans la prise en charge des dysphasies expressives* [Mémoire orthophonie]. Université de Lille

Vonthron, F., & Yuen, A. (2018). *Dyslexie - Poppins l'application médicale qui aide les enfants dys*. Poppins. https://www.poppins.io/application-medicale-pour-aider-enfants-dyslexiques.

Woodruff Carr, K., White-Schwoch, T., Tierney, A. T., Strait, D. L., & Kraus, N. (2014). Beat synchronization predicts neural speech encoding and reading readiness in preschoolers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(40),

14559-14564. https://doi.org/10.1073/pnas.1406219111

Yu, M., Xu, M., Li, X., Chen, Z., Song, Y., & Liu, J. (2017). The shared neural basis of music and language. *Neuroscience*, 357, 208-219. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2017.06.003

Zhao, T. C., & Kuhl, P. K. (2016). Musical intervention enhances infants' neural processing of temporal structure in music and speech. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 113(19), 5212-5217. https://doi.org/10.1073/pnas.1603

VI Annexes

Annexe A : Profils des participants 1
Annexe B : Avis favorable du CER de l'Université de Lyon.....2
Annexe C : Flyer de présentation du projet 3
Annexe D : Annonce de recrutement.....4
Annexe E : Déroulé de l'entrainement rythmique moteur adapté de Brain Ball® 5
Annexe F : Performances individuelles des enfants pour chaque épreuve langagière évaluée 7
Annexe G : Déclaration d'utilisation d'un logiciel d'intelligence artificielle 10

Annexe A : Profils des participants

	Age	Sexe	Classe	Diagnostic	Trouble associé	Groupe	Protocole	Adaptations
P1	7 ans	Féminin	CE1	TDL		Rythm_ortho	Non terminé	Grosse balle, exercices simplifiés
P2	9 ans	Féminin	CM1	TDL	TSLE	Rythm_ortho	Terminé	Plus de temps sur les sacs, moins sur les balles
P3	8 ans	Masculin	CE2	TDL	TSLE	Rythm_ortho	Dépassé	Non
P4	8 ans	Masculin	CE2	TDL		Rythm_ortho	Dépassé	Non
P5	7 ans	Masculin	CE1	TDL		Ortho_rythm	Terminé	Non
P6	9 ans	Masculin	CM1	TDL	TSLE	Ortho_rythm	Terminé	Non
P7	7 ans	Féminin	CE1	TDL		Ortho_rythm	Non terminé	Rythme ralenti, balle à rebond lent
P8	8 ans	Féminin	CE2	TDL	TSLE	Ortho_rythm	Non terminé	Exercices simplifiés

Annexe B : Avis favorable du CER de l'Université de Lyon

UNIVERSITÉ DE LYON

Lyon, le mercredi 13 novembre 2024

Université de Lyon
92, rue Pasteur
CS 30122
69361 Lyon Cedex 07
France
T +33 (0)4 37 37 26 70
F +33 (0)4 37 37 26 71
Universite-lyon.fr

Humbert de Fréminville,
Président
Comité d'éthique de la recherche de la ComUE Université de Lyon

à

À l'attention de Véronique Boulenger
Directrice de recherche
Université Lyon 2

Dossier suivi par :
Humbert de Fréminville
Président
Cer-udl@universite-lyon.fr

Objet : avis Comité CER-UdL n° 2024-10-10-003

Titre du projet : Effets d'un entrainement rythmique sur les compétences langagières des enfants présentant un TDL

Chère Collègue,

Le CER-UdL a examiné votre protocole de recherche en séance du 10/10/2024.
Compte tenu des précisions et compléments apportés dans votre courrier du 29 octobre 2024, la décision suivante est rendue :

- **Avis favorable.**

En vous priant de croire à toute notre considération, je vous prie de recevoir, Chère Collègue, mes sincères salutations

Pour le Comité,

Humbert de Fréminville
Président du CER-ComUE

Annexe C : Flyer de présentation du projet

Annexe D : Annonce de recrutement

Annexe E : Déroulé de l'entrainement rythmique moteur adapté de Brain Ball®

Semaine 1	***Séance 1*** : 15 minutes	
	5 min	Découvrir le rythme dans le corps, production de pulsation au rythme d'un métronome, utilisation d'instruments pour taper des rythmes
	10 min **Sac lesté**	1. Intégration rythmique : seul, assis puis debout, se faire passer le sac de la main droite à la main gauche 2. Exercice en binôme ; debout, se faire passer le sac par devant puis le passer derrière son dos (et en alternant main droite/main gauche)
	Séance 2 : 15 minutes	
	7 min **Sac lesté**	Intégration rythmique, identique à la séance précédente
	8 min **Sac lesté**	Reprendre l'exercice de la semaine précédente en binôme avec un sac et enchainer avec un exercice en binôme avec 2 sacs en même temps
	Entrainement à domicile, 3 fois 5 à 10 minutes dans la semaine	
	Intégration rythmique avec vidéo modèle, sac lesté, seul	

