THÈSE

Pour l'obtention du grade de
DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE POITIERS
UFR de sciences humaines et arts
Centre de recherches sur la cognition et l'apprentissage (Poitiers)
(Diplôme National - Arrêté du 25 mai 2016)

École doctorale : Sciences du Langage, Psychologie, Cognition, Éducation (Poitiers)
Secteur de recherche : Psychologie

Présentée par :
Margaux Lê

Influence des habiletés motrices et rythmiques sur l'apprentissage du langage écrit du CE2 au CM2

Directeur(s) de Thèse :
Éric Lambert, Pauline Quemart

Soutenue le 20 novembre 2020 devant le jury

Jury :

Président	**Jean-Francois Rouet**	Directeur de recherche - C.N.R.S. Université de Poitiers
Rapporteur	**Marie-Line Bosse**	Professeur - Université de Grenoble
Rapporteur	**Marianne Jover**	Professeur - Université Aix-Marseille
Membre	**Éric Lambert**	Professeur - Université de Poitiers
Membre	**Pauline Quemart**	Maître de conférences - Université de Poitiers
Membre	**Gregoire Borst**	Professeur - Université Paris 5 Descartes

Pour citer cette thèse :
Margaux Lê. *Influence des habiletés motrices et rythmiques sur l'apprentissage du langage écrit du CE2 au CM2* [En ligne]. Thèse Psychologie. Poitiers : Université de Poitiers, 2020. Disponible sur Internet <http://theses.univ-poitiers.fr>

THESE REALISEE EN VUE DE L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR

DE L'UNIVERSITE DE POITIERS

Centre de Recherches sur la Cognition et l'Apprentissage (UMR 7295, Université de Poitiers, CNRS)

UFR des Sciences Humaines et Arts (SHA)

Ecole Doctorale : Sciences du Langage, Psychologie, Cognition, Education

Mention : Psychologie

INFLUENCE DES HABILETES MOTRICES ET RYTHMIQUES SUR L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT DU CE2 AU CM2

Margaux Lê

Thèse encadrée par Eric Lambert et Pauline Quémart

Composition du jury :

Grégoire Borst, Professeur (Université de Paris Descartes)	Examinateur
Marie-Line Bosse, Professeure (Université de Grenoble)	Rapporteure
Marianne Jover, Professeure (Aix Marseille Université)	Rapporteure
Eric Lambert, Professeur (Université de Poitiers)	Directeur
Pauline Quémart, Maître de Conférences (Université de Nantes)	Directrice
Jean-François Rouet, Directeur de Recherche (CNRS - Université de Poitiers)	Président du jury

REMERCIEMENTS

Mes premiers remerciements s'adressent à mes directeurs Éric Lambert et Pauline Quémart pour leur disponibilité, leurs conseils avisés et la richesse de nos échanges. C'était un grand plaisir de travailler avec eux et je tiens à leur exprimer toute ma gratitude pour tout le soutien qu'ils m'ont apporté au long de ces trois années de thèse.

Je tiens également à remercier chaleureusement les membres du jury – et tout particulièrement Marianne Jover et Marie-Line Bosse, qui ont accepté d'être rapporteurs de ce travail.

Un grand merci aux membres de l'équipe poitevine du projet DysApp pour nos discussions stimulantes au cours des nombreuses réunions qui ont ponctué la réalisation du projet : merci à Anna Potocki, Manuel Gimenes et David Chesnet, mais également à tous les ingénieur.e.s d'étude qui se sont succédés – Marie-Françoise Crété, Mélany Payoux, Léa Béziaud, Emilie Guichard, Claire Labaste et Romain Trincherini – et qui ont été d'une grande aide pour organiser les différentes études. Merci également à l'ensemble des étudiants et vacataires impliqués dans l'ensemble des études et dans les pré-tests du jeu.

Plus largement, j'adresse mes sincères remerciements aux autres partenaires du projet DysApp. Tout d'abord, je tiens à remercier l'équipe de Tralalère – et notamment Catherine Rolland et Léopold Arquembourg – et l'équipe du CNAM – Guillaume Levieux, Axel Buendia et William Rao Fernandes – pour nos riches échanges autour du développement du jeu vidéo. Je remercie également chaleureusement les partenaires de terrain qui nous ont permis de mener ces études dans une vingtaine d'écoles de la région. Merci à l'académie de Poitiers et tout notamment à Dominique Quéré. Un immense merci à tous les enseignants qui se sont investis et qui nous ont accueilli dans leur salle de classe. Merci également aux membres des associations AADYS et HandicapEcole, et notamment à Nicole Bardou et Joël Pelhate, pour leur aide précieuse. Enfin, merci à tous les enfants qui ont participé aux différentes études, et sans qui tout ce travail n'aurait pas été possible.

Je tiens également à remercier le laboratoire CeRCA, et notamment l'équipe ECRITURE, qui m'a accueilli au cours de ces trois années et m'a permis de réaliser cette thèse dans les meilleures conditions. Merci également aux doctorants du laboratoire pour les pauses café salvatrices. Tout particulièrement, un grand merci à Sophie-Anne, Virginie, Julie, Louise et Caroline.

Une pensée également pour Jessica Tallet qui m'a initiée à la recherche en Master et m'a beaucoup appris.

Je remercie aussi celles et ceux qui m'ont offert un petit coin de bureau pour rédiger ma thèse en échange du gardiennage de leur chat/cactus pendant l'été et qui m'ont ainsi permis de changer d'air et de trouver un second souffle pendant les derniers mois de rédaction. Un grand merci également à celles et ceux (et tout particulièrement Laurence Vinot) qui ont accepté de relire ce manuscrit.

Enfin, bien que leur implication dans la réalisation de ce travail soit plus indirecte, je remercie celles et ceux qui m'ont soutenu dans ce travail de thèse pendant ces trois ans – famille et amis. Un dernier mot pour Hugo, et son soutien sans faille.

RESUME

Alors que l'influence des habiletés langagières sur l'apprentissage du langage écrit fait consensus, plusieurs études tendent à montrer que certaines habiletés non-langagières, telles que la motricité fine et les habiletés rythmiques, jouent également un rôle dans cet apprentissage. Ce travail de thèse s'inscrit dans la continuité de ces travaux et cherche à la fois à confirmer l'influence des habiletés motrices et rythmiques sur différentes dimensions du langage écrit, et à examiner les mécanismes qui sous-tendent ces effets chez des élèves du CE2 au CM2 avec ou sans troubles des apprentissages. L'objectif final de ce travail était d'évaluer les bénéfices d'une intervention ciblant ces habiletés au travers d'un jeu vidéo sur l'apprentissage de l'écrit, dans le but d'ouvrir la voie vers de nouvelles pistes de remédiation pour les élèves présentant des difficultés de lecture et d'écriture. Afin d'apporter un éclairage sur les relations entre ces deux habiletés non-langagières et l'apprentissage de l'écrit, trois études corrélationnelles ont été menées chez des élèves de CE2 et CM1 sans difficultés d'apprentissage, et ont permis de confirmer les liens entre les habiletés motrices et rythmiques, et différentes dimensions du langage écrit (lecture et orthographe de mots, compréhension écrite et rédaction). Deux facteurs explicatifs de ces relations ont été identifiés grâce à une méthode de modélisation par équations structurales : *l'automatisation de l'écriture manuscrite*, qui sous-tend l'effet de la motricité à la fois sur la production écrite et sur la lecture de mots, et *les fonctions exécutives*, qui expliquent les effets des habiletés motrices et rythmiques sur l'ensemble des dimensions du langage écrit évaluées. Par ailleurs, nous avons cherché dans un deuxième temps à identifier les conséquences de difficultés motrices et/ou rythmiques associées à un trouble de l'apprentissage du langage écrit. Les résultats révèlent que dans cette population, une altération de ces habiletés non-langagières se traduit par une aggravation du déficit du traitement orthographique par rapport à un trouble isolé, ce qui conforte l'hypothèse d'une influence de ces deux habiletés sur l'apprentissage du langage écrit. Enfin, dans un troisième temps, les bénéfices d'une intervention basée sur la pratique d'un jeu vidéo ciblant les habiletés motrices ont été évalués. Bien que les résultats de l'étude ne permettent pas de démontrer clairement les bénéfices d'un tel entraînement, tant soit sur la motricité que sur l'apprentissage du langage écrit, les analyses exploratoires suggèrent que l'intervention pourrait être bénéfique pour les élèves présentant des difficultés motrices. En conclusion, l'ensemble des travaux réalisés dans cette thèse apporte un nouvel éclairage sur les liens entre les habiletés motrices et rythmiques, et l'apprentissage de l'écrit. Ce travail souligne la nécessité de tenir compte de ces deux compétences non-langagières dans l'étude de cet apprentissage.

Mots clés : langage écrit, motricité fine, habiletés rythmiques, troubles des apprentissages, jeu vidéo

ABSTRACT

While the influence of language skills on reading and writing development was highlighted by numerous studies, several findings suggest that nonlanguage skills, such as fine motor skills and rhythmic skills, also play a role in literacy development. In line with these studies, the present dissertation aims to confirm the influence of motor and rhythmic skills on different literacy dimensions, and to examine the mechanisms underlying these effects in student with and without learning disabilities from Grade 3 to 5. Another goal of this work was to test the benefits of a training of these nonlanguage skills on literacy development in order to pave the way for new interventions to help children with reading and writing difficulties.

First, in order to shed light on the relationships between these two non-language skills and literacy, three correlational studies were conducted on third and fourth graders without learning difficulties. The results confirmed the links between motor and rhythmic skills, and different literacy dimensions (word reading, word spelling, reading comprehension and written production). Two factors explaining these relationships were identified using structural equation modeling: *handwriting*, which underlies the effect of motor skills on written production and word reading, and *executive functions*, which explain the effects of both motor and rhythmic skills on all the literacy dimensions. Then, we studied the influence of associated motor and rhythmic difficulties on reading and writing in children with learning disorders. The results show that, in this population, poorer motor and/or rhythmic skills were associated to a greater deficit in spelling. The results comfort the hypothesis of an influence of these two nonlanguage skills on literacy development. Finally, the last study evaluated the benefits of a game-based intervention targeting motor skills. Although the results do not clearly demonstrate the benefits of such training either on motor skills or on literacy, exploratory analyses suggest that the intervention could be beneficial for students with poor fine motor skills. In sum, this dissertation bring new elements to understand the links between motor and rhythmic skills, and literacy development. The results emphasize the need to take into account these two nonlanguage skills in the study of reading and writing development.

Keywords: literacy, fine motor skills, rhythmic skills, learning disabilities, video games

PRODUCTIONS SCIENTIFIQUES ASSOCIEES A CE TRAVAIL

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES

Articles publiés dans des revues à comité de lecture :

- Lê, M., Quémart, P., Potocki, A., Gimenes, M., Chesnet, D., & Lambert, E. (2020). Rhythm in the blood: The influence of rhythm skills on literacy development in third graders. *Journal of Experimental Child Psychology*, *198*, 104880.

Article en préparation :

- Lê, M., Quémart, P., Potocki, A., Gimenes, M., Chesnet, D., & Lambert, E. (En préparation). Modeling the influence of motor skills on different measures of literacy development in Grade 3.

MANIFESTATIONS SCIENTIFIQUES

Communications orales dans des congrès nationaux ou internationaux :

- Lê, M., Quémart, P., Potocki, A., Gimenes, M., Payoux, M., Chesnet, D., & Lambert, E. (2018, septembre). *Rôle de la motricité fine dans l'apprentissage du langage écrit chez les élèves de CE2.* Communication orale présentée au 59ème Congrès de la Société Française de Psychologie, Reims, France.
- Lê, M., Quémart, P., Potocki, A., Gimenes, M., M., Chesnet, D., & Lambert, E. (2019, septembre). *Un jeu vidéo sur tablette pour repérer les difficultés et accompagner l'acquisition du langage écrit chez les élèves de CE2 et CM1.* Communication orale présentée au 59ème Congrès de la Société Française de Psychologie, Poitiers, France.

Communications affichées dans des congrès nationaux ou internationaux :

- Lê, M., Quémart, P., Potocki, A., Gimenes, Chesnet, D., & Lambert, E. (2019, March). *Relationships between Children's Rhythmic and Literacy Skills.* Poster presented at the International Convention of Psychological Science. Paris, France (7-9).
- Lê, M., Quémart, P., Potocki, A., Gimenes, M., Payoux, M., Béziaud, L., Chesnet, D., & Lambert, E. (2018, November). *Role of fine motor skills in literacy acquisition in Grade 3.* Poster presented at the 1st Literacy Summit. Porto, Portugal.

TABLE DES MATIERES

Introduction **4**

Cadre théorique **8**

Chapitre 1 : L'apprentissage du langage écrit et les habiletés langagières et non-langagières impliquées dans cet apprentissage 9

1. Apprentissage du langage écrit 9
2. Habiletés phonologiques et apprentissage du langage écrit 15
3. Fonctions exécutives non langagières et apprentissage du langage écrit 18
4. Conclusion 22

Chapitre 2 : Habiletés motrices et langage écrit 23

1. Eléments de définition 23
2. Liens entre motricité et apprentissage du langage écrit dans le développement typique 25
3. Mécanismes explicatifs du lien entre motricité et langage écrit 29
4. Habiletés motrices chez les élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit 38
5. Conclusion 44

Chapitre 3 : Habiletés rythmiques et langage écrit 46

1. Définition des habiletés rythmiques 46
2. Liens entre habiletés rythmiques et langage écrit dans le développement typique 49
3. Mécanismes explicatifs du lien entre rythme et langage écrit 52
4. Habiletés rythmiques chez les élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit 58
5. Conclusion 62

Chapitre 4 : Entraîner la motricité fine et les habiletés rythmiques – apport de l'utilisation d'un jeu vidéo 63

1. Des jeux vidéo pour entraîner les habiletés motrices 63
2. Des jeux vidéo pour entraîner les habiletés rythmiques 66
3. Conclusion 67

Chapitre 5 : Problématique et objectifs de la thèse 68

Partie expérimentale **71**

Chapitre 6 : Relations entre les habiletés motrices et l'apprentissage du langage écrit dans le développement typique 72

Etude 1.1. Mécanismes sous-tendant les liens entre la motricité fine et le développement du langage écrit chez les élèves de CE2. 73

1. Introduction 73
2. Méthode 75
3. Résultats 79
4. Discussion 86
5. Conclusion 90

Etude 1.2. Effet distinct de la dextérité manuelle et des habiletés graphomotrices sur l'apprentissage de la lecture et de l'écriture 91

1. Introduction 91
2. Méthode 93
3. Résultats 96
4. Discussion 102
5. Conclusion 108

Conclusion du Chapitre 6 109

Chapitre 7 : Relations entre les habiletés rythmiques et l'apprentissage du langage écrit dans le développement typique 111

Etude 2.1. Mécanismes sous-tendant les liens entre les habiletés rythmiques et l'apprentissage du langage écrit chez les élèves de CE2 112

1. Introduction 112
2. Méthode 114
3. Résultats 116
4. Discussion 123
5. Conclusion 126

Etude 2.2. Effet distinct des différentes habiletés rythmiques sur l'apprentissage de la lecture et de l'ecriture 127

1. Introduction 127
2. Méthode 129
3. Résultats 131
4. Discussion 132
5. Conclusion 135

Conclusion du Chapitre 7 136

Chapitre 8 : Influences indépendantes ou conjointes des habiletés motrices et rythmiques sur le langage écrit dans le développement typique 138

1. Introduction 138
2. Méthode 139

3. Résultats 139
4. Discussion 142
5. Conclusion 144
Conclusion du chapitre 8 ... 145

Chapitre 9 : Influences des habiletés motrices et rythmiques sur le langage écrit chez les élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit ... 147

1. Introduction 147
2. Méthode 149
3. Résultats 151
4. Discussion 159
5. Conclusion 165

Chapitre 10 : Un jeu vidéo entraînant les habiletés motrices : quels bénéfices sur la motricité et l'apprentissage du langage écrit chez les élèves avec ou sans difficultés ? ... 167

1. Introduction 167
2. Méthode 168
3. Résultats 177
4. Discussion 183
5. Conclusion 190

Discussion ... 191

1. Synthèse des résultats 193
2. Implications de la thèse 200
3. Conclusion 217

Bibliographie ... 219

Table des figures et tableaux ... 243

Annexes ... 248

INTRODUCTION

L'apprentissage du langage écrit est un objectif essentiel de la scolarisation, qui commence dès l'entrée en maternelle où les enfants apprennent à tracer et reconnaître les lettres, et qui se poursuit tout au long de la scolarité avec la maîtrise progressive de processus de plus haut niveau comme la compréhension et la rédaction de texte. Outre la large part qu'occupe cet apprentissage à l'école, il constitue plus généralement le socle sur lequel va reposer l'ensemble des enseignements proposés tout au long de la scolarité. De ce fait, la présence de difficultés d'apprentissage de l'écrit ont des répercussions importantes sur la réussite à l'école en général, mais peut aussi impacter négativement l'intégration sociale des enfants à l'école voire l'insertion professionnelle à l'âge adulte (Inserm, 2007). Une meilleure compréhension des facteurs impliqués dans l'apprentissage du langage écrit est donc à la fois cruciale pour affiner les pratiques pédagogiques existantes mais aussi pour mieux comprendre quelles peuvent être les difficultés à l'origine des troubles de l'apprentissage du langage écrit et proposer des pistes de remédiation. Aujourd'hui, l'étude des habiletés qui influencent cet apprentissage constitue un enjeu majeur dans la recherche en psychologie et un grand nombre de travaux ont démontré l'implication d'habiletés langagières telles que les habiletés phonologiques (e.g. Goswami & Bryant, 2016) ou encore la qualité du lexique (Perfetti et al., 1997) dans l'apprentissage de l'écrit.