Semaine 2	***Séance 3*** : 15 minutes	
	5 min **Sac lesté**	Intégration rythmique (identique à la semaine précédente)
	5 min **Sac lesté**	Exercice en binôme, se passer 1 sac puis 2 en rythme en faisant un carré (main droite à la main gauche du binôme puis le binôme le passe dans sa main droite et le refait passer), changer de sens
	5 min **Balle**	Intégration rythmique : rebond main droite puis main gauche
	Séance 4 : 15 minutes	
	5 min **Sac lesté**	Exercice en binôme de la semaine précédente
	5 min **Balle**	Intégration rythmique avec rebond de balles
	5 min **Balle**	Rebond en V en alternant main droite et gauche
	Entrainement à domicile, 3 fois 5 à 10 minutes dans la semaine	
	Intégration rythmique avec vidéo, sac lesté + rebond main droite et main gauche avec la balle	

Semaine 3	***Séance 5*** : 15 minutes	
	5 min **Balle**	Rebond de balle en V
	5 min **Balle**	Echange proche en faisant passer la balle de la main droite à la main gauche du binôme avec un rebond au sol et inversement
	5 min **Balle**	Rebond en V avec passage de la balle derrière le dos
	Séance 6 : 15 minutes	
	5 min **Balle**	Echange en binôme à 2 balles en même temps
	5 min **Balle**	Rebond en V en passant la balle d'une main à l'autre par devant puis derrière le dos
	5 min **Sac lesté**	Carré en binôme avec 2 sacs
	Entrainement à domicile, 3 fois 5 à 10 minutes dans la semaine	
	Geste de base solo balle droite et gauche + rebond de la balle en V	

Semaine 4	***Séance 7*** : 15 minutes	
	5 min **Balle**	Balle rebond puis en V
	10 min **Balle** **Exercices en 4 temps**	Faire un rectangle avec la balle en binôme avec un rebond au sol (lancer la balle avec la main droite, le binôme la récupère avec sa main gauche et la fait passer dans sa main droite sans rebond puis la lance à nouveau au partenaire avec un rebond au sol)
	Séance 8 : 15 minutes	
	5 min **Sac lesté**	Carré en binôme avec 2 sacs
	5 min	Rebond de balle des 2 mains puis en V
	5 min **Balle** **Exercice en 4 temps**	Faire le rectangle avec 2 balles à la fois et en passant d'une main à l'autre par devant ou par derrière dans le dos
	Entrainement à domicile, 3 fois 5 à 10 minutes dans la semaine	
	Geste de base solo balle droite et gauche + rebond en V	

Annexe F : Performances individuelles des enfants pour chaque épreuve langagière évaluée

1. Discrimination phonologique

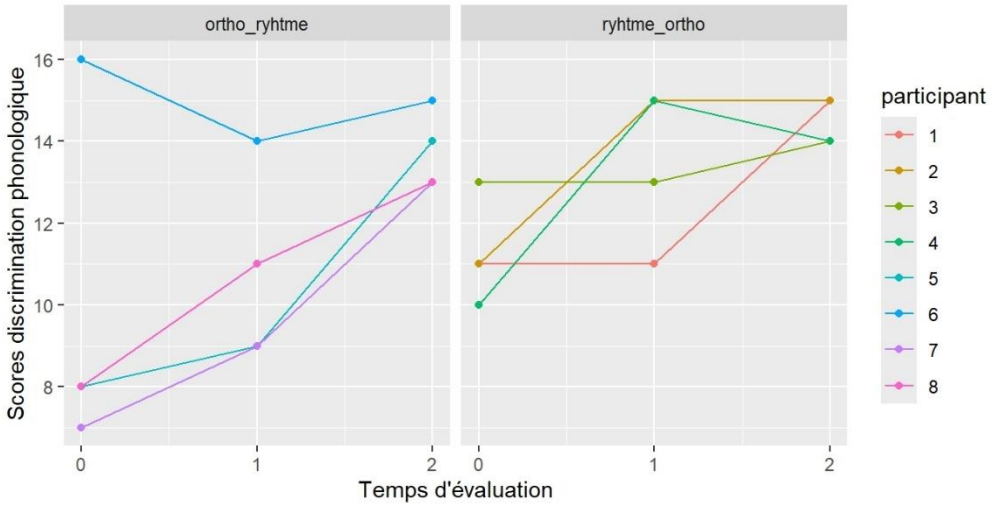


Figure S1

Scores de discrimination phonologique pour chacun des huit enfants inclus en pré-test (temps 0), post-test 1 (temps 1) et post-test 2 (temps 2) en fonction du groupe (i.e ordre des périodes : ortho_rythme à gauche, et rythme_ortho à droite).

2. Répétition de pseudo-mots

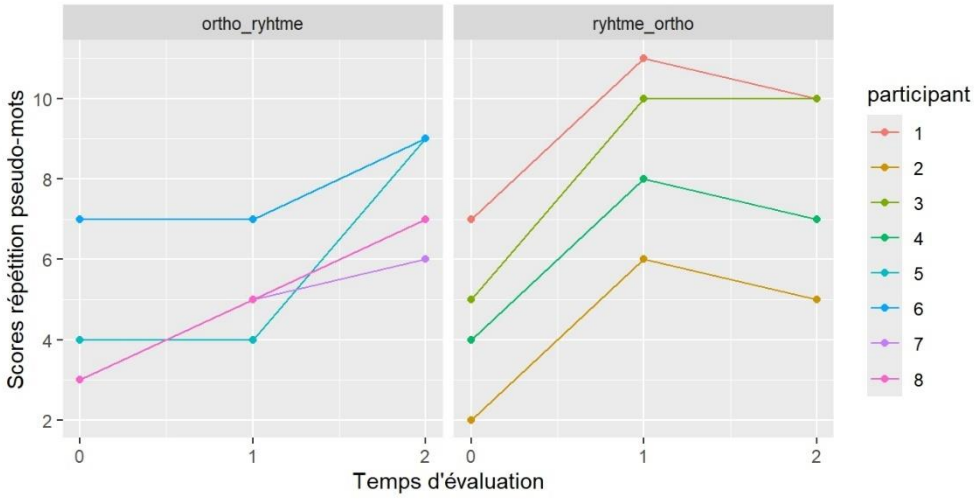


Figure S2

Scores de répétition de pseudo-mots pour chacun des huit enfants inclus en pré-test (temps 0), post-test 1 (temps 1) et post-test 2 (temps 2) en fonction du groupe (i.e ordre des périodes : ortho_rythme à gauche, et rythme_ortho à droite).

3. Métaphonologie

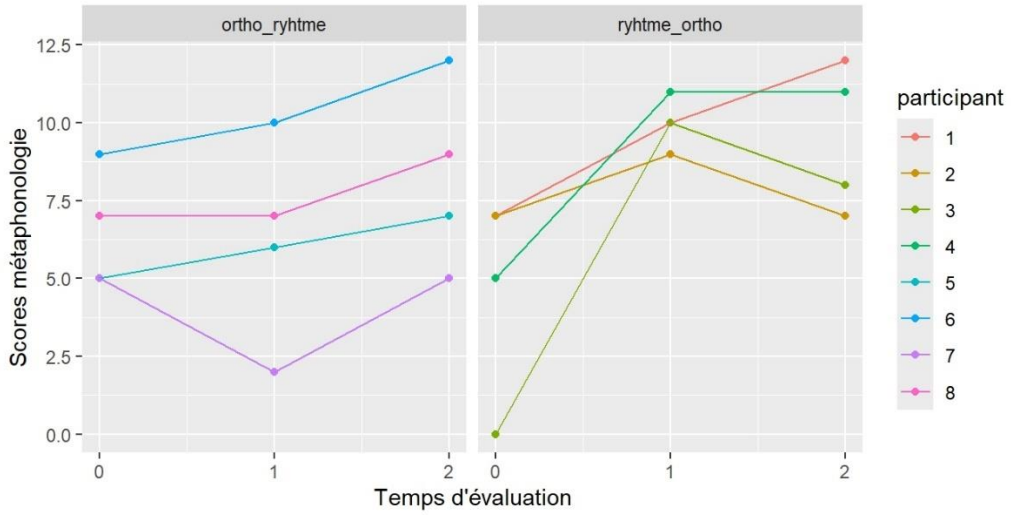


Figure S3

Scores de métaphonologie pour chacun des huit enfants inclus en pré-test (temps 0), post-test 1 (temps 1) et post-test 2 (temps 2) en fonction du groupe (i.e ordre des périodes : ortho_rythme à gauche, et rythme_ortho à droite).