Au-delà de l'effet de ces habiletés langagières, un nombre croissant d'études suggère que d'autres prédicteurs non-langagiers – comme la motricité fine et les habiletés rythmiques – influent sur l'apprentissage du langage écrit. Cette hypothèse est soutenue par l'étude des élèves présentant une dyslexie, chez qui les difficultés motrices et rythmiques, fréquemment associées, pourraient interagir avec le trouble d'apprentissage du langage écrit (Goswami, 2011; Jover et al., 2013). De plus, l'étude des élèves sans difficulté rapporte que ces deux habiletés, évaluées principalement en maternelle, prédisent le niveau ultérieur de lecture et d'écriture (e.g. Cameron et al., 2012; Ozernov-Palchik et al., 2018). Dans ce travail de thèse les relations entre ces deux habiletés non-langagières et l'apprentissage du langage écrit chez des élèves du CE2 au CM2 seront étudiées, afin de confirmer et d'expliquer leur influence sur la lecture et l'écriture chez des élèves de cette tranche d'âge avec ou sans troubles.

Contexte de la thèse.

Cette thèse a été réalisée dans le cadre du projet DysApp, sélectionné dans le cadre du volet e-Fran financé par la Caisse de Dépôt (PIA 2). Cet appel à projet cherchait à promouvoir les projets de recherche innovants réunissant plusieurs acteurs de l'éducation autour d'une question portant sur l'utilisation d'outils numériques à l'école. L'objectif de DysApp était de développer un nouvel outil prenant la forme d'un jeu vidéo sur tablette afin de venir en aide aux élèves

présentant un trouble de la motricité et/ou de l'apprentissage du langage écrit. Plus spécifiquement, l'outil a été conçu pour entraîner des compétences non-langagières (motricité fine, habiletés rythmiques et planification visuo-spatiale), qui sont altérées dans les troubles de la motricité – comme le trouble développemental de la coordination – et qui pourraient également entraver l'apprentissage du langage écrit.

Le projet a réuni différents partenaires autour de la conception et de la validation de l'efficacité du jeu. Le développement de l'outil a été mené par la société Tralalère – une entreprise spécialisée dans le développement d'outils numériques à visée éducative. Les activités ont été conçues en collaboration avec deux laboratoires de recherches : un laboratoire de psychologie expérimentale, le CeRCA (UMR 7295, Université de Poitiers, CNRS) et un laboratoire d'informatique, le CEDRIC (EA 4629, CNAM). Plus spécifiquement, le rôle du CeRCA était de guider l'entreprise dans le choix des activités, pour entraîner au mieux les habiletés ciblées, et de tester scientifiquement l'efficacité de l'outil développé. Le CEDRIC était quant à lui impliqué dans l'implémentation d'un système adaptatif permettant de proposer aux élèves des exercices en fonction de leurs difficultés. L'académie de Poitiers a également participé au projet, permettant de tester le jeu auprès de plus de 300 élèves tout venants de CE2 et CM1 dans 26 établissements scolaires partenaires. Deux associations de parents d'élèves présentant des troubles des apprentissages (AADYS et Handicap Ecole) ont également été impliquées dans le cadre du projet pour évaluer les bénéfices du jeu spécifiquement dans cette population.

Présentation du travail de thèse.

Dans ce contexte, ce travail de thèse a été réalisé pour répondre à deux principaux objectifs. Le premier est d'étudier les liens entre deux habiletés non-langagières entraînées par le jeu – la motricité fine et les habiletés rythmiques – et l'apprentissage du langage écrit chez des élèves du CE2 au CM2 avec ou sans troubles. Ce premier objectif vise à la fois à démontrer l'existence de ces relations et à modéliser les mécanismes qui les sous-tendent afin de mieux comprendre comment ces compétences non langagières peuvent influencer l'apprentissage de l'écrit. Le second objectif de ce travail est d'évaluer les bénéfices de la pratique du jeu vidéo développé dans le cadre du projet sur l'apprentissage de la lecture et de l'écriture chez des élèves avec et sans troubles. Ceci permet, d'une part de questionner l'intérêt de l'utilisation d'un jeu vidéo comme outil d'entraînement des habiletés motrices et rythmiques, et d'autre part, d'évaluer l'efficacité d'interventions non-langagières sur l'apprentissage du langage écrit dans différentes populations.

La thèse sera organisée autour de deux parties. Dans une première partie théorique, nous évoquerons brièvement les connaissances actuelles sur l'apprentissage du langage écrit et les habiletés langagières et non langagières impliquées dans cet apprentissage (Chapitre 1 :). Nous présenterons également les arguments en faveur d'une influence de la motricité fine et des habiletés rythmiques sur l'apprentissage du langage écrit à la fois dans le développement typique et chez les élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit (Chapitre 2 :Chapitre 3 :). Enfin, un chapitre sera consacré spécifiquement aux résultats et limites des études s'étant intéressées aux bénéfices de la pratique de jeux vidéo sur la motricité et le rythme (Chapitre 4 :).

La seconde partie présentera les différentes études corrélationnelles et interventionnelles menées dans le cadre de ce travail de thèse. Les chapitres Chapitre 6 :, Chapitre 7 : et Chapitre 8 : seront consacrés à la présentation de résultats de trois études corrélationnelles visant à évaluer les relations entre les deux habiletés non-langagières et l'apprentissage de différentes dimensions du langage écrit – l'identification de mot, le traitement orthographique, la compréhension écrite et la rédaction. L'une des études, menée chez une large cohorte de 278 élèves de CE2 a été subdivisée en trois sous-questions traitées dans chacun des chapitres afin d'interroger les mécanismes qui sous-tendent les liens entre les habiletés motrices et rythmiques et le langage écrit au travers d'une méthode de modélisation par équations structurales (chapitre Chapitre 6 :Chapitre 7 :et Chapitre 8 :). Plus spécifiquement, le Chapitre 6 : traitera de la motricité fine, le Chapitre 7 :, des habiletés rythmiques et le Chapitre 8 :, de l'influence conjointe de ces deux habiletés sur l'apprentissage du langage écrit. Le Chapitre 9 : sera quant à lui consacré aux conséquences de difficultés motrices et rythmiques associées dans les troubles de l'apprentissage du langage écrit. Enfin, le Chapitre 10 : présentera les résultats d'une étude interventionnelle visant à évaluer les bénéfices d'un jeu ciblant les habiletés motrices sur l'apprentissage du langage écrit en CM1.

CADRE THEORIQUE

CHAPITRE 1 : L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT ET LES HABILETES LANGAGIERES ET NON-LANGAGIERES IMPLIQUEES DANS CET APPRENTISSAGE

L'apprentissage du langage écrit implique de savoir maîtriser à la fois des processus de bas niveau, comme l'identification et production orthographique de mots, mais aussi des processus de plus haut niveau pour pouvoir comprendre et produire des textes. Comprendre comment ces différentes compétences se construisent au fil du développement et quelles sont les habiletés impliquées dans cet apprentissage constitue un enjeu crucial pour guider les enseignants dans leur pratique pédagogique mais aussi pour mieux comprendre les difficultés expérimentées dans les troubles de l'apprentissage du langage écrit, comme la dyslexie. L'objectif du présent chapitre est d'exposer brièvement les connaissances actuelles sur l'apprentissage de la lecture et de l'écriture et de présenter les prédicteurs langagiers et non langagiers impliqués dans cet apprentissage.

1. APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT

1.1. APPRENDRE A LIRE

Selon le modèle simple de la lecture de Gough et Tunmer (1986), la lecture renvoie à la capacité à comprendre ce que l'on lit. Le modèle distingue deux compétences : la capacité à identifier et accéder au sens d'un mot, et la capacité à comprendre ce que l'on lit – et donc à accéder au sens véhiculé par un ensemble de mots, qu'il s'agisse d'une phrase ou d'un texte. Alors que l'identification du mot repose sur des processus propres à l'écrit, la compréhension écrite relèverait à la fois de l'identification des mots écrits et des compétences langagières propres à l'oral. Dans cette section, nous exposerons succinctement les connaissances actuelles sur l'apprentissage de la lecture en distinguant ces deux dimensions : l'identification de mots et la compréhension écrite.

1.1.1. Identification de mots

Un lecteur expert est capable à la fois d'identifier rapidement les mots connus mais aussi de décoder des mots nouveaux grâce à la coexistence de deux procédures de lecture : une procédure sublexicale et une procédure lexicale (Coltheart et al., 2001). La procédure sublexicale (ou décodage) permet de décomposer les mots écrits en petites unités, les graphèmes afin de les transformer en phonèmes correspondant (i.e. conversion graphème-phonème). Les différents graphèmes décodés successivement sont ensuite assemblés afin d'accéder à la forme sonore du

mot. La procédure lexicale permet quant à elle d'identifier rapidement un mot en accédant directement au lexique orthographique stocké en mémoire à long terme. La représentation orthographique du mot, en lien avec sa représentation phonologique et sémantique, permet ensuite d'accéder rapidement à son sens et à sa prononciation. Plus rapide que la procédure sublexicale, cette voie de lecture est celle qui permet chez l'expert d'identifier très rapidement les mots connus mais également de lire précisément les mots irréguliers – qui ne peuvent être lus sans erreur en se basant uniquement sur la procédure sublexicale. Pour apprendre à lire des mots, les enfants vont donc devoir développer ces deux procédures de lecture.

Les premiers modèles à étape de la lecture, comme par exemple celui de Frith (1986), ont proposé de distinguer différents stades en fonction de la stratégie de lecture adoptée par l'enfant. Par exemple, Frith (1986) différencie un stade logographique où l'enfant utilise la forme générale du mot pour le reconnaître, un stade alphabétique où l'enfant utilise la conversion grapho-phonémiques et enfin un stade orthographique où l'enfant se base sur des unités orthographiques et non phonologiques pour reconnaître un mot. Ces modèles ont depuis été remis en cause. En effet, les modèles de la lecture chez l'expert suggèrent que les voies sublexicale (alphabétique) et lexicale (orthographique) sont simultanément activées lors de l'identification d'un mot, ce qui indique que l'une ou l'autre des stratégies n'est pas privilégiée en fonction du niveau de développement. D'autre part, les stratégies alphabétiques et orthographiques se développent parallèlement, et ce dès le début de l'apprentissage de l'écrit (Castles et al., 2018; Sprenger-Charolles et al., 2003). Cependant, il apparaît – comme proposé par ces modèles développementaux, qu'une stratégie logographique précède la stratégie alphabétique (Castles et al., 2018) et que l'apprentissage explicite des règles grapho-phonémique au début de l'apprentissage de la lecture permet d'enclencher la mise en place du décodage – qui supplante alors la stratégie logographique (Castles et al., 2018). Par exemple, avant l'apprentissage du code alphabétique, les élèves associent plus facilement à un mot une orthographe facile à distinguer visuellement bien que non phonologiquement plausible (e.g. l'orthographe « wBc », qui alterne des minuscules et majuscules, est plus facilement identifiée et associée au mot girafe, bien qu'elle ne représentant pas phonétiquement le mot en question). A l'inverse, les enfants qui commencent à maîtriser le principe alphabétique ont plus de facilité à associer une orthographe proche phonétiquement (e.g. jrf pour girafe) (Ehri & Wilce, 1985).

Au début de l'apprentissage explicite de la lecture, l'enfant utilise donc principalement la lecture-décodage pour identifier les mots. Par exemple, en début de CP, les mots réguliers et les pseudo-mots sont lus aussi précisément et aussi rapidement (Sprenger-Charolles et al., 2003). Néanmoins, la procédure orthographique va rapidement se mettre en place et dès le milieu du CP, les enfants commencent à mieux lire les mots réguliers que les pseudo-mots, ce qui témoigne de

la mise en place de cette procédure (Sprenger-Charolles et al., 2003). D'après Share (1995), c'est le décodage lui-même qui va permettre la mise en place de cette procédure lexicale car il permet d'accéder au sens du mot au travers de sa forme orale et de le mettre en lien avec sa représentation orthographique au travers du traitement lettre à lettre. Ce mécanisme d'apprentissage permet la construction implicite des représentations orthographiques par la lecture-décodage et les deux stratégies de lecture se développent peu à peu, parallèlement.

1.1.2. Compréhension écrite

Savoir identifier un mot ne suffit pas pour comprendre ce que l'on lit : en effet, il est nécessaire non seulement de comprendre le sens des mots lus mais également d'appréhender les relations qu'ils entretiennent au sein d'une phrase et de mettre en lien les phrases elles-mêmes afin d'avoir une représentation cohérente des informations véhiculées par une phrase ou un texte. Chez l'expert, la compréhension écrite repose sur un processus dynamique qui permet de mettre à jour et de construire un modèle de situation. Ce modèle de situation constitue une représentation mentale du texte lu à laquelle sont intégrées des connaissances propres au lecteur (Bianco, 2016; Castles et al., 2018; Van Dijk & Kintsch, 1983). Afin d'élaborer ce modèle, il est nécessaire d'extraire les informations au fur et à mesure de la lecture tout en maintenant les informations pertinentes dans la mémoire de travail. L'intégration de nouvelles informations se fait en suivant plusieurs étapes. Le premier niveau correspond à la représentation de surface qui permet d'appréhender l'ordre des mots et leurs relations au sein de la phrase. Cependant, ce niveau ne permet pas d'établir les relations entre les propositions. Pour cela, le lecteur doit constituer une base de texte permettant d'une part de synthétiser chaque proposition sémantique et de les organiser afin d'établir une cohérence locale (microstructure) et d'autre part de hiérarchiser les propositions pour conserver l'essentiel (dégagement de la macrostructure). Enfin, dans le troisième niveau, le lecteur incorpore ses propres connaissances antérieures pour élaborer une représentation cognitive de la situation, le modèle de situation. Ces différentes étapes s'effectuent de façon parallèle au fur et à mesure de la lecture (Bianco, 2016; Van Dijk & Kintsch, 1983).

La compréhension écrite repose donc sur un ensemble de mécanismes langagiers et cognitifs, et son apprentissage nécessite le développement d'autres compétences qu'il est essentiel d'identifier. Le modèle simple de la lecture de Gough et Tunmer (1986) a initialement proposé que la compréhension écrite repose principalement sur l'identification de mots et la compréhension orale. Cependant, s'il apparaît que l'identification de mots constitue un prédicteur essentiel de la compréhension écrite (Bianco, 2016; Castles et al., 2018; Perfetti & Stafura, 2014), plusieurs auteurs soulignent la nécessité de distinguer différentes compétences linguistiques et cognitives dans la compréhension. Ainsi, certains auteurs distinguent les compétences

langagières de bas niveau – comme le vocabulaire et le traitement syntaxique – et des compétences propres au traitement du discours – comme la capacité à faire des inférences, à saisir la structure d'un texte et à contrôler et évaluer sa compréhension pour corriger les erreurs (Bianco, 2015; Castles et al., 2018). Ces différentes habiletés contribuent de façon indépendante à l'apprentissage de la compréhension y compris en maternelle, ce qui indique que leur développement parallèle est nécessaire pour acquérir une compréhension de la lecture efficiente (Kendeou et al., 2009).

1.2. APPRENDRE A ECRIRE

L'apprentissage du langage écrit ne se limite pas à la lecture ; il est également indispensable d'apprendre à transposer à l'écrit des mots, des phrases et des textes. Comme pour la lecture, la production écrite peut être divisée en plusieurs compétences – de bas niveau (compétences orthographiques) et de haut niveau (compétences rédactionnelles) (Berninger et al., 1992; McCutchen, 1996). Dans la suite de cette section, les processus impliqués dans l'apprentissage de ces deux compétences seront développés succinctement.

1.2.1. Compétences orthographiques

Chez l'adulte expert, la production d'un mot familier implique le rappel des représentations stockées dans le lexique orthographique (Rapp & Tainturier, 2001). La construction de ces représentations constitue donc l'enjeu essentiel dans l'apprentissage de l'écriture de mots. Comme pour la lecture de mots, il a été proposé que l'apprentissage de l'orthographe lexicale s'appuie initialement sur l'utilisation de correspondances phonèmes-graphèmes. Ceci permettrait à l'enfant de produire des mots phonologiquement plausibles. Cependant, ces connaissances phono-graphémiques ne suffisent pas pour produire l'orthographe de nombreux mots, et ce notamment dans les langues peu consistantes comme le français, où un même phonème peut être transcrit de plusieurs façons (par exemple : le son /o/ peut s'écrire o, ot, eau, au, aux, etc.). De ce fait, l'apprentissage d'une représentation orthographique propre à chaque mot est nécessaire pour pouvoir produire leur orthographe correcte. L'hypothèse de l'auto-apprentissage de Share (1995) suggère que cet apprentissage s'effectue implicitement au travers du décodage qui permet peu à peu de mémoriser la forme orthographique du mot. Ce mécanisme d'auto-apprentissage est très dépendant de la fréquence d'exposition : les mots les plus fréquents – et donc les plus souvent décodés – sont donc mieux orthographiés. Cet effet de fréquence se retrouve dès le CP, ce qui indique que les compétences orthographiques émergent dès le début de l'apprentissage de l'écrit (Martinet et al., 2004).

Au-delà de ce mécanisme d'auto-apprentissage au travers du décodage, l'enfant va rapidement s'appuyer sur ses connaissances lexicales pour développer ses compétences

orthographiques. L'apprentissage par analogie va ainsi permettre d'orthographier un nouveau mot en s'appuyant sur l'orthographe d'un mot semblable déjà connu. Le recours à l'analogie a par exemple été démontré au travers de tâches d'écriture de pseudo-mots, qui, quand ils sont proches d'un mot connu (e.g. /folda/ proche du mot soldat) sont orthographiés de façon similaire (foldat) (Bosse et al., 2003; Martinet et al., 2004). Ces études ont permis de démontrer que l'utilisation de l'analogie est utilisée dès le CP pour peu que l'orthographe du mot servant de référence soit déjà connue (Bosse et al., 2003; Martinet et al., 2004). L'apprentissage de l'orthographe s'appuie également sur l'exploitation des régularités du système d'écriture comme les régularités graphotactiques (e.g. en français, un mot ne commence jamais par une consonne doublée) ou morphologiques (e.g. en français, le son /et/ s'orthographie -ette quand il est utilisé comme suffixe diminutif) (Deacon et al., 2008; Pacton et al., 2013; Treiman & Bourassa, 2000). Des tâches d'apprentissages de pseudo-mots ont permis de tester l'influence de ces règles dans différentes tranches d'âge. Par exemple, chez les élèves de CE2, le rappel d'un mot qui ne suit pas les règles graphotactiques (e.g. présence d'une consonne doublée suite à une consonne isolée comme dans « *guprrane* ») se traduit par une augmentation des erreurs de transposition comparativement au rappel d'un mot conforme à ces règles (e.g. *gupprane* au lieu de *guprrane*). Ce résultat suggère que les élèves de CE2 s'appuient sur des règles graphotactiques pour rappeler l'orthographe du mot nouvellement appris.

L'ensemble des mécanismes présentés dans cette section participe à l'élaboration des compétences orthographiques. Cependant, l'apprentissage de l'écriture ne se limite pas à apprendre à écrire correctement un mot et les enfants doivent apprendre également à produire des phrases et des textes, ce qui implique d'autres processus allant au-delà du traitement orthographique.

1.2.2. Compétences rédactionnelles

L'un des premier modèles proposé pour décrire les processus rédactionnels chez l'adulte et celui de Hayes et Flower (1980). Ce modèle propose que la rédaction repose sur trois processus rédactionnels en interaction avec la tâche à réaliser et avec la mémoire à long terme, qui permet de récupérer des connaissances pour produire le texte. Ces trois processus correspondent à la *planification,* qui permet la génération et l'organisation des idées en fonction de son but, la *traduction* qui permet de transformer les idées en une forme linguistique (mots, phrases) et enfin la *révision* permet de relire et d'éditer le texte produit. Ce modèle a ensuite été repris par d'autres auteurs qui y introduisent notamment la mémoire de travail, permettant de coordonner les différents processus pendant la rédaction (Hayes, 1996; Kellogg, 1996; McCutchen, 1996). Le modèle de Kellogg (1996) suggère plus spécifiquement une implication distincte des différents systèmes de la mémoire de travail en fonction des processus rédactionnels. Par ailleurs, ces

différents processus sont redéfinis et parfois subdivisés dans des modèles plus récents. Par exemple, l'équipe de Berninger propose de distinguer deux sous composantes dans la traduction : la *génération de texte* qui permet de transformer l'idée en représentations linguistiques et la *transcription* qui permet d'externaliser le langage sous forme de symboles et qui repose à la fois sur une maîtrise du geste d'écriture et des codes orthographiques (Berninger et al., 1992; Berninger et al., 1996).

Les différents modèles présentés jusqu'à présent ont été formulés pour les experts et ne permettent pas de rendre compte de l'évolution des différents processus rédactionnels au cours du développement. Le modèle capacitaire proposé par McCutchen (1996), qui propose que les différents processus rédactionnels sont en compétition pour accéder à des ressources cognitives limitées, permet quant à lui d'apporter des éléments pour comprendre l'évolution des compétences de rédaction chez l'enfant. Ce modèle suggère en effet que les novices, n'ayant pas encore automatisé les processus de plus bas niveau, ne peuvent consacrer que peu de ressources cognitives aux processus rédactionnels les plus complexes. Par exemple, le début de l'écrit (i.e. du CP au CE2) se caractérise par des difficultés de transcription : le geste graphomoteur et les compétences orthographiques, encore peu automatisés, exercent une contrainte sur la mémoire de travail et limitent les ressources allouées aux autres processus rédactionnels (Berninger et al., 1996; McCutchen, 1996). En accord avec ces hypothèses, plusieurs études corrélationnelles et interventionnelles indiquent que les compétences orthographiques et graphomotrices sont un prédicteur de la qualité de la rédaction dans différentes tranches d'âge et que les interventions ciblant l'orthographe améliorent également la qualité de la rédaction (Abbott et al., 2010; Graham & Santangelo, 2014; Limpo et al., 2017). Avec l'automatisation de ces compétences de transcription, d'autres processus – comme la traduction (transformer les idées en éléments linguistiques) et la planification (organiser les différentes idées) peuvent se développer peu à peu.

1.3. LIENS ENTRE LES DIFFERENTES DIMENSIONS DU LANGAGE ECRIT

Bien que les différentes dimensions du langage écrit citées précédemment soient parfois étudiées de façon distincte, elles interagissent et se développent conjointement. Tout d'abord, comme suggéré dans les sections précédentes, l'identification de mots et le traitement orthographique sont des compétences étroitement liées qui s'influencent mutuellement (Abbott et al., 2010). Plus spécifiquement, l'hypothèse de l'auto-apprentissage de Share (1995) propose que la lecture décodage permette de créer une représentation orthographique du mot. Inversement, la pratique orthographique permet d'améliorer la reconnaissance de nouveaux mots comparativement à la lecture seule (Ouellette, 2010; Shahar-Yames & Share, 2008). Dans les sections précédentes, l'influence des compétences de bas niveau (identification de mots et compétences orthographiques) sur les compétences de haut niveau (compréhension et rédaction)

a également été soulignée. En effet, l'identification de mots est un prédicteur de la compréhension écrite – notamment chez les plus jeunes (Massonnié et al., 2019; Verhoeven & Leeuwe, 2008). Cette contribution est indépendante de celle du langage oral dans différentes tranches d'âge (Kendeou et al., 2009; Verhoeven & Leeuwe, 2008). De façon similaire, les compétences orthographiques jouent un rôle déterminant dans la rédaction de texte : l'orthographe est ainsi l'un des principaux prédicteurs du niveau rédactionnel. La qualité du texte produit et la longueur du texte (nombre de mots) est prédite par le niveau d'orthographe chez les enfants tout venants et chez les enfants présentant un trouble du langage écrit (Connelly et al., 2012), et cet effet prédictif se retrouve tout au long du développement du CP à la 5ème (Abbott et al., 2010). Enfin, plusieurs études longitudinales révèlent qu'apprendre à lire un texte influe sur les compétences rédactionnelles – et qu'inversement, le niveau de rédaction est un prédicteur de la compréhension écrite à partir du CE2 (Abbott et al., 2010; Altemeier et al., 2006). L'ensemble de ces travaux souligne donc que le développement des différentes dimensions du langage écrit est interconnecté.

2. HABILETES PHONOLOGIQUES ET APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT

Au-delà des interactions entre les différentes dimensions du langage écrit, de nombreuses études s'intéressent aux habiletés qui prédisent l'apprentissage de l'écrit. Plus précisément, un nombre important de travaux a mis en évidence l'implication d'habiletés langagières et notamment des habiletés phonologiques [1] – telles que la conscience phonologique, la dénomination rapide ou encore la mémoire phonologique – sur différentes dimensions du langage écrit dans le développement typique (Goswami & Bryant, 2016; Kirby et al., 2010; Melby-Lervåg et al., 2012) et dans les troubles de l'apprentissage du langage écrit (Snowling, 1995; Ziegler & Goswami, 2005). Dans cette partie, ces différents prédicteurs phonologiques seront exposés afin de préciser leur implication dans l'apprentissage des différentes dimensions du langage écrit.

2.1. CONSCIENCE PHONOLOGIQUE

La conscience phonologique correspond à la capacité à identifier et manipuler les unités phonologiques d'un mot (e.g. syllabes, rimes/attaques, phonèmes) (Melby-Lervåg et al., 2012; Ziegler & Goswami, 2005). Elle est indispensable à la mise en place du décodage, qui nécessite à la fois de savoir découper le mot en graphèmes (identifier les lettres et ensembles de lettres) mais aussi de découper les mots à l'oral en petites unités (phonèmes). Le développement de la

[1] L'apprentissage du langage écrit est également influencé par des habiletés langagières non-phonologiques (e.g. habiletés sémantiques et morphologiques). Cependant, ces dernières ne seront pas traitées dans le cadre de la thèse.

conscience phonologique est progressif et permet tout d'abord le traitement des unités linguistiques les plus larges, comme les syllabes, qui est maîtrisé vers l'âge de 3-4 ans. La conscience des rimes et attaques est plus tardive et est établie vers 4-5 ans (Ziegler & Goswami, 2005). Quant à la conscience phonémique elle se mettrait en place suite à l'apprentissage de la lecture (Ziegler & Goswami, 2005). Il y aurait donc deux niveaux dans le développement de la conscience phonologique : un premier niveau de traitement appris implicitement en amont de la lecture et un second niveau – la conscience phonémique – qui nécessiterait un apprentissage explicite (Ziegler & Goswami, 2005).

La conscience phonologique est un prédicteur de l'émergence de la lecture et de l'orthographe (Juel et al., 1986). Cette influence se retrouve dans toutes les langues (Ziegler et al., 2010) et perdure au fil du développement (Frost et al., 2005). De plus, bien que la conscience phonémique se développe consécutivement à la lecture, elle constitue par la suite le prédicteur le plus important de l'émergence du langage écrit (Melby-Lervåg et al., 2012; Ziegler et al., 2010). En outre, son implication dans l'apprentissage du langage écrit ne se limite pas aux compétences de bas niveau puisqu'elle influence directement et indirectement (i.e. au travers de l'identification de mots) l'apprentissage de la compréhension écrite (Massonnié et al., 2019). De par le rôle crucial de cette habileté dans l'apprentissage du langage écrit, les interventions ciblant la conscience phonologique ont fait l'objet de nombreuses études et ont prouvé leur efficacité pour améliorer le décodage et l'identification de mots (Bianco et al., 2012; Bus & van IJzendoorn, 1999; Suggate, 2016), les compétences orthographiques (Bus & van IJzendoorn, 1999; Suggate, 2016) et la compréhension écrite (Suggate, 2016).

2.2. DENOMINATION RAPIDE

La dénomination rapide correspond à la capacité à nommer de façon rapide et automatique des stimuli visuels familiers, qu'il s'agisse d'images ou de stimuli alphanumériques, comme des lettres ou des chiffres (Kirby et al., 2010). Elle permet d'évaluer la vitesse d'accès aux représentations phonologiques stockées en mémoire à long terme (Kirby et al., 2010), bien que certains auteurs proposent que la dénomination rapide mesure également des processus non-phonologiques comme le traitement orthographique (Kirby et al., 2010; Moll et al., 2014).

La dénomination rapide est corrélée à la conscience phonologique mais elle prédit néanmoins le développement du langage écrit au-delà de ce premier prédicteur (Kirby et al., 2010; Ziegler et al., 2010). Elle pourrait être d'autant plus prédictive du niveau de lecture chez les élèves les plus âgés (du CE2 au CM2) par rapport aux élèves plus jeunes (de la maternelle au CE1), alors que l'influence de la conscience phonologique semble diminuer au cours du temps (Kirby et al., 2003). De plus, l'influence du niveau de dénomination rapide a été principalement montrée sur la

vitesse d'identification de mots et de décodage (Kirby et al., 2010; Ziegler et al., 2010) alors que la conscience phonologique semble être un meilleur prédicteur de l'identification de mots et des compétences orthographiques (Moll et al., 2014; Ziegler et al., 2010). Toutefois, certains travaux rapportent que la dénomination rapide prédit également les compétences orthographiques (Lundetræ & Thomson, 2018) et la compréhension écrite (Kirby et al., 2003; Massonnié et al., 2019) au-delà de la conscience phonologique.

2.3. MEMOIRE DE TRAVAIL PHONOLOGIQUE

La mémoire de travail phonologique correspond à la capacité à stocker et manipuler des informations phonologiques sur une courte période de temps et se distingue de la mémoire à court terme qui permet de stocker passivement des informations (Peng et al., 2018). Corrélée aux habiletés phonologiques, et notamment à la conscience phonologique (Georgiou et al., 2008; Oakhill & Kyle, 2000), la mémoire de travail phonologique prédit néanmoins l'identification de mots et l'orthographe au-delà de ces autres prédicteurs langagiers dans différentes tranches d'âge (Best et al., 2011; Christopher et al., 2012; Georgiou et al., 2008; Peng et al., 2018). Cette habileté est également altérée dans les troubles de l'apprentissage écrit comme la dyslexie (Katzir et al., 2006; Swanson et al., 2009). L'ensemble de ces résultats souligne l'implication de la mémoire de travail phonologique dans l'apprentissage des compétences de langage écrit de bas niveau et certains auteurs proposent que cette habileté joue notamment un rôle primordial lors de la conversion grapho-phonémique ou de la conversion phono-graphémique, et qu'elle constitue donc un facteur crucial pour initier l'apprentissage de l'écrit (Peng et al., 2018).

Par ailleurs, comme évoqué dans les sections précédentes, plusieurs modèles théoriques placent la mémoire de travail phonologique au cœur du développement des compétences de haut niveau (Hayes, 1996; Just & Carpenter, 1992; Kellogg, 1996; McCutchen, 1996). En effet, cette habileté jouerait un rôle déterminant dans les processus de compréhension car elle permettrait de maintenir les informations pertinentes durant la lecture pour mieux accéder au sens (Butterfuss & Kendeou, 2018; Just & Carpenter, 1992). Plusieurs études montrent ainsi qu'elle prédit le niveau de compréhension après contrôle des compétences de décodage et d'autres habiletés langagières comme la dénomination rapide (Christopher et al., 2012), le vocabulaire et la compréhension orale (Potocki et al., 2017). Par ailleurs, la mémoire de travail phonologique joue également un rôle dans la rédaction et permet de coordonner et de s'engager dans les différents processus rédactionnels (Berninger & Winn, 2006; Chanquoy & Alamargot, 2002; Kellogg, 1996). Elle serait notamment impliquée dans la construction et le maintien de la représentation des idées en mémoire, la mise à jour de cette représentation pendant la mise en texte et dans les processus de révision (Chanquoy & Alamargot, 2002; McCutchen, 1996). Des

études utilisant le paradigme de la double tâche ont permis de confirmer l'implication de la mémoire de travail phonologique chez l'adulte (Kellogg et al., 2007). La mémoire de travail est également un prédicteur de la qualité de la rédaction chez l'enfant, que ce soit en début d'apprentissage – comme en CE1 (Cordeiro et al., 2020), ou chez les élèves plus âgés en CM1 et en 6ème (Drijbooms et al., 2015, 2017).

L'implication des différentes habiletés phonologiques – comme la conscience phonologique, la dénomination rapide et la mémoire de travail phonologique – dans l'émergence du langage écrit fait actuellement consensus. Plus précisément, la mémoire de travail phonologique semble être un élément clé dans l'apprentissage des compétences de plus haut niveau (Berninger & Chanquoy, 2012; Butterfuss & Kendeou, 2018; McCutchen, 1996). Notons cependant que, certains de ces travaux intègrent la mémoire de travail phonologique non pas comme une habileté phonologique mais plutôt comme une mesure du fonctionnement exécutif (e.g. Cordeiro et al., 2020; Drijbooms et al., 2015; Potocki et al., 2017), en accord avec le modèle des fonctions exécutives proposé par Miyake et al. (2000). Or, il semble que plus généralement, l'ensemble des fonctions exécutives – y compris quand elles ne comportent pas de composante verbale – sont impliquées dans l'apprentissage de la lecture et l'écriture. Dans la prochaine section, différents arguments en faveur de l'implication des fonctions exécutives non-langagières seront présentés.

3. FONCTIONS EXECUTIVES NON LANGAGIERES ET APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT

Les fonctions exécutives désignent des processus de haut niveau qui permettent de contrôler et d'adapter les activités cognitives et les comportements orientés vers un but (Miyake et al., 2000). Si dans un premier temps, le contrôle exécutif a été considéré comme un processus unitaire – comme dans le modèle de Norman et Shallice, (1980), actuellement, le modèle fractionné de Miyake et al. (2000), qui définit trois fonctions distinctes, est celui qui a fait l'objet du plus grand nombre de recherches. Ces trois fonctions sont *l'inhibition*, qui correspond à la capacité à contrôler une réponse automatique ou ignorer un stimulus externe qui peut empêcher la réalisation de la tâche, *la flexibilité* qui permet de changer de perspective/de tâche rapidement et *la mise à jour de la mémoire de travail* qui permet de manipuler et mettre à jour les informations stockées en mémoire de travail. Il existe également d'autres fonctions de plus haut niveau comme la planification ou la résolution de problèmes qui impliqueraient les trois fonctions dites de bas niveau (Miyake et al., 2000). En accord avec ce modèle, ce travail de thèse intégrera les trois fonctions

exécutives de bas niveau (i.e. mémoire de travail, l'inhibition et la flexibilité) auxquelles sera ajouté une fonction exécutive de plus haut niveau, la planification.