4. Jugement grammatical

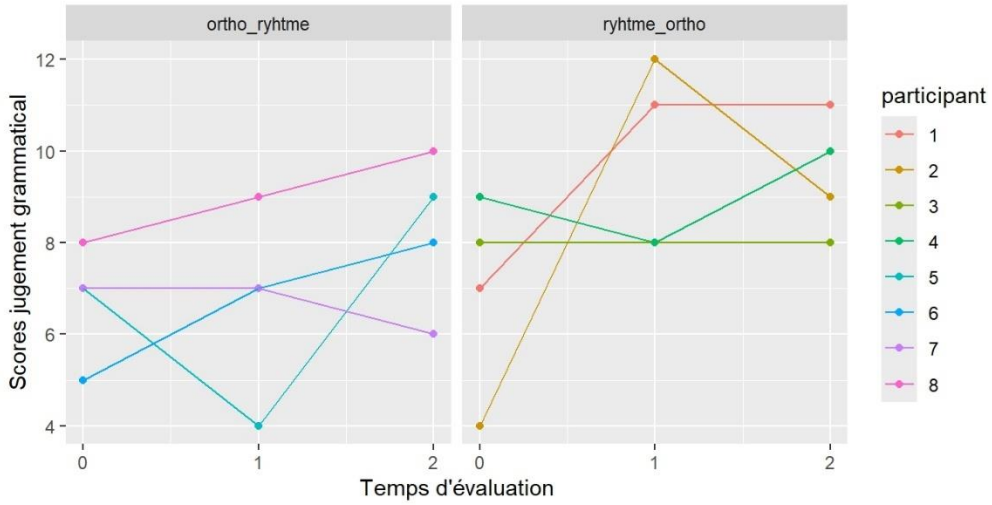


Figure S4

Scores de jugement de grammaticalité pour chacun des huit enfants inclus en pré-test (temps 0), post-test 1 (temps 1) et post-test 2 (temps 2) en fonction du groupe (i.e ordre des périodes : ortho_rythme à gauche, et rythme_ortho à droite).

5. Complétion de phrases

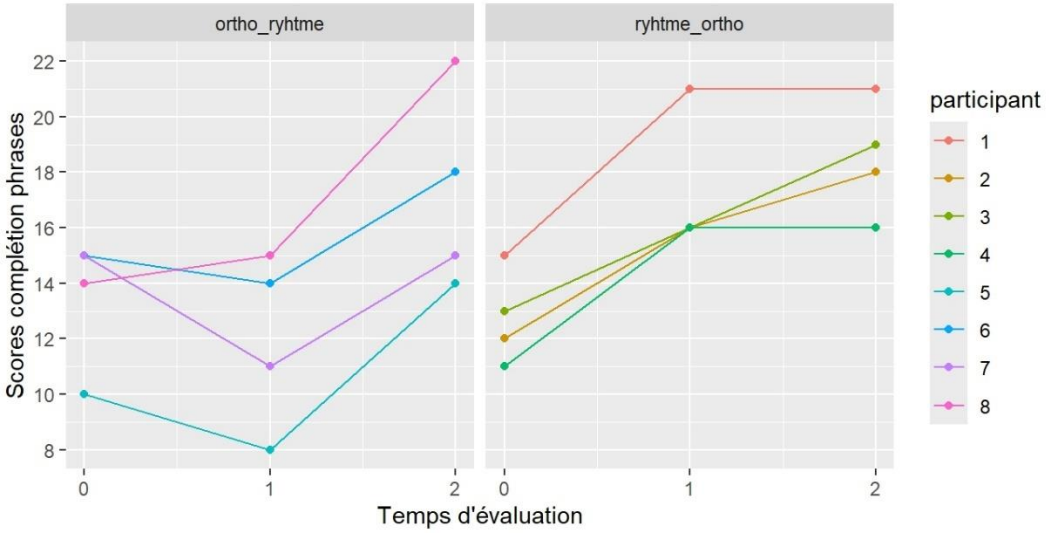


Figure S5

Scores de complétion de phrases pour chacun des huit enfants inclus en pré-test (temps 0), post-test 1 (temps 1) et post-test 2 (temps 2) en fonction du groupe (i.e ordre des périodes : ortho_rythme à gauche, et rythme_ortho à droite).