L'influence de ces différentes fonctions sur la réussite scolaire a été largement étayée dans la littérature à la fois chez les élèves de maternelle (Cameron et al., 2012; Foy & Mann, 2013; Monette et al., 2011) et chez les élèves plus âgés (Best et al., 2011; St Clair-Thompson & Gathercole, 2006). Plus spécifiquement, au-delà de l'implication de la mémoire de travail phonologique[2], il semble que les fonctions exécutives non-langagières influent sur différentes dimensions du langage écrit, qu'elles soient de bas niveau (identification de mots et orthographe), ou de haut niveau (compréhension écrite et rédaction).

3.1. FONCTIONS EXECUTIVES NON-LANGAGIERES ET COMPETENCES DE LANGAGE ECRIT DE BAS NIVEAU

Au-delà de l'implication de la mémoire de travail phonologique – présentée dans une partie précédente – il a été proposé que les fonctions exécutives non-langagières jouent un rôle lors de la lecture et l'écriture de mots. Par exemple, l'inhibition faciliterait la sélection des codes pertinents lors de la récupération des sons ou des lettres en supprimant les codes non pertinents (Altemeier et al., 2008). En accord avec cette proposition, certains travaux rapportent que l'inhibition et la flexibilité sont reliées à l'apprentissage de la lecture et de la production de mots isolés. Par exemple, il a été montré que l'inhibition mesurée chez des élèves de maternelle prédisait le niveau de décodage ultérieur (Foy & Mann, 2013). L'inhibition et la flexibilité sont également des prédicteurs du niveau de lecture et d'orthographe de mots chez les élèves tout venants du CP au CM2 (Altemeier et al., 2008; Lubin et al., 2016). Enfin, le trouble dyslexique s'accompagne d'un déficit des fonctions exécutives langagières (e.g. mémoire de travail phonologique) mais aussi non-langagières (e.g. mémoire de travail visuo-spatiale) (Varvara et al., 2014). Toutefois, bien que ces quelques études montrent des liens entre ces fonctions exécutives non-langagières et les compétences de langage écrit de bas niveau, cette question a été peu étudiée. Inversement, leur implication dans les processus de plus haut niveau comme la compréhension écrite et la rédaction ont fait l'objet de nombreux travaux.

[2] La mémoire de travail phonologique ayant déjà été présentée dans la section précédente, cette partie traitera spécifiquement des liens entre les fonctions exécutives non-langagières et l'apprentissage du langage écrit. Cependant, de nombreux travaux ont intégré la mémoire de travail phonologique comme mesure des FEs (e.g. Christopher et al., 2012; Lubin et al., 2016; Miyake et al., 2000). En conséquence, la mémoire de travail phonologique sera considérée comme une FE dans la suite de la thèse.

3.2. FONCTIONS EXECUTIVES NON-LANGAGIERES ET COMPETENCES DE LANGAGE ECRIT DE HAUT NIVEAU

3.2.1. Fonctions exécutives et compréhension écrite.

Plusieurs études ont montré que les différentes fonctions exécutives jouent un rôle clé dans les processus de compréhension écrite. Une méta-analyse de Follmer (2018) intégrant 96 études rapporte ainsi un lien significatif entre la compréhension écrite et les différentes FEs (inhibition : r = .21 ; mémoire de travail : r = .38 ; flexibilité : r = .39 ; planification : r = .36). Cette relation se retrouve dans toutes les tranches d'âge étudiées – de 6 ans à l'âge adulte. Par ailleurs, ces différentes fonctions ont un effet distinct sur la compréhension. Par exemple, dans une étude de Potocki et al. (2017) la mémoire de travail phonologique, l'inhibition et la planification prédisent indépendamment la compréhension écrite – évaluée au travers de questions inférentielles sur un texte. Cet effet persiste après contrôle des prédicteurs langagiers tels que l'identification de mots, le vocabulaire et la compréhension orale. L'étude des faibles lecteurs montrent également qu'ils présentent une altération de la mémoire de travail phonologique, de l'inhibition, de la flexibilité mentale et de la planification (Potocki et al., 2017). Les fonctions exécutives influenceraient la compréhension écrite au travers de deux voies : une voie indirecte, par leur effet sur l'identification de mots, et une voie directe (Haft et al., 2019; Kieffer et al., 2013; Kieffer & Christodoulou, 2020). Cet effet direct est expliqué par plusieurs mécanismes. Tout d'abord, comme présenté précédemment, la mémoire de travail phonologique semble jouer un rôle clé dans les processus de compréhension écrite et permet par exemple de maintenir les informations pertinentes en mémoire pendant la lecture (Butterfuss & Kendeou, 2018; Potocki et al., 2015). Inversement, la mémoire de travail visuo-spatiale n'a pas été mise en lien avec la compréhension écrite – et certains auteurs suggèrent que – bien que certaines fonctions exécutives non verbales comme l'inhibition puissent prédire le niveau de compréhension écrite, ce soit leur implication dans des processus spécifiques au domaine verbal qui sous-tende ce lien (Butterfuss & Kendeou, 2018). Par exemple, l'inhibition permettrait de moduler la mémoire de travail verbale en supprimant les informations non pertinentes ou limitant leur accès à la mémoire de travail, évitant sa surcharge (Butterfuss & Kendeou, 2018; Christopher et al., 2012; Kieffer et al., 2013; Potocki et al., 2017). La flexibilité a quant à elle été moins étudiée mais Butterfuss et Kendeou (2018) suggèrent que cette compétence permettrait au lecteur de déplacer son attention sur différentes caractéristiques du texte afin d'élaborer différentes stratégies de lecture.

3.2.2. Fonctions exécutives et rédaction de texte.

Comme pour la compréhension en lecture, plusieurs modèles théoriques soulignent le rôle clé de la mémoire de travail dans la coordination des processus rédactionnels (Hayes, 1996; Kellogg, 1996; McCutchen, 1996). Il semble aussi que plus généralement, les fonctions exécutives non-langagières, de haut niveau comme de bas niveau, soient indispensables à la planification et à l'organisation des idées et du texte (Berninger & Winn, 2006). Par exemple, il a été proposé que l'inhibition permette d'empêcher de diverger de la tâche et d'écarter les idées et les formulations inappropriées (Cordeiro et al., 2020; Drijbooms et al., 2015) et que la flexibilité soit sollicitée pour passer rapidement d'un processus rédactionnel à l'autre (e.g. arrêter la révision pour continuer à écrire le texte) (Cordeiro et al., 2020).

En accord avec ces propositions, plusieurs études rapportent que ces différentes fonctions sont des prédicteurs des compétences rédactionnelles dans différentes tranches d'âge. Par exemple, une étude longitudinale de Cordeiro et al. (2020) a évalué les compétences de transcription (e.g. compétences orthographiques), les fonctions exécutives (mémoire de travail, inhibition, flexibilité et planification) en début de CE1 puis la qualité de la rédaction en fin d'année. Les résultats ont montré que la planification et la mémoire de travail, prédisent les compétences rédactionnelles après contrôle de la transcription. Deux études de Drijbooms et al. (2015, 2017) se sont intéressées à la contribution de la mémoire de travail, de l'inhibition, de la flexibilité et de la planification sur différentes mesures de la rédaction (longueur du texte, complexité syntaxique et cohérence de l'histoire) chez des élèves plus âgés. Les fonctions exécutives, les compétences de transcription et les compétences rédactionnelles ont été mesurées en CM1 (Drijbooms et al., 2015) et un suivi longitudinal a été réalisé afin de réévaluer la rédaction en 6ème (Drijbooms et al., 2017). Les résultats montrent que l'inhibition et la mémoire de travail prédisent la longueur du texte en CM1 et que l'inhibition et la planification prédisent également la complexité syntaxique en 6ème. Une autre étude d'Altemeier et al. (2006) a également rapporté que la planification et l'inhibition sont impliquées dans différentes tâches de production de texte comme la prise de notes ou la réalisation de résumés chez des élèves du CE2 au CM2. Pour finir, l'étude de Hooper et al. (2002) révèle que les élèves avec de faibles compétences de rédaction présentent une altération des fonctions exécutives et notamment de la flexibilité mentale.

Les fonctions exécutives influencent différentes dimensions du langage écrit et ont un effet indépendant des prédicteurs langagiers classiquement contrôlés – comme la conscience phonologique. La mise à jour de la mémoire de travail phonologique est notamment un prédicteur important à la fois des compétences de bas niveau (décodage et orthographe) et des compétences de haut niveau (compréhension de la lecture et rédaction). Pour autant, d'autres fonctions

exécutives sans composante langagière comme l'inhibition et la flexibilité, prédisent également l'apprentissage du langage écrit. Enfin, bien qu'intriquées et interagissant entre elles, ces différentes fonctions semblent pour la plupart avoir un effet distinct sur les différentes dimensions du langage écrit.

4. CONCLUSION

Le langage écrit englobe différentes compétences de bas niveau (lecture et orthographe) et de plus haut niveau (compréhension et rédaction). Son apprentissage repose sur un ensemble d'habiletés langagières (comme la conscience phonologique) et non-langagières (comme les fonctions exécutives non-langagières). Cependant, l'implication d'autres prédicteurs non-langagiers sur l'apprentissage du langage écrit, comme la motricité ou encore les habiletés rythmiques, font l'objet d'une attention croissante. L'étude des particularités cognitives des personnes présentant un trouble des apprentissages explique en partie cet intérêt grandissant. Ainsi, dans la dyslexie, plusieurs modèles ont proposé que le déficit langagier pourrait être secondaire à un trouble plus général qui affecterait soit le développement sensori-moteur (Nicolson et al., 2001), soit le traitement du rythme (Goswami, 2011). En parallèle, ces deux habiletés (i.e. motrices et rythmiques) prédisent significativement l'émergence du langage écrit notamment chez les élèves de grande section de maternelle (e.g. Cameron et al., 2012; Dellatolas et al., 2009). L'objectif de la thèse sera d'examiner l'influence de ces deux prédicteurs sur l'apprentissage du langage écrit chez des élèves du CE2 au CM2 avec ou sans trouble d'apprentissage du langage écrit. Les deux chapitres suivants seront donc consacrés à la présentation des arguments en faveur de ces liens.

CHAPITRE 2 : HABILETES MOTRICES ET LANGAGE ECRIT

Au cours de la partie précédente, plusieurs prédicteurs de l'émergence du langage écrit ont été présentés : les habiletés phonologiques et les fonctions exécutives – qui influencent plus spécifiquement l'apprentissage des compétences de langage écrit de haut niveau (Butterfuss & Kendeou, 2018; Cordeiro et al., 2020). Par ailleurs, un nombre croissant d'études propose que d'autres habiletés non-langagières jouent un rôle dans l'apprentissage du langage écrit : par exemple, plusieurs d'entre elles ont montré que les habiletés motrices sont être un prédicteur de l'émergence du langage écrit (Cameron et al., 2012; Grissmer et al., 2010). Le présent chapitre vise à présenter les études actuelles portant sur les liens entre motricité et apprentissage du langage écrit, et à soulever les limites de ces travaux. Après avoir défini plus clairement les notions de motricité fine et les différentes compétences que ce terme peut englober, les études s'intéressant au lien entre motricité et acquisition du langage écrit chez les élèves avec et sans troubles des apprentissages seront exposées. Différents mécanismes proposés pour expliquer la relation entre les habiletés motrice et l'apprentissage du langage écrit seront également abordés.

1. ELEMENTS DE DEFINITION

1.1. MOTRICITE FINE ET MOTRICITE GLOBALE

Il existe plusieurs façons de distinguer les différents types de mouvements et l'une des principales distinctions oppose les compétences de motricité globale et de motricité fine. Cette dissociation se fonde sur la taille du mouvement et des muscles impliqués, la motricité globale renvoyant à « l'utilisation de plusieurs grands muscles pour réaliser une tâche impliquant tout le corps » (e.g. marcher, courir, se rééquilibrer, attraper une balle) tandis que la motricité fine se définit comme « l'utilisation de petits muscles des doigts ou de la main qui requière une coordination oculo-manuelle » (e.g. découper, écrire, faire ses lacets) (Goodway et al., 2019).

Plusieurs travaux révèlent que les habiletés motrices sont un prédicteur de la réussite scolaire, qu'il s'agisse des mathématiques ou du langage écrit (Macdonald et al., 2018) mais il semble que plus spécifiquement, les activités de motricité fine, qui représentent une large part des activités des enfants en classe (e.g. environ 46% des activités en maternelle), soient d'autant plus prédictrices des performances académiques (Marr et al., 2003). Au sein même de la motricité fine, certaines habiletés, comme celles impliquées dans les activités de graphisme, sont généralement plus sollicitées et pourraient en conséquence être plus en lien avec la réussite scolaire (Cameron et al., 2016). Ainsi, les élèves vont consacrer de plus en plus de temps à des

tâches papier-crayon qui représentent 85% des activités motrices chez les élèves de primaire (Marr et al., 2003). Ces constats soulignent la nécessité de distinguer ces différentes habiletés, qui relèvent de processus distincts.

1.2. DISTINCTIONS AU SEIN DE LA MOTRICITE FINE

Compétences graphomotrices et non graphomotrices.

Alors que la *motricité fine* renvoie généralement à tout mouvement fin des doigts et de la main, les *habiletés graphomotrices* désignent plus spécifiquement les compétences motrices impliquant la manipulation d'un outil scripteur (e.g. dessin, copie de lettres et chiffres). Elles sont évaluées par des tâches papier-crayon comme le tracé de labyrinthe, la copie de figures ou de lettres. Bien qu'elles constituent un sous-type de motricité fine, les habiletés graphomotrices requièrent des compétences plus spécifiques afin de manipuler le stylo. En conséquence, plusieurs auteurs proposent de distinguer les habiletés de *manipulation d'objet* ou de *dextérité manuelle* qui renvoient à la motricité fine non-graphomotrice (e.g. enfiler un lacet, déplacer des pions) des compétences *graphomotrices* ou *d'écriture* (Dinehart & Manfra, 2013; Suggate et al., 2016).

Distinction sur la base du traitement visuel

Pour certains auteurs, la principale différence entre les compétences de motricité fine repose sur le type de traitement de l'information visuelle sollicité (Carlson et al., 2013; Pitchford et al., 2016; Weintraub & Graham, 2000). Par exemple, Weintraub et Graham (2000) différencient la dextérité digitale (e.g. toucher chacun des doigts avec son pouce le plus vite possible) – qui renvoient à des processus purement moteurs – et le traitement visuo-moteur (e.g. copie de figure). Or, il est important de souligner qu'en plus de reposer sur des compétences motrices plus fines, nécessaires à la manipulation précise du stylo, les tâches papier-crayon, sollicitent davantage les compétences visuelles que d'autres tâches de motricité fine (Cameron et al., 2016).

Au sein même de ces compétences visuo-motrices, certains auteurs distinguent le contrôle visuo-moteur de l'intégration visuo-motrice (Carlson et al., 2013; Chaix & Albaret, 2013). Le contrôle visuo-moteur correspond au contrôle visuel des mouvements et s'applique à « tout geste ou habileté motrice contrôlé par la vision et les rétroactions visuelles » (p. 34) (Chaix & Albaret, 2013). Il peut être évalué par le biais de tâches de tracé entre deux lignes. L'intégration visuo-motrice nécessite quant à elle d'intégrer une information visuelle afin de la transformer en une réponse motrice. Généralement, l'intégration visuo-motrice est évaluée avec une tâche de copie de figure (e.g. Suggate et al., 2016) qui nécessite de percevoir et intégrer l'ensemble des éléments afin de planifier une réponse motrice.

Exclusion du traitement langagier dans les mesures motrices

Pour finir, il est nécessaire de distinguer les tâches purement motrices de tâches composites – notamment quand elles impliquent un traitement langagier. Par exemple, l'*écriture manuscrite*, qui permet spécifiquement de produire correctement des lettres, ne dépend pas seulement de processus graphomoteurs mais également de processus langagiers et cognitifs. Alors que certaines études utilisent des mesures de la qualité ou de la vitesse de tracé de lettres pour évaluer la motricité fine (e.g. Greenburg et al., 2020), Suggate et al. (2016) critique l'utilisation de ces tâches d'écriture manuscrite lors de l'étude de l'effet des habiletés motrices sur l'apprentissage du langage écrit, qui ne permettent pas de dissocier les influences motrices et langagières.

1.3. TERMINOLOGIE ADOPTEE DANS LA THESE

La motricité est un terme générique qui a souvent été utilisé de façon indifférenciée pour définir des habiletés différentes. Dans ce travail de thèse, nous nous intéresserons plus spécifiquement à la motricité fine qui, selon la proposition de Suggate et al., (2016) sera dissociée en deux habiletés : la motricité fine générale et les habiletés graphomotrices. Le terme *dextérité manuelle* sera utilisé par opposition aux *habiletés graphomotrices* et désignera l'ensemble des habiletés de motricité fine ne nécessitant pas l'utilisation d'un crayon (e.g. déplacement de chevilles). Par ailleurs, du fait de sa nature composite, les tâches d'écriture manuscrite ne seront pas intégrées dans les mesures de la motricité fine, contrairement à certaines études antérieures (e.g. Greenburg et al., 2020). En conséquence, le terme *habiletés graphomotrices* désignera ici l'ensemble des habiletés non langagières nécessitant la manipulation d'un stylo (e.g. tracé entre des lignes, copie de figure).

2. LIENS ENTRE MOTRICITE ET APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT DANS LE DEVELOPPEMENT TYPIQUE

Un nombre croissant d'études rapporte un lien entre la motricité et la réussite scolaire (pour une revue : Macdonald et al., 2018) et suggèrent que les habiletés motrices pourraient être un prédicteur de l'émergence du langage écrit au-delà de prédicteurs déjà connus – comme les prédicteurs langagiers ou cognitifs (Cameron et al., 2012; Greenburg et al., 2020; Grissmer et al., 2010). Toutefois, plusieurs questions doivent être soulevées. Premièrement, il est nécessaire d'examiner si les relations entre habiletés motrices et langage écrit perdurent au cours du développement. Or, peu d'études se sont intéressées à cette relation au-delà de la maternelle. Deuxièmement, il est indispensable d'identifier plus précisément quelles sont les dimensions du

langage écrit en lien avec le niveau de motricité. Enfin, comme présenté dans la section précédente, la motricité englobe différentes habiletés dont l'effet distinct sur l'apprentissage du langage écrit doit être étudié.

2.1. DES ETUDES CENTREES SUR LE DEVELOPPEMENT PRECOCE

La majorité des études qui s'est intéressée au caractère prédictif de la motricité fine sur le langage écrit, a mesuré les performances motrices avant l'entrée à l'école (Cameron et al., 2016; Dinehart & Manfra, 2013; Greenburg et al., 2020) ou en maternelle (Doyen et al., 2017; Grissmer et al., 2010; Son & Meisels, 2006). Par exemple, 90% des études incluses dans une revue de littérature de Macdonald et al., (2018) s'intéressent aux relations entre motricité et lecture chez des élèves d'âge préscolaire. Ces études longitudinales révèlent que la motricité prédit le niveau de lecture ou d'orthographe dans les niveaux plus élevés, y compris après avoir contrôlé les prédicteurs langagiers. Par exemple, des études portant sur de très larges cohortes de parfois plus de 10 000 enfants montrent que la motricité fine, évaluée en grande section de maternelle, prédit le niveau de langage écrit dans les classes ultérieures du CP au CM2 (Cameron et al., 2012; Dinehart & Manfra, 2013; Greenburg et al., 2020). Cet effet prédictif persiste après avoir contrôlé le niveau socio-culturel et des habiletés langagières précoces (comme le vocabulaire) et les habiletés cognitives (comme l'attention), et les habiletés motrices prédisent donc l'apprentissage du langage écrit au-delà des prédicteurs déjà connus (Cameron et al., 2012; Greenburg et al., 2020; Grissmer et al., 2010).

Cependant, toutes ces études ont évalué la motricité en maternelle et en deçà. Or, Cameron et al. (2012) suggèrent que ce lien diminuerait au fil du développement. Selon ces auteurs, la dextérité manuelle joue un rôle primordial chez les enfants les plus jeunes car elle permet de développer des compétences – comme le graphisme – sur lesquelles indispensables à la réussite scolaire. Par contre, chez les élèves plus âgés, seules les compétences les plus proches des activités académiques – comme la capacité à copier des figures, qui se rapproche du tracé de lettres et de nombres – demeureraient prédictives du niveau de langage écrit. D'autres auteurs, comme Grissmer et al. (2010), proposent quant à eux que les habiletés motrices soient un indicateur de la maturation cérébrale qui sous-tend également le développement cognitif et langagier chez les élèves d'âge préscolaire. Cependant, cette hypothèse ne permet pas d'expliquer une éventuelle diminution des liens entre motricité et apprentissage du langage écrit avec le temps. En effet, la maturation cérébrale se poursuit tout au long de l'enfance jusqu'à l'adolescence : une augmentation du volume de matière grise et de matière blanche est retrouvée de 6 à 10 ans. Ces modifications s'accompagnent d'un perfectionnement des habiletés motrices – avec une augmentation de la précision et de la vitesse (Garvey et al., 2003; Palmis et al., 2017). En

conséquence, le niveau de motricité pourrait toujours refléter la maturation cérébrale chez des élèves plus âgés.

Actuellement, l'implication de la motricité dans le développement de la lecture et de l'écriture chez les élèves plus âgés a été peu étudiée. Toutefois, de rares études ont rapporté un lien entre la motricité fine et le langage écrit chez des élèves du CE2 au CM2. La dextérité manuelle (e.g. toucher chaque doigt avec le pouce le plus vite et le plus précisément possible) prédit le niveau d'orthographe et la qualité de la rédaction d'un texte du CP au CE2 (Berninger et al., 1992). Une autre étude longitudinale menée chez des élèves du CE2 au CM2 rapporte que la capacité à recopier une figure prédit les performances en lecture (Sulik et al., 2018). Ces études restent cependant anecdotiques et le lien entre motricité fine et langage écrit chez les élèves plus âgés doit être confirmé.

2.2. DIMENSIONS DU LANGAGE ECRIT EN LIEN AVEC LES HABILETES MOTRICES

La maîtrise du langage écrit implique l'apprentissage de différentes compétences de bas niveau, comme la lecture et l'orthographe, et de plus haut niveau comme la compréhension écrite et la rédaction de texte. De ce fait, il est nécessaire de distinguer ces différentes compétences lors de l'évaluation des relations entre motricité et langage écrit. Pourtant, beaucoup de ces études ont utilisé des mesures composites du langage écrit, comme les notes obtenues en anglais, mais ne spécifient pas précisément quelles sont les dimensions du langage écrit évaluées (Grissmer et al., 2010; Son & Meisels, 2006). Certaines études utilisent même une mesure de la réussite scolaire, qui combine une évaluation du niveau de lecture et de mathématiques, alors même que les habiletés motrices semblent étroitement reliées à l'émergence des compétences numériques (Pitchford et al., 2016).

Certaines études rapportent toutefois des mesures plus précises. Les résultats confirment en premier temps les relations entre les habiletés motrices et la production écrite. Ainsi, la dextérité manuelle évaluée en maternelle prédit le niveau ultérieur d'orthographe de mots de CP (Doyen et al., 2017). Chez des élèves plus âgés du CP au CE2, la dextérité manuelle et l'intégration visuo-motrice (i.e. copie de figure) sont reliées à l'orthographe (Berninger et al., 1992). De plus, des corrélations sont retrouvées entre la dextérité manuelle et le nombre de mots et de propositions produits lors d'une tâche de rédaction (Berninger et al., 1992). L'apprentissage de la lecture est également en lien avec les habiletés motrices (Doyen et al., 2017; Suggate et al., 2016). Par exemple, la dextérité de la main non dominante évaluée en maternelle prédit significativement l'identification de mots – mais pas le décodage de pseudo-mots (Doyen et al., 2017). Pour finir, peu de travaux se sont intéressés aux liens entre la motricité et la compréhension écrite. L'étude de Cameron et al. (2012) indique que la capacité à recopier une

figure prédit les performances sur une tâche de compréhension (i.e. complétion d'une image ou d'une phrase avec un mot manquant). A l'inverse, l'étude de Doyen et al., (2017) ne rapporte pas de relations significatives entre la motricité et la compréhension dans la même tranche d'âge. Ces deux études portant sur des élèves de maternelle, il est toutefois nécessaire d'examiner cette relation chez des élèves plus âgés – qui permettrait l'évaluation de la compréhension de texte.

2.3. HETEROGENEITE DES HABILETES MOTRICES MESUREES

Comme évoqué une section précédente (voir p.23), le terme « motricité » renvoie à un ensemble d'habiletés hétérogènes. Or, plusieurs travaux suggèrent que toutes ces habiletés ne sont pas reliées de la même façon à la réussite scolaire. Tout d'abord, il semble que la motricité fine soit plus en lien avec l'apprentissage du langage écrit que la motricité globale. Par exemple, l'étude de Son et Meisels (2006) rapporte des coefficients de corrélations plus élevés entre la motricité fine et le niveau de lecture (r = .35) qu'entre la motricité globale et le niveau de lecture (r = .15). De plus, dans une étude intégrant différentes mesures motrices dans un même modèle de régression, seul l'effet de la motricité fine prédit significativement l'identification de lettres et de mots (Cameron et al., 2012). L'effet de la motricité globale n'est quant à lui plus significatif après l'inclusion d'autres prédicteurs.

Par ailleurs, il semble également exister une disparité en fonction des mesures de motricité fine utilisées. En effet, beaucoup d'études évaluent la motricité fine en utilisant des tâches graphomotrices – impliquant parfois une composante langagière – et extrapolent leurs résultats à une influence de la motricité fine en général (e.g. Cameron et al., 2012; Grissmer et al., 2010). Or, très peu d'études se sont intéressées à l'effet de tâches non-graphomotrices sur le développement du langage écrit, bien que certaines rapportent un effet de la dextérité manuelle sur le niveau de lecture (Doyen et al., 2017; Suggate et al., 2016). Une récente revue de littérature synthétisant les résultats de différentes études ayant examiné les relations entre les habiletés motrices et le niveau de lecture a distingué le type d'habiletés motrices mesurées (Macdonald et al., 2018). Elle révèle que 17 études sur 22 rapportent des relations significatives entre l'intégration visuo-motrice (e.g. copie de figure) et le niveau de lecture (soit 77% des études incluses dans la revue de littérature), avec des corrélations faibles à fortes (r = .16-.62). A l'inverse, seules 7 études sur 12 rapportent un lien significatif entre la dextérité manuelle et l'apprentissage du langage écrit, avec des corrélations plus faibles (r = .15-.36). Enfin, certaines études suggèrent que la dextérité manuelle et l'intégration visuo-motrice (e.g. copie de figure) prédisent toutes deux le langage écrit chez des élèves de grande section de maternelle (Suggate et al., 2016), et au-delà – du CP au CM2 (Dinehart & Manfra, 2013; Greenburg et al., 2020; Pitchford et al., 2016). Cependant, après l'intégration conjointe des différents prédicteurs dans un même modèle, seule l'intégration visuo-motrice prédit le niveau de lecture.

L'ensemble de ces résultats tend à montrer que certaines mesures motrices sont plus reliées à l'apprentissage du langage écrit. Comme proposé par certains auteurs, il est possible que des habiletés motrices plus globales (e.g. la dextérité manuelle) permettent le développement d'autres habiletés (e.g. l'intégration visuo-motrice) elles-mêmes plus sollicitées dans l'apprentissage du langage écrit (Cameron et al., 2012; Suggate et al., 2016). Le fait que certaines habiletés motrices soient de meilleurs prédicteurs du langage écrit que d'autres questionne sur les mécanismes qui sous-tendent la relation entre motricité et langage écrit. Actuellement, plusieurs explications ont été proposées dans la littérature et certaines permettent d'apporter des éléments pour expliquer ces résultats différents en fonction du type d'habiletés motrices mesurées. Ces mécanismes explicatifs sont exposés dans la section suivante.

3. MECANISMES EXPLICATIFS DU LIEN ENTRE MOTRICITE ET LANGAGE ECRIT

Le langage écrit étant une représentation du langage oral, il semble naturel que des facteurs langagiers – comme la capacité à percevoir et manipuler les sons ou encore la qualité et la quantité de vocabulaire – influencent son apprentissage. En revanche, les mécanismes qui sous-tendent les relations entre des prédicteurs non-langagiers – comme la motricité – et le langage écrit nécessitent d'être clarifiés. Actuellement, deux hypothèses ont été proposées pour expliquer cette relation (Cameron et al., 2016 ; Suggate et al., 2016 ; 2019). Tout d'abord, l'effet de la motricité sur l'apprentissage du langage écrit pourrait être sous-tendu par l'automatisation de l'écriture manuscrite, qui influence l'apprentissage de l'écriture mais aussi de la lecture (Bosse et al., 2014; Pontart et al., 2013). La seconde hypothèse avancée est celle d'une médiation au travers des fonctions exécutives dont le développement est étroitement lié à celui de la motricité. Ces deux hypothèses seront plus amplement développées dans cette section.

3.1. MEDIATION DE L'EFFET DE LA MOTRICITE SUR LE LANGAGE ECRIT PAR L'ECRITURE MANUSCRITE

Tout d'abord, une première hypothèse explicative du lien entre motricité et apprentissage du langage écrit propose une médiation au travers de l'écriture manuscrite (Berninger et al., 1992; Cameron et al., 2016; Suggate et al., 2016). En effet, le développement de l'écriture manuscrite repose sur des compétences motrices (Kaiser et al., 2009; Weintraub & Graham, 2000) et l'automatisation de l'écriture est un prédicteur de l'apprentissage du langage écrit (Bosse et al., 2014; Pontart et al., 2013; Suggate et al., 2016). Ces relations amènent à formuler l'hypothèse que l'effet des habiletés motrices non-langagières sur l'apprentissage de la lecture et de l'écriture est expliqué par l'automatisation du geste d'écriture.

3.1.1. Liens entre les habiletés motrices et l'automatisation de l'écriture manuscrite

L'écriture manuscrite est une activité composite qui requiert à la fois des compétences langagières (Kandel & Perret, 2015) et motrices (Albaret et al., 2013) et son acquisition implique l'apprentissage des programmes moteurs des différentes lettres et leur automatisation progressive (Palmis et al., 2017). En conséquence, certaines habiletés motrices constituent des pré-requis sur lesquels reposent son développement, et sont des prédicteurs de l'automatisation du geste graphique (Volman et al., 2006; Weintraub & Graham, 2000). L'apprentissage de l'écriture nécessite tout d'abord de développer une maîtrise de l'outil scripteur. Ceci implique un développement progressif de la dextérité manuelle, et notamment de la capacité à développer des mouvements différenciés des doigts permettant un meilleur contrôle de l'outil (Albaret et al., 2013). La dextérité manuelle est donc un prédicteur de la qualité de l'écriture manuscrite et de la présence de trouble de l'écriture, y compris chez les élèves les élèves plus âgés de CE1, CE2 et CM2 (Volman et al., 2006; Weintraub & Graham, 2000). L'apprentissage de l'écriture manuscrite dépend également du contrôle visuo-moteur : aux premiers stade de l'écriture, de 5 à 7 ans, les enfants utilisent principalement un contrôle rétroactif visuel de leur geste mais utilisent peu les informations sensori-motrices (Palmis et al., 2017). Ce contrôle visuel du mouvement perdure chez des élèves plus âgés jusqu'à environ 9-10 ans où les programmes moteurs s'automatisent (Palmis et al., 2017). Les performances aux tâches mesurant le contrôle visuo-moteur – comme les tâches de tracé de courbes – sont corrélées à la dynamique de l'écriture manuscrite (temps de pauses) chez des élèves de maternelle (Bara & Gentaz, 2011) ainsi qu'à la qualité de l'écriture jusqu'en CE2 (Kaiser et al., 2009). Enfin, l'écriture manuscrite est reliée à la capacité à produire des formes de base, comme un cercle ou une boucle, qui constitue un pré-requis pour apprendre les lettres et notamment les majuscules (Albaret et al., 2013). Ainsi, de nombreuses études rapportent que la capacité à recopier des figures est un prédicteur de la qualité de l'écriture manuscrite aussi bien chez des élèves de maternelle (Daly et al., 2003; Weintraub & Graham, 2000) que chez des élèves plus âgés – du CP au CM2 (Bara & Gentaz, 2011; Kaiser et al., 2009; Weintraub & Graham, 2000).

L'influence de la motricité sur l'apprentissage de l'écriture manuscrite est soutenue non seulement par les résultats des études corrélationnelles cités ci-dessus, mais également par les résultats d'études interventionnelles. En effet, plusieurs études rapportent l'efficacité d'interventions motrices sur la vitesse et la qualité de l'écriture manuscrite (Hoy et al., 2011; Santangelo & Graham, 2016). Cependant, la plupart de ces interventions impliquent la pratique de l'écriture manuscrite (Santangelo & Graham, 2016) ou l'exploration sensori-motrice des lettres – avec des exercices nécessitant le tracé de lettres avec le doigts ou leur discrimination haptique

(Bara & Gentaz, 2011) ou encore intégrant la réalisation de lettres dans des exercices de motricité globale (Botha & Africa, 2020). Bien que certaines études interventionnelles rapportent des résultats positifs d'entraînement moteurs non-langagier chez des élèves de CP – n'impliquant donc ni la pratique de l'écriture manuscrite ni l'exposition à des stimuli langagiers (e.g. lettres) – (e.g. Poon et al., 2010), cette question a été peu explorée et rapporte des résultats parfois divergents (Hoy et al., 2011; Santangelo & Graham, 2016). D'autres études doivent donc confirmer que des intervention sensori-motrices non-langagières peuvent améliorer l'écriture manuscrite.

Par ailleurs, soulignons que la majorité de ces études corrélationnelles et interventionnelles rapporte des liens entre les différents prédicteurs moteurs et l'écriture manuscrite chez des élèves en début d'apprentissage ou présentant des difficultés d'écriture associées (Weintraub & Graham, 2000). Or, ces relations tendent à diminuer avec l'âge (Karlsdottir & Stefansson, 2002). L'influence de la motricité sur la qualité et la vitesse d'écriture doit être démontrée chez des élèves qui commencent à automatiser l'écriture.

Pour finir, il est nécessaire de questionner l'implication distincte des différentes habiletés motrices dans l'apprentissage de l'écriture manuscrite. Certains auteurs proposent que les habiletés motrices impliquant un contrôle graphomoteur soient plus prédictrices de l'apprentissage de l'écriture manuscrite (Cameron et al., 2016; Suggate et al., 2016). Par exemple, Suggate et al., (2016) suggèrent que les différentes compétences se développent de façon progressive : la dextérité manuelle permettrait de développer les compétences graphomotrices, qui favoriserait en retour l'apprentissage du tracé les lettres et l'automatisation de l'écriture. Des études confortent cette hypothèse en indiquant que seule la capacité à copier une figure prédit la qualité des lettres produites dans un modèle de régression impliquant dextérité manuelle et habiletés graphomotrices (Suggate et al., 2016). Inversement, d'autres études révèlent que ces habiletés contribuent de façon conjointe à la qualité et à la vitesse d'écriture (Weintraub & Graham, 2000). L'implication distincte des différentes habiletés motrices dans l'écriture manuscrite doit donc être plus amplement étudiée – notamment quand l'écriture commence à s'automatiser.

3.1.2. Liens entre écriture manuscrite et langage écrit

Les travaux précités indiquent que l'apprentissage de l'écriture dépend des compétences motrices. De plus, un ensemble d'études a montré que le geste d'écriture est impliqué dans l'apprentissage du langage écrit (Berninger et al., 1992; Bosse et al., 2014; Limpo et al., 2017; Pontart et al., 2013). En effet, la qualité et la vitesse d'écriture manuscrite sont en lien avec les compétences orthographiques et de rédaction. Par exemple, l'automatisation du geste d'écriture,

généralement évaluée au travers de la tâche de l'alphabet[3], est corrélée au niveau d'orthographe en grande section de maternelle mais aussi chez les élèves plus âgés jusqu'au collège (Abbott et al., 2010; Berninger et al., 1992; Pontart et al., 2013). Les performances à cette tâche prédisent également la qualité de la rédaction dès le CE1 (Cordeiro et al., 2020) mais aussi chez des élèves plus âgés jusqu'en 4ème (Connelly et al., 2012; Drijbooms et al., 2015; Limpo et al., 2017). Un bénéfice de l'entraînement à l'écriture manuscrite sur la qualité de la rédaction a également été rapporté par plusieurs études interventionnelles (pour une méta-analyse : voir Santangelo & Graham, 2016). Ce type d'intervention améliore à la fois la qualité et la longueur du texte produit. Par ailleurs, l'écriture manuscrite est reliée non seulement à l'apprentissage de la production écrite mais aussi à l'apprentissage de la lecture. Par exemple, la qualité des lettres recopiées – évaluée en maternelle – prédit le niveau de lecture de mots dans les niveaux supérieurs après contrôle de prédicteurs langagiers comme la conscience phonologique (Dinehart & Manfra, 2013; Greenburg et al., 2020; Suggate et al., 2016). Toutefois, soulignons que certains travaux apportent des résultats inverses : par exemple, une étude longitudinale de Pritchard et al. (2020) menée chez des élèves de CP-CE1 indique que l'écriture manuscrite prédit le niveau d'orthographe, mais pas le niveau de lecture ultérieur après contrôle de prédicteurs langagiers.

L'influence de l'automatisation de l'écriture manuscrite sur l'orthographe et la rédaction peut être expliqué à la lumière du modèle capacitaire qui stipule que l'automatisation des processus de bas-niveau lors de la production écrite permet de libérer des ressources qui pourront être réutilisées pour des processus de plus haut-niveau (Just & Carpenter, 1992; McCutchen, 1996; Olive & Piolat, 2005). D'après ce modèle, les élèves les plus jeunes ou présentant des difficultés motrices doivent consacrer une partie de leurs ressources attentionnelles au contrôle graphomoteur lors de tâche d'écriture. Ceci entraîne une surcharge cognitive et impacte négativement les traitements langagiers de plus haut niveau. Par exemple, Limpo et al. (2017) ont montré que l'automatisation du geste d'écriture influe sur la planification des idées lors d'une tâche de rédaction chez des élèves de 5ème et 4ème. La contrainte exercée par le contrôle graphomoteur sur l'apprentissage du langage écrit n'est pas limitée à la production écrite mais semble aussi affecter l'identification de mots chez les élèves les plus jeunes. Ainsi, dans une étude de Suggate et al. (2016), des enfants de grande section de maternelle ont dû apprendre des pseudo-mots dans deux conditions : soit en les recopiant avec un stylo plombé de 360g (condition d'écriture altérée), soit en les recopiant avec un stylo de 30g (condition d'écriture normale). Les résultats montrent que l'altération artificielle de l'écriture manuscrite détériore la reconnaissance des lettres et des pseudo-mots appris. Les auteurs proposent que l'utilisation du stylo plombé

[3] Dans cette tâche, il est demandé d'écrire l'alphabet le plus vite possible dans l'ordre en un temps limité (de 1 minute à 15 seconde en fonction des études) (Berninger et al., 1992)

augmente l'attention consacrée au geste graphomoteur et diminue les ressources cognitives disponibles pour le traitement langagier. Cette surcharge cognitive entrave la reconnaissance des lettres et des pseudo-mots appris dans cette condition.

Au-delà de l'explication apportée par le modèle capacitaire, il a été proposé que le geste d'écriture influence plus directement l'apprentissage du langage écrit au travers de la construction d'une représentation sensori-motrice des lettres et des mots (Bosse et al., 2014; Longcamp et al., 2005). L'intégration d'une représentation sensori-motrice, venant s'ajouter aux représentations phonologiques et orthographiques, faciliterait l'apprentissage de nouvelles lettres et de l'orthographe des mots. L'existence de cette représentation sensori-motrice est soutenue par des études en neuro-imagerie qui révèlent que la présentation visuelle d'une lettre active les régions motrices comme le cortex prémoteur en l'absence de mouvements (James & Engelhardt, 2012; Longcamp et al., 2011). Les auteurs proposent que le tracé de nouvelles lettres entraîne la construction d'une représentation sensori-motrice qui est ensuite réactivée à la fois lors de la production et lors de la perception de la lettre.

En accord avec cette hypothèse, plusieurs études montrent que le geste graphomoteur facilite l'apprentissage de nouvelles lettres et de nouveaux mots. Par exemple, un apprentissage manuscrit améliore la reconnaissance de nouvelles lettres comparativement à un apprentissage tapuscrit chez l'adulte comme chez l'enfant (Longcamp et al., 2005, 2006, 2008). Ce bénéfice est également retrouvé pour l'apprentissage de nouveaux mots quand ceux-ci sont appris par copie (Bosse et al., 2014; Ouellette, 2010; Shahar-Yames & Share, 2008). Par exemple, deux études ont comparé différentes conditions d'apprentissage de pseudo-mots : une condition de copie (écriture manuscrite) et une condition de lecture à haute voix chez des élèves de CE1 et CE2 (Ouellette, 2010; Shahar-Yames & Share, 2008). Les résultats montrent qu'apprendre des pseudo-mots en les écrivant à la main facilite l'apprentissage des représentations orthographiques. Afin de confirmer que ce bénéfice provient de la composante graphomotrice de l'écriture – et non de l'attention apportée à chacune des lettres – Bosse et al. (2014) ont reproduit ces études chez des enfants de 10 ans en comparant la condition de copie à une condition d'épellation à voix haute. Les résultats montrent encore une fois un bénéfice de l'écriture manuscrite pour le rappel à long terme de l'orthographe des mots. Suggate et al. (2018) retrouvent également un effet tendanciel qui suggère que la reconnaissance de nouveaux mots chez des élèves de grande section de maternelle est améliorée dans une condition de copie par rapport à une condition de pointage.

L'ensemble de ces résultats soutient l'implication de l'écriture manuscrite dans l'apprentissage du langage écrit : d'une part, son automatisation permet de consacrer plus de ressources cognitives au traitement langagier lors de l'écriture et d'autre part, le geste graphomoteur semble faciliter l'apprentissage de nouvelles lettres et de l'orthographe.

Malgré les arguments en faveur d'un lien entre les habiletés motrices et le développement de l'écriture d'une part, et d'un lien entre l'automatisation du geste d'écriture et l'apprentissage du langage écrit d'autre part, aucune étude n'a testé directement l'hypothèse d'une médiation pour expliquer l'effet des habiletés motrices sur l'apprentissage du langage écrit. Certains travaux suggèrent que les habiletés graphomotrices (e.g. copie de figure) – a priori plus proches de l'écriture manuscrite car impliquant également un contrôle graphomoteur – sous-tendent le lien entre la dextérité manuelle (e.g. déplacement de chevilles) et le niveau de lecture (Suggate et al., 2016). Cependant, il est nécessaire de tester plus directement l'hypothèse de médiation en évaluant spécifiquement les différentes habiletés motrices (dextérité manuelle et habiletés graphomotrices), l'écriture manuscrite et le langage écrit.

3.2. MEDIATION DE L'EFFET DE LA MOTRICITE SUR LE LANGAGE ECRIT PAR LES FONCTIONS EXECUTIVES

Outre l'hypothèse d'une médiation par l'écriture manuscrite, il a été proposé que les liens entre les habiletés motrices et l'apprentissage du langage écrit soit sous-tendu par les fonctions exécutives. En effet, comme nous avons pu le voir dans une section précédente, ces dernières jouent un rôle important dans l'apprentissage du langage écrit. De plus, plusieurs travaux suggèrent qu'il existe également des liens entre motricité et fonctions exécutives.

3.2.1. Liens entre motricité et fonctions exécutives.

Les développements moteur et cognitif sont étroitement liés. Des corrélations ont ainsi été retrouvées entre les habiletés motrices et différentes fonctions exécutives – comme la mémoire de travail, l'inhibition, la flexibilité mentale et la planification – chez des élèves de maternelle (Cook et al., 2019; Roebers et al., 2014; Van der Fels et al., 2015). Cette relation entre motricité et fonctionnement exécutif semble s'atténuer avec l'âge et le lien entre les deux habiletés est significativement moins important dans la cohorte d'enfants de 6 ans par rapport à la cohorte d'enfants de 5 ans (Becker et al., 2014). Malgré cette diminution, des corrélations entre motricité et fonctions exécutives sont toujours retrouvées au-delà du CP. Par exemple, Roebers et Kauer, (2009) ont rapporté que la dextérité manuelle – évaluée avec une tâche de déplacement de chevilles – est corrélée avec l'inhibition et la flexibilité mentale chez des élèves de CE1. La motricité fine est également corrélée à l'attention soutenue et à la mémoire de travail verbale et visuo-spatiale chez des élèves de CE2 (Geertsen et al., 2016). Par ailleurs, des études de régression révèlent que la motricité fine prédit la mémoire de travail et la planification au-delà de certains facteurs confondants comme l'âge, le sexe, le niveau socio-économique des parents et le diagnostic de TDAH chez des élèves de 3 à 5 ans (Houwen et al., 2017). Ce lien prédictif semble être

bidirectionnel : la mémoire de travail et l'inhibition prédisent la capacité à reproduire une figure (Becker et al., 2014) et inversement, la capacité à recopier une figure prédit le fonctionnement exécutif ultérieur (Sulik et al., 2018).

3.2.2. Evidences d'une médiation au travers des fonctions exécutives

Au vu de ces relations, plusieurs auteurs ont proposé que le lien entre la motricité et le langage écrit soit sous-tendu par le fonctionnement exécutif (Cameron et al., 2012; Oberer et al., 2018; Schmidt et al., 2017). Deux interprétations ont été suggérées pour expliquer les liens entre ces différentes compétences (Figure 1).

La première hypothèse propose que les fonctions exécutives et la motricité sont reliées car ces habiletés reposent sur des processus communs (Figure 1a). Le développement conjoint des habiletés motrices et cognitives dépendrait de processus de maturation cérébrale similaires, notamment chez les élèves les plus jeunes comme en maternelle (Cameron et al., 2012; Grissmer et al., 2010; Suggate et al., 2019). En effet, Diamond (2000) a proposé qu'un réseau cérébral commun impliquant le cortex frontal dorso-latéral et le cervelet sous-tende à la fois le fonctionnement exécutif et la motricité. Selon cette hypothèse, il n'existe donc pas de lien de causalité entre la motricité et les fonctions exécutives, et cette relation est expliquée plus généralement par le développement cognitif global résultant de processus de maturation cérébrale généraux (Suggate et al., 2016, 2019). En outre, l'implication de processus cognitifs de haut niveau dans certaines tâches motrices pourrait également expliquer en partie la relation retrouvée entre motricité et fonctions exécutives (Cameron et al., 2012). Ces auteurs préconisent donc de contrôler les fonctions exécutives lors de l'étude du lien entre motricité et langage écrit pour tenir compte de ces processus partagés lors de l'étude de l'effet de la motricité sur le langage écrit.

A l'inverse, la seconde hypothèse suggère l'existence d'un lien de causalité entre motricité et développement des fonctions exécutives (Schmidt et al., 2017) (Figure 1b). La réalisation de tâches motrices permettrait d'améliorer le fonctionnement exécutif – en sollicitant les réseaux cérébraux communs (Oberer et al., 2018; Schmidt et al., 2017). L'amélioration des fonctions exécutives découlant de la pratique de ces activités motrices faciliterait à son tour le développement de la lecture et de l'écriture.

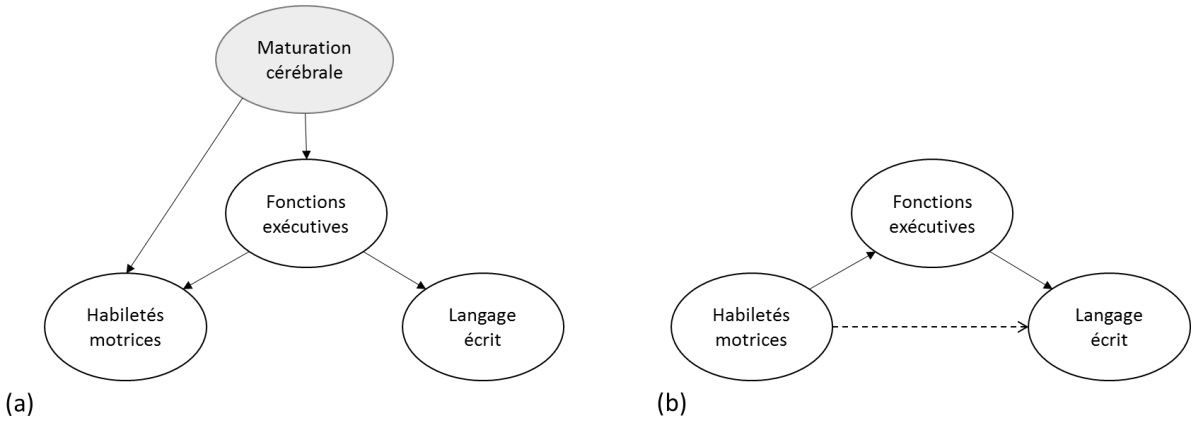

Figure 1: (a) Hypothèse d'un processus commun sous-tendant les relations entre les habiletés motrices et le développement cognitif. La maturation de réseaux cérébraux communs explique la relation entre les habiletés motrices et les fonctions exécutives. Une implication des fonctions exécutives dans certaines tâches motrices peut également expliquer cette relation (Cameron et al., 2012). Cette hypothèse de suggère pas d'influence de la motricité sur le langage écrit. (b) Hypothèse d'une influence des habiletés motrices sur le développement des fonctions exécutives. Dans cette hypothèse, les habiletés motrices influencent indirectement le langage écrit au travers de leur effet sur les fonctions exécutives.

Plusieurs études ont examiné la contribution distincte de la motricité et des fonctions exécutives sur la réussite scolaire et l'apprentissage du langage écrit au travers de modèles de régression ou des modèles d'équations structurales (SEM) (Cameron et al., 2012; Michel et al., 2019; Oberer et al., 2018; Roebers et al., 2014; Schmidt et al., 2017). Certaines ont ainsi montré qu'en contrôlant les fonctions exécutives, l'effet de la motricité sur les mesures du langage écrit n'était plus significatif. Par exemple, dans une étude longitudinale portant sur 169 élèves de 5 ans, différentes habiletés ont été évaluées pendant deux années consécutives (Roebers et al., 2014). Une analyse utilisant des modèles d'équations structurales montre que, si les performances motrices prédisent le niveau de QI ainsi que les performances académiques ultérieures, cette influence n'est plus significative après l'ajout de fonctions exécutives dans le modèle. Une étude utilisant une méthodologie similaire a modélisé l'effet spécifique de la motricité et des fonctions exécutives sur la lecture et l'orthographe de mots chez des élèves de grande section de maternelle (Michel et al., 2019). Les résultats montrent encore une fois que, bien que la motricité influence le langage écrit au-delà du QI et de l'âge, cette influence n'est plus significative après contrôle des fonctions exécutives. Notons que ces deux études n'ont pas cherché à tester l'hypothèse d'un lien causal et n'ont donc pas évalué l'existence d'une influence de la motricité sur le langage écrit au travers des fonctions exécutives.

D'autres études ayant testé cette hypothèse de médiation ont montré l'existence d'un effet indirect des habiletés motrices sur la réussite scolaire via les fonctions exécutives. Ce résultat se retrouve aussi bien chez les élèves de grande section de maternelle (Cadoret et al., 2018; Chang & Gu, 2018; Oberer et al., 2018) que chez des élèves plus âgés (Rigoli et al., 2012; Schmidt et al.,

2017; Sulik et al., 2018). Par exemple, dans une étude longitudinale menée chez des élèves de 10 à 12 ans, Schmidt et al. (2017) ont rapporté que la coordination motrice prédisait les performances d'inhibition, de flexibilité et de mémoire de travail ultérieures. La réussite scolaire évaluée un mois plus tard avec des tâches de mathématiques, de lecture et d'orthographe étaient prédites par les fonctions exécutives et indirectement – par le niveau de motricité antérieur.

Néanmoins, ces études présentent plusieurs limites. Tout d'abord, la majorité d'entre elles ont utilisé des mesures de la réussite scolaire qui combinent à la fois des mesures du langage écrit et des mathématiques mais ne s'intéressent pas spécifiquement au langage écrit (Cadoret et al., 2018; Oberer et al., 2018; Schmidt et al., 2017). En conséquence, la médiation n'a pas été testée en distinguant différentes dimensions du langage écrit, alors même que certaines d'entre elles, comme les processus de haut niveau, semblent plus influencées par le fonctionnement exécutif (Butterfuss & Kendeou, 2018; Cordeiro et al., 2020). Oberer et al. (2018) et Schmidt et al., (2017) soulignent également la nécessité d'intégrer une mesure d'écriture manuscrite – qui, comme indiqué dans une section précédente est également un médiateur potentiel pertinent (voir p.29). Ces deux mécanismes doivent donc être testés conjointement.

Par ailleurs, l'influence des habiletés motrices sur le fonctionnement exécutif ne peut pas être totalement démontré par ce type de protocole. En effet, Oberer et al. (2018) soulignent que les études de médiation transversales ne permettent pas de confirmer l'existence d'un lien de causalité entre motricité, fonctions exécutives et langage écrit ni de réellement trancher entre l'hypothèse d'un processus commun sous-tendant la motricité et les fonctions exécutives et l'hypothèse de causalité. Bien que certaines études adoptent un plan longitudinal (Oberer et al., 2018; Schmidt et al., 2017), ces dernières ne permettent pas non plus de confirmer un effet prédictif de la motricité au-delà du niveau initial des fonctions exécutives car celles-ci n'ont pas été mesurées lors du temps 1. Plus largement, le lien de causalité doit être démontré avec des études interventionnelles. Or, bien que certains travaux suggèrent que la pratique sportive favorise le développement des fonctions exécutives (Diamond, 2015; Diamond & Ling, 2016), ces activités entraînent des modifications physiologiques liées à l'exercice physique qui pourraient également être à l'origine de ces améliorations, au-delà de l'influence de la motricité (Diamond, 2015; Schmidt et al., 2017). Par ailleurs, les bénéfices d'entraînement ciblant la motricité fine sur les fonctions exécutives n'ont pas été démontrés à notre connaissance. Il est donc nécessaire de confirmer l'efficacité de ce type d'interventions sur le fonctionnement exécutif.

L'ensemble de ces résultats issus de l'étude du développement typique indique que les habiletés motrices sont un prédicteur de l'apprentissage du langage écrit ultérieur (Cameron et

al., 2012; Doyen et al., 2017). Différentes hypothèses ont été proposées pour expliquer cette relation et suggèrent une influence indirecte de la motricité sur l'apprentissage du langage écrit au travers de deux médiateurs : l'écriture manuscrite et les fonctions exécutives.

Au-delà de leurs implications dans la compréhension de l'apprentissage du langage écrit dans le développement typique, ces hypothèses apportent des éléments pour mieux comprendre les troubles de l'apprentissage du langage écrit. Dans la section suivante, nous aborderons les conséquences de difficultés motrices associées au sein de cette population.

4. HABILETES MOTRICES CHEZ LES ELEVES PRESENTANT UN TROUBLE DE L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT

4.1. COMORBIDITE AVEC LE TROUBLE DEVELOPPEMENTAL DE LA COORDINATION

Comme présenté dans le paragraphe précédent, plusieurs études ont mis en évidence l'existence d'un lien entre les habiletés motrices et l'apprentissage du langage écrit dans le développement typique. Cette relation se retrouve également chez les enfants avec un trouble de l'apprentissage du langage écrit : plusieurs travaux ont ainsi montré qu'il existait une forte comorbidité entre les différents troubles développementaux, malgré leurs spécificités (Jover et al., 2013; Kaplan et al., 2001). Ainsi, l'association entre trouble développemental de la coordination (TDC) et dyslexie est très fréquente et varie de 9,7 à 70% en fonction des critères diagnostiques utilisés (Jover et al., 2013). Plus généralement, la comparaison de groupes d'enfants dyslexiques à des enfants appariés en âge montre une altération de la motricité fine et de l'équilibre dans le groupe d'élèves dyslexiques (Brookman et al., 2013; Nicolson et al., 1999; Nicolson & Fawcett, 1994). A l'inverse, les élèves présentant un TDC ont fréquemment un déficit de la lecture associé. Par exemple, une étude de O'Hare & Khalid (2002) rapporte que 70% des enfants présentent un trouble de la lecture pour seulement 14% des enfants sans troubles moteurs.

Cette comorbidité interroge et certains auteurs ont proposé l'existence d'une étiologie commune à l'origine de ces différents troubles (Gilger & Kaplan, 2010; Nicolson et al., 2001; Nicolson & Fawcett, 2011). Par exemple, Gilger et Kaplan (2010) proposent qu'un développement cérébral atypique soit à l'origine de l'ensemble des troubles neuro-développementaux. Le modèle propose un continuum de sévérité, la présence d'une forme sévère d'un trouble augmentant la probabilité d'avoir d'autres troubles associés (Kaplan et al., 2006). Un autre modèle proposé par Nicolson et al. (2001) suggère l'existence d'un déficit cérébelleux dans la dyslexie qui engendrerait à la fois un trouble de l'apprentissage du langage écrit et des troubles moteurs. Cette hypothèse

est soutenue par les difficultés retrouvées chez les élèves dyslexiques sur certaines tâches impliquant le cervelet – comme le contrôle moteur et l'équilibre (Nicolson & Fawcett, 1994), l'estimation temporelle (Nicolson et al., 1995) et l'automatisation (Brookes et al., 2007). Ce déficit cérébelleux détériorerait l'apprentissage de la lecture au travers de deux mécanismes. D'une part, les troubles d'articulation des sons découlant du déficit moteur entraverait le développement de la phonologie. D'autre part, le déficit cérébelleux entraverait l'automatisation ce qui altérerait l'apprentissage des représentations orthographiques. Cependant, cette hypothèse a été critiquée car, bien que fréquente, l'association de troubles moteurs et d'apprentissage du langage écrit n'est pas systématique (Jover et al., 2013; Ramus, 2003). Dans ce contexte, l'hypothèse cérébelleuse a été revisitée pour tenir compte à la fois de la comorbidité et des spécificités des différents troubles neuro-développementaux dans l'hypothèse du déficit de l'apprentissage procédural (Nicolson & Fawcett, 2011). Cette hypothèse distingue différents systèmes d'apprentissage procédural soutenus par différents réseaux cérébraux : un système cérébello-cortical et un système striato-cortical. Chacun de ces réseaux est également divisé en deux systèmes sollicités dans la motricité ou le langage. Cette hypothèse propose donc une étiologie commune aux différents troubles neuro-développementaux : un déficit de l'apprentissage procédural. Cependant ce déficit peut se manifester différemment en fonction des réseaux atteints (cortico-striatal ou cortico-cérébelleux, boucle verbale ou boucle motrice) et rend donc compte de la diversité des symptômes retrouvés au sein des troubles neuro-développementaux. De plus, l'hypothèse permet d'expliquer la comorbidité qui correspondrait à une altération générale des systèmes d'apprentissage procédural amenant à l'expression de plusieurs troubles. Notons cependant qu'une récente étude en neuro-imagerie rapporte des résultats allant à l'encontre de cette hypothèse : alors que les élèves avec un TDC présentent des spécificités sur les réseaux cortico-striataux et cortico-cérébelleux, les élèves présentant une dyslexie isolée ne semblent pas présenter une connectivité fonctionnelle atypique sur ces différents réseaux (Cignetti et al., 2020). La présence d'une comorbidité semble associée aux mêmes altérations que les élèves avec un TDC seul mais ne se traduit pas par un dysfonctionnement plus général des réseaux cérébraux impliqués dans l'apprentissage procédural comme proposé par Nicolson et Fawcett (2011).

En conclusion, malgré leurs différences, ces modèles proposent tous les deux l'idée d'un continuum de sévérité : la comorbidité correspondrait à l'expression d'une altération plus générale, plus importante entraînant des difficultés majorées. Toutefois, ces modèles doivent encore être démontrés. Par ailleurs, au-delà de la question d'une étiologie commune entraînant le cumul de certaines difficultés, les interactions entre les troubles doivent être questionnées. Par exemple, il est possible que la présence de difficultés motrices associées impacte négativement l'apprentissage de la lecture et de l'écriture dans les troubles de l'apprentissage du langage écrit. En effet, au vu des travaux antérieurs menés dans le développement typique, il est attendu que

chez les élèves présentant des troubles moteurs et langagiers associés, les difficultés motrices entravent l'apprentissage du langage écrit au travers d'une détérioration du fonctionnement exécutif et de l'écriture manuscrite. En conséquence, la présence d'une comorbidité se traduirait par des difficultés majorées comparativement à ceux présentant un trouble isolé – et non une simple addition de difficultés. Afin de développer cette hypothèse, nous allons maintenant développer plus avant les travaux qui s'intéressent aux spécificités des élèves avec une comorbidité.

4.2. QUELLE INFLUENCE DE LA COMORBIDITE SUR LA SYMPTOMATOLOGIE ?

L'association de plusieurs troubles ne résulte pas systématiquement en l'addition des difficultés propres à chaque trouble et peut se traduire par un profil atypique. La comorbidité peut ainsi se traduire par une majoration des difficultés – causée par exemple par un effet négatif d'un symptôme sur un autre. A l'inverse, il est possible que certains symptômes aient un effet protecteur sur d'autres (Newcorn et al., 2001). Plusieurs travaux ont cherché à comparer les élèves présentant une dyslexie et un TDC associés à des élèves présentant un trouble isolé. Certaines études tendent à montrer que l'on retrouve des difficultés plus marquées chez les élèves avec une comorbidité (e.g. Cignetti et al., 2018; Jongmans et al., 2003; Puyjarinet, 2018). Cependant, d'autres ne retrouvent pas de différences par rapport à un trouble isolé (e.g. Biotteau et al., 2017). Dans ce travail, en accord avec les hypothèses formulées pour les élèves sans difficultés, nous allons nous focaliser sur les travaux qui s'intéressent aux conséquences de l'association d'un TDC et d'un trouble dyslexique sur le niveau de langage écrit, l'écriture manuscrite et les fonctions exécutives.

4.2.1. Apprentissage du langage écrit

Actuellement très peu d'études se sont intéressées à l'éventuel effet délétère de difficultés motrices associées sur les troubles du langage écrit. A notre connaissance, seule une récente étude a comparé le niveau de lecture et d'orthographe de mots et pseudo-mots de deux groupes d'élèves dyslexiques avec ou sans troubles moteurs associés (Di Brina et al., 2018). Leurs résultats révèlent que les élèves présentant un trouble isolé produisent plus d'erreurs lors de la lecture de mots et pseudo-mots que les élèves présentant des difficultés motrices associées. Par contre, aucune différence significative entre les sous-groupes n'est retrouvée pour l'orthographe de mots. Les résultats de l'étude vont donc à l'encontre de l'hypothèse d'une aggravation des troubles du langage écrit chez les élèves avec une comorbidité. Les auteurs interprètent ces résultats en proposant l'existence de deux sous-groupes d'élèves dyslexiques dont les difficultés auraient une étiologie différente. Les élèves avec un trouble isolé présenteraient un déficit phonologique plus

marqué qui entraverait le décodage. A l'inverse, les élèves avec un trouble moteur auraient des difficultés d'automatisation de l'écriture manuscrite qui impacteraient l'apprentissage des représentations orthographiques. Leur étude ne permet cependant pas de confirmer l'existence d'une différence de traitement phonologique entre les sous-groupes. De plus, s'agissant à notre connaissance de la seule étude réalisée sur cette question, ces résultats doivent être répliqués.

Par ailleurs, il est nécessaire de comprendre comment ces difficultés motrices pourraient impacter le trouble du langage écrit. Comme indiqué dans la précédente section (voir p.29), plusieurs études menées chez les élèves aux développement typique suggèrent deux mécanismes pour expliquer cette relation : une médiation via l'écriture manuscrite et une médiation via les fonctions exécutives. Outre un effet délétère des troubles moteurs sur l'apprentissage de la lecture et de l'écriture, il est nécessaire de confirmer leur impact sur ces deux médiateurs potentiels dans les troubles de l'apprentissage du langage écrit.

4.2.2. Ecriture manuscrite

Plusieurs travaux révèlent que l'écriture manuscrite est altérée à la fois dans le TDC (Huau et al., 2015; Prunty et al., 2013; Rosenblum & Livneh-Zirinski, 2008) et dans les troubles de l'apprentissage du langage écrit (Sumner et al., 2013).

Tout d'abord, le TDC s'accompagne fréquemment de difficultés d'écriture manuscrite – qui sont reportées par 87% des parents d'élèves présentant ce trouble pour seulement 15% des parents d'élèves sans difficultés (O'Hare & Khalid, 2002). Le trouble de l'écriture manuscrite se retrouve aussi bien au niveau de la qualité du produit – avec une altération des lettres et de l'organisation spatiale (Rosenblum & Livneh-Zirinski, 2008), qu'au niveau des processus d'écriture, avec une augmentation du nombre et de la durée des pauses en cours d'écriture (Prunty et al., 2013; Rosenblum & Regev, 2013). Par exemple, Rosenblum & Regev, (2013) rapportent que les enfants avec un TDC produisent des pauses en l'air plus longues comparativement aux enfants sans difficultés lors de différentes tâches d'écriture manuscrite. La durée et la position de ces pauses indiquent que cette altération est due à un manque d'automatisation du geste graphique plutôt que de difficultés liées à des processus langagiers (Prunty et al., 2013). Ce défaut d'automatisation de l'écriture est également mis en évidence par l'ajout de contraintes lors de tâche d'écriture qui majorent les difficultés. Les enfants avec un TDC produisent des lettres de plus grande taille et augmentent la pression sur le stylo suite à l'augmentation de la vitesse imposée ou la taille de texte à produire (Huau et al., 2015). Enfin, les enfants avec un TDC éprouvent des difficultés de transfert suite à une tâche d'apprentissage d'une nouvelle lettre (Adi-Japha & Brestel, 2020; Huau et al., 2015). En effet, bien qu'ils améliorent la qualité et la vitesse de tracé au fil des essais, le retrait du modèle ou de point de repère s'accompagne d'une détérioration de leur performance (e.g. augmentation du nombre de pauses,

diminution de la précision) (Adi-Japha & Brestel, 2020; Huau et al., 2015). Ces résultats suggèrent que le TDC se traduit par des difficultés à automatiser le programme moteur d'une nouvelle lettre.

Des difficultés d'écriture manuscrite ont également été rapportées dans la dyslexie développementale (Afonso et al., 2019; Sumner et al., 2013). Les élèves dyslexiques sont plus lents et produisent plus de pauses lors de tâches d'écriture (Sumner et al., 2013). Cependant, ces difficultés semblent dépendantes du trouble orthographique. En effet, l'augmentation du nombre de pauses est principalement retrouvée sur les mots mal orthographiés. De plus, ces spécificités se retrouvent également lors de l'écriture tapuscrite – ce qui suggère que le contrôle graphomoteur n'est pas à l'origine de ces difficultés (Afonso et al., 2019; Sumner et al., 2013). Enfin, les élèves dyslexiques obtiennent des performances similaires à celles d'élèves appariés sur le niveau de lecture lors de tâches d'écriture (Martínez-García et al., 2020; Sumner et al., 2013).

L'ensemble de ces éléments indique que les difficultés expérimentées dans chacun de ces troubles sont différentes. Dans le TDC, elles découlent d'une altération du contrôle graphomoteur (Afonso et al., 2019; Prunty et al., 2013) alors qu'elles sont liées au déficit du traitement orthographique dans la dyslexie (Afonso et al., 2019; Sumner et al., 2013). Les enfants présentant une comorbidité étant confrontés à ces deux types de difficultés devraient présenter une plus grande altération de l'écriture manuscrite. A notre connaissance, seule l'étude de Di Brina et al. (2018) s'est intéressée aux conséquences de l'association de ces troubles et rapporte une détérioration de la qualité de l'écriture manuscrite chez les élèves avec une comorbidité, comparativement à des élèves avec un trouble dyslexique isolé. Cependant, aucune différence significative n'est rapportée entre les groupes pour la vitesse d'écriture – évaluée avec une tâche de copie de texte. D'autres travaux sont nécessaires pour évaluer plus précisément les conséquences de troubles de la motricité et de l'apprentissage du langage écrit sur l'écriture manuscrite.

4.2.3. Fonctions exécutives

Outre une médiation par l'écriture manuscrite, l'étude du développement typique suggère qu'une médiation par les fonctions exécutives pourrait également expliquer le lien entre les habiletés motrices et l'apprentissage du langage écrit. De ce fait, il est nécessaire d'étudier les conséquences de l'association de troubles du langage écrit et de troubles moteurs sur les fonctions exécutives. L'étude de ces troubles neuro-développementaux suggère tout d'abord que le TDC comme la dyslexie s'accompagnent d'une altération des fonctions exécutives. En effet, un trouble dysexécutif a été pointé dans le TDC indépendamment d'une comorbidité avec le TDAH (Leonard et al., 2015; Wilson et al., 2013). Ainsi, dans une méta-analyse, Wilson et al., (2013) indiquent qu'il existe un déficit de la mémoire de travail verbale et visuo-spatiale mais aussi du contrôle inhibiteur chez les élèves avec un TDC. Des études longitudinales montrent par ailleurs que ce

déficit exécutif persiste au cours du temps (Bernardi et al., 2018). Dans la dyslexie développementale, une altération de la mémoire de travail phonologique a été rapportée (pour une méta-analyse : Swanson et al., 2009). Les fonctions exécutives non verbales semblent également altérées : par exemple une étude de Varvara et al. (2014) a montré que l'attention et la mémoire de travail visuelle et visuo-spatiale étaient altérées dans la dyslexie. Cependant, bien que les enfants avec un TDAH associé aient été exclus de cette étude, la présence de trouble moteur – généralement associé à des troubles visuo-spatiaux (Wilson et al., 2013) – n'a pas été contrôlée.

Les travaux s'intéressant aux conséquences de l'association d'un TDC et d'un trouble dyslexique sur les fonctions exécutives rapportent des résultats divergents. Tout d'abord, Puyjarinet (2018) a étudié l'influence de la présence de troubles associés chez des élèves avec un TDAH. Les résultats de l'étude indiquent que les élèves présentant à la fois un trouble du langage écrit et un TDC associés présentent plus de difficultés attentionnelles et d'inhibition comparativement aux élèves avec un trouble isolé. Ces résultats tendent donc à montrer que l'association de troubles moteurs et d'apprentissage du langage écrit majore le trouble dysexécutif. Par ailleurs, plusieurs études ont comparé des élèves avec un TDC et/ou une dyslexie en l'absence d'autres troubles neuro-développementaux associés. Par exemple, Biotteau et al. (2017) ont comparé les différents groupes en utilisant les différents subtests de la WISC-IV. Les résultats révèlent des difficultés visuo-spatiales propres au groupe avec un TDC isolé : en effet des différences significatives entre les groupes ne sont rapportées qu'entre le groupe TDC et le groupe dyslexie, mais pas avec le groupe comorbide. Ce dernier semble donc présenter un profil intermédiaire, plus proche de celui des élèves dyslexiques. Les auteurs proposent plusieurs pistes pour expliquer ce résultat comme un effet protecteur de la dyslexie sur certains compétences – notamment visuo-spatiales – ou encore l'existence de différents sous-groupes d'élèves dyslexiques. Cette dernière supposition implique que la comorbidité ne correspond pas à l'association d'un TDC et d'une dyslexie mais constitue en réalité un sous-type de dyslexie ou éventuellement un troisième type de trouble présentant ses propres spécificités (Biotteau et al., 2017). Une récente étude de Maziero et al. (2020) s'est intéressée plus précisément à la mémoire de travail chez des enfants avec une dyslexie isolée, un TDC isolé ou les deux types de troubles. En accord avec les résultats antérieurs qui pointent des difficultés phonologiques dans la dyslexie (Snowling, 1995), les résultats indiquent que les groupes d'élèves dyslexiques – avec ou sans TDC associé – ont des performances inférieures au groupe contrôle sur une tâche de mémoire de travail verbale. De la même façon, les élèves avec un TDC – associé ou non à une dyslexie – obtiennent des résultats inférieurs sur la tâche de mémoire de travail visuo-spatiale, conformément aux travaux rapportant un trouble visuo-spatiale dans le TDC (Wilson et al., 2013). Cependant, bien que le groupe comorbide présente à la fois des difficultés verbales et visuo-spatiales comparativement au groupe contrôle, il n'obtient pas des résultats significativement

différents des groupes présentant un trouble isolé, ce qui ne soutient pas l'hypothèse d'une majoration des difficultés dans le cas d'une comorbidité, mais plutôt d'une association de difficultés propres à chaque trouble.

L'étude des fonctions exécutives chez les élèves présentant des troubles moteurs et du langage écrit associés rapporte des résultats différents, certains soutenant une aggravation des difficultés comparativement à un trouble isolé (Puyjarinet, 2018), tandis que d'autres ne montrent pas de différences significatives entre les groupes d'élèves dyslexiques avec ou sans trouble moteur associé (Biotteau et al., 2017). Ces divergences peuvent s'expliquer par l'hétérogénéité des profils au sein des différents groupes. Par exemple, dans l'étude de Maziero et al. (2020), la présence d'un TDC n'est pas systématiquement associé à un trouble visuo-spatial. Par ailleurs, les fonctions exécutives étudiées sont différentes d'une étude à l'autre (attention et inhibition dans l'étude de Puyjarinet, 2018, et mémoire de travail dans l'étude de Maziero et al., 2020). Ces résultats soulignent également la nécessité d'étudier plus avant les différences entre les groupes et les conséquences de troubles moteurs associés sur les différentes fonctions exécutives.

En conclusion, la littérature tend à montrer que les troubles de la motricité et de l'apprentissage du langage écrit sont souvent associés (Jover et al., 2013) et plusieurs modèles ont essayé d'expliquer cette comorbidité en proposant une étiologie commune (Gilger & Kaplan, 2010; Nicolson & Fawcett, 2011). Il est également possible que les deux troubles interagissent. Par exemple, les résultats issus du développement typique suggèrent une influence des habiletés motrices sur l'apprentissage du langage écrit, qui se ferait au travers de l'automatisation de l'écriture manuscrite et du développement des fonctions exécutives. Néanmoins, dans la dyslexie, les conséquences de difficultés motrices associées sur l'apprentissage du langage écrit et les deux médiateurs potentiels (i.e. écriture manuscrite et fonctions exécutives) ont été peu étudiés. D'autres travaux sont nécessaires pour mieux comprendre les interactions entre ces troubles.

5. CONCLUSION

Plusieurs études se sont intéressées à la motricité fine comme prédicteur de l'émergence du langage écrit mais plusieurs questions demeurent. Tout d'abord, la très grande majorité des travaux s'est focalisée sur les liens entre motricité fine et apprentissage du langage écrit chez des jeunes élèves (i.e. en maternelle) et il est nécessaire de démontrer que l'influence de la motricité fine sur l'apprentissage du langage écrit persiste chez des élèves plus âgés. De plus, cette influence pourrait se faire au travers de deux mécanismes distincts et complémentaires, qui n'ont jamais

été testés simultanément : une médiation via l'écriture manuscrite et une médiation via le développement des fonctions exécutives. D'autres études doivent être réalisées en évaluant les différentes habiletés motrices (e.g. dextérité manuelle et habiletés graphomotrices) et les différents médiateurs potentiels afin de mieux comprendre les mécanismes qui sous-tendent cette relation à la fois chez les élèves avec un développement typique et chez les élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit.

CHAPITRE 3 : HABILETES RYTHMIQUES ET LANGAGE ECRIT

La motricité n'est pas la seule habileté non-langagière impliquée dans l'apprentissage du langage écrit. Actuellement, un nombre grandissant d'études s'intéresse aux liens entre la capacité à traiter des stimuli rythmiques et l'apprentissage de la lecture et de l'écriture. L'implication du traitement rythmique sur l'acquisition du langage oral avait déjà fait l'objet de beaucoup d'études. Plusieurs travaux suggèrent en effet que l'acquisition du langage oral s'appuie sur la perception de la structure rythmique de la parole (i.e. capacité à percevoir les intonations et accentuations dans les mots et phrases), ce qui permet par exemple aux nourrissons de discriminer certaines langues appartenant à la même typologie rythmique (e.g. syllabique vs accentuelle) (Nazzi et al., 1998). Certains auteurs proposent même que la capacité à traiter le rythme soit reliée à l'apparition du langage dans l'espèce humaine car la capacité à se synchroniser au rythme d'une musique ne semble partagée qu'avec certaines espèces animales, qui utilisent des système de communication vocale complexe, comme les perroquets (e.g. Patel, 2014; Patel et al., 2009). De par sa relation avec l'acquisition du langage oral, l'implication du traitement du rythme sur l'apprentissage du langage écrit a également fait l'objet de plusieurs travaux aussi bien dans le développement typique (David et al., 2007; Ozernov-Palchik et al., 2018) que dans les troubles du langage comme la dyslexie (Goswami, 2011; Ladányi et al., 2020; Wolff, 2002). De plus, certaines études suggèrent que cette habileté prédit le langage écrit au-delà de prédicteurs langagiers (e.g. Dellatolas et al., 2009; Ozernov-Palchik et al., 2018). Dans le présent chapitre, après s'être attardé sur la définition des habiletés rythmiques adoptée dans ce travail de thèse, les études s'intéressant aux liens entre rythme et langage écrit dans ces deux populations seront présentées. De plus, différentes hypothèses explicatives de cette relation proposées dans la littérature seront exposées.

1. DEFINITION DES HABILETES RYTHMIQUES

1.1. DEFINITION DU RYTHME

Le terme de rythme renvoie , dans le langage courant, à la notion d'une succession d'événements qui présente une certaine périodicité (Patel, 2010). Par exemple, le Larousse propose de définir le rythme comme un « retour de phénomènes et de faits à intervalle réguliers dans le temps – tel que le rythme des saisons ou des marées » (Larousse, 2020). Pourtant, cette notion de périodicité n'est pas consensuelle (Grahn, 2012; Patel, 2010). Par exemple, plusieurs auteurs soulignent que le rythme langagier – qui correspond aux informations temporelles

véhiculées par les accents, intonations et pauses dans la parole – n'est pas sous-tendu par une régularité isochrone (Patel, 2010). Par ailleurs, en psychologie de la musique, le terme de rythme est généralement utilisé pour désigner toute structure temporelle organisée dans le temps, indépendamment de la présence ou non d'une régularité qui la sous-tend (e.g. Grahn, 2012; Ozernov-Palchik et al., 2018, 2018) et les habiletés rythmiques sont fréquemment évaluées avec des tâches de reproduction de structures rythmiques complexes, composés d'intervalles courts et longs, mais sans régularité (e.g. González-Trujillo et al., 2014; Ozernov-Palchik et al., 2018). En accord avec ces auteurs, nous considérerons ici que les habiletés rythmiques renvoient à la perception et à la production de séquences de stimuli ou mouvements organisés dans le temps (Fraisse, 1974, 1982; Grahn, 2012).

1.2. TRAITEMENT DE LA DUREE ET DE LA REGULARITE DES SEQUENCES RYTHMIQUES

Actuellement, de nombreux auteurs suggèrent que le traitement des structures rythmiques complexe repose sur deux habiletés temporelles distinctes : la perception de la durée et la perception de la régularité (Fraisse, 1982; Merchant & de Lafuente, 2014; Teki et al., 2012; Trainor et al., 2018).

Le traitement de la *durée* permet d'évaluer l'intervalle entre deux événements successifs. Cette habileté temporelle peut être évaluée aussi bien au travers de tâches de perception que de production. Par exemple, il peut être demander de juger si un son est plus court ou plus long qu'un autre (Ivry & Keele, 1989; Nicolson et al., 1995; Trainor et al., 2018). Pour le versant de la production, il est généralement demandé au participant de reproduire un intervalle le plus précisément possible en cliquant sur un bouton (Ivry & Keele, 1989; Trainor et al., 2018).

Le traitement de la *régularité* d'une séquence temporelle renvoie quant à lui à deux notions : la *pulsation (« beat »)* et la *métrique* (Grahn, 2012; Huss et al., 2011; Trainor et al., 2018; Wolff, 2002). La *pulsation* correspond à la réponse psychologique interne qui confère une sensation de régularité lorsque l'on écoute (ou observe) une séquence rythmique. Cette sensation de pulsation coïncide généralement avec un stimulus extérieur – par exemple quand on écoute un métronome régulier ou le tic-tac d'une horloge. Cependant, il arrive qu'elle ne corresponde pas à un événement physique comme c'est souvent le cas dans certaines séquences musicales complexes. Il est alors nécessaire d'extraire cette pulsation à partir des propriétés temporelles de la séquence (Grahn, 2012). La sensation de pulsation peut également perdurer en l'absence de stimulus et permet par exemple de maintenir la production d'un mouvement régulier. La *métrique* correspond quant à elle à l'organisation temporelle des pulsations (Grahn, 2012). Par exemple, dans certaines musiques, on retrouve une accentuation régulière de certains pulses par rapport aux autres (e.g. dans une valse, une pulsation est accentuée tous les trois temps). Le traitement de

la métrique permet de percevoir cette hiérarchie en identifiant les différents niveaux de régularité. Comme pour le traitement de la durée d'intervalle, il existe des tâches permettant à la fois d'évaluer la perception de de la régularité des séquences rythmique et la production de rythmes régulier. Par exemple, pour le versant de la production, il peut être demandé au participant de se synchroniser sur un métronome en tapant exactement en même temps qu'un stimulus, généralement auditif, ou de continuer à produire un rythme régulier le plus précisément possible (e.g. Wolff, 2002). Concernant la perception, une des tâches fréquemment utilisé est la tâche de sensibilité à la métrique où il peut être demandé de discriminer des séquences musicales sur la base de différences d'accentuation (e.g. Huss et al., 2011).

La dissociation entre traitement de la durée et traitement de la régularité est corroborée par les études en neuro-imagerie et Teki et al. (2012) proposent l'existence de deux réseaux cérébraux spécifiques. Le traitement de la durée (« duration-based ») activerait un réseau cortico-cérébelleux alors que le traitement de la régularité (« beat-based ») activerait un réseau striato-thalamo-cortical. En accord avec ce modèle, on retrouve une plus grande implication du putamen dans la perception de séquences de stimuli temporels avec une régularité sous-jacente (Grahn & Brett, 2007; Grahn & Rowe, 2009). De plus, l'étude de patients atteints de syndromes cérébelleux montre qu'ils présentent spécifiquement des difficultés pour estimer les durées (Grube et al., 2010; Ivry & Keele, 1989).

1.3. RYTHME LANGAGIER ET RYTHME NON-LANGAGIER

Au-delà de la distinction entre ces deux types de traitement temporels, il est nécessaire de distinguer les traitements du rythme langagier et du rythme non langagier (Holliman et al., 2010). En effet, comme présenté précédemment, le langage comporte un ensemble d'indices temporels (accents, intonations, silences) qui constitue l'aspect rythmique de la prosodie (Holliman et al., 2010; Patel, 2010). Bien qu'ils présentent des similitudes, certains auteurs soulignent que les traitements du rythme langagier et le rythme non-langagier présentent également des spécificités et les liens entre ces deux types de traitements doivent encore être clarifiés (Patel, 2010). Par ailleurs, certaines études ont montré qu'ils exercent une influence distincte sur l'apprentissage du langage écrit (Holliman et al., 2010). L'objectif de cette thèse étant d'étudier deux prédicteurs non-langagiers, nous nous focaliserons spécifiquement sur le rythme non-langagier (ou rythme musical) et n'aborderons pas le rythme de la parole.

1.4. TERMINOLOGIE ADOPTEE DANS LA THESE

Dans ce travail de thèse, le terme « habiletés rythmiques » sera utilisé pour désigner l'ensemble des habiletés temporelles permettant de percevoir et produire une séquence de stimuli non langagiers ordonnés dans le temps. Toutefois, notons que ces habiletés peuvent

renvoyer à des processus cognitifs distincts en fonction du type de tâche utilisé. Par exemple, les tâches de reproduction de rythmes complexes reposent principalement sur un traitement de la durée des intervalles qui séparent les sons, alors que les tâches de synchronisation à un métronome régulier reposent sur la capacité à extraire le battement régulier qui sous-tend la séquence. De même, la perception et la production de rythmes pourrait renvoyer selon certains auteurs à des mécanismes différents (Holliman et al., 2010). Les relations entre ces différentes habiletés et l'apprentissage du langage écrit seront plus amplement présentées dans la section suivante.

2. LIENS ENTRE HABILETES RYTHMIQUES ET LANGAGE ECRIT DANS LE DEVELOPPEMENT TYPIQUE

Plusieurs travaux suggèrent que les habiletés rythmiques sont un prédicteur de l'apprentissage du lange écrit dans le développement typique (David et al., 2007; Dellatolas et al., 2009; Douglas & Willatts, 1994; González-Trujillo et al., 2014; Lundetræ & Thomson, 2018; Ozernov-Palchik et al., 2018). Cependant, il est nécessaire – comme pour les habiletés motrices – de s'interroger sur les tranches d'âges étudiées dans les études actuelles et d'identifier plus précisément quelles peuvent être les dimensions du langage écrit en lien avec le traitement rythmique. Enfin, comme présenté dans la partie précédente, le traitement rythmique repose sur plusieurs processus qui peuvent être reliés de façon distincte à l'apprentissage de l'écrit.

2.1. LIENS ENTRE HABILETES RYTHMIQUES ET