6. Compréhension de phrases

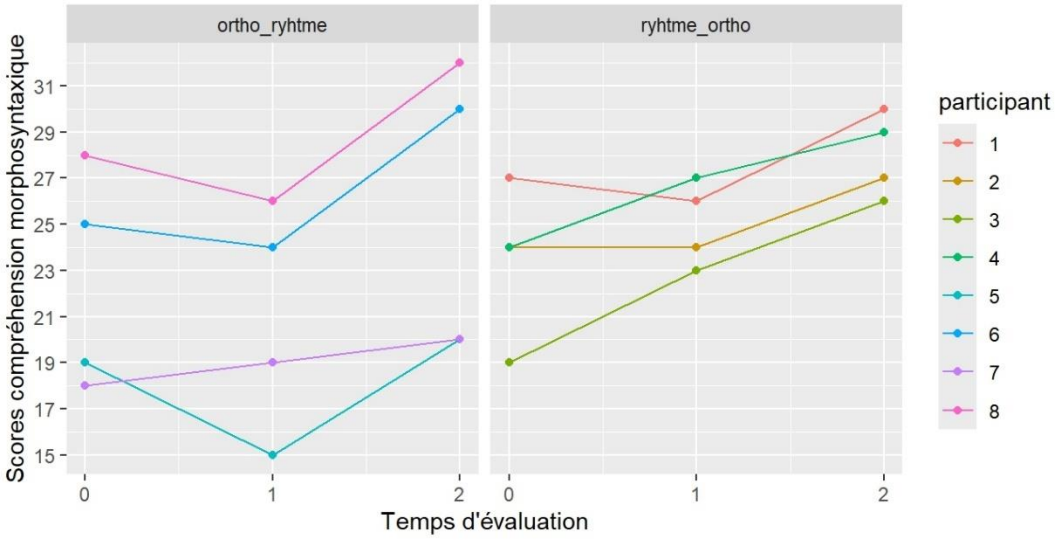


Figure S6

Scores de compréhension de phrases pour chacun des huit enfants inclus en pré-test (temps 0), post-test 1 (temps 1) et post-test 2 (temps 2) en fonction du groupe (i.e ordre des périodes : ortho_rythme à gauche, et rythme_ortho à droite).

Annexe G : Déclaration d'utilisation d'un logiciel d'intelligence artificielle

Je soussignée Kahn Déborah, déclare avoir utilisé un outil d'intelligence artificielle dans le cadre de mon mémoire d'Orthophonie. Conformément aux directives académiques et à l'intégrité intellectuelle, je fournis ci-dessous une description détaillée des circonstances et de l'utilisation de l'IA, ainsi que les prompts spécifiques utilisés.
Pour la rédaction de mon mémoire intitulé : « Effet d'un entrainement rythmique moteur inspiré du Brain Ball® sur les compétences phonologiques et morphosyntaxiques d'enfants porteurs d'un Trouble Développemental du Langage », j'ai eu recours à l'IA :

Pour trouver des tests statistiques adaptés à mon étude et m'expliquer comment les réaliser.
Exemple de Prompt Utilisé : " Quelle est la différence entre test de Student et test de Wilcoxon"
Résultat : Le logiciel m'a fourni des explications sur les différents tests afin de m'aider à déterminer ce qui était adapté ou non à mon étude.

Pour améliorer la clarté et la fluidité de certains passages de mon mémoire, j'ai utilisé l'IA pour reformuler certaines phrases.
Exemple de Prompt utilisé : "Reformule ce paragraphe pour améliorer sa clarté et sa fluidité : [Différentes théories nous permettent de mieux comprendre le fonctionnement neuronal que nous expliciterons davantage dans les sous parties suivantes. Ces théories décrivent les processus mis en jeu entre le rythme musical et le traitement de la parole]."
Résultat : Les suggestions de l'IA ont permis d'améliorer la compréhension du paragraphe, le rendant ainsi plus fluide et cohérent.

Pour améliorer la traduction en anglais du résumé du mémoire.
Exemple de Prompt utilisé : « Peux-tu traduire en anglais le passage ci-dessous [Nous avons émis l'hypothèse qu'un entrainement de synchronisation rythmique intégrant le versant moteur améliorerait les performances en phonologie et en morphosyntaxe d'enfants porteurs de TDL.]
Résultat : Les suggestions de l'IA ont permis d'améliorer la traduction de mon résumé en anglais.

Je déclare ne pas avoir utilisé de logiciel d'intelligence artificielle dans un autre contexte que ceux déclarés ci-dessus.
Fait à Villeurbanne, le 18/04/2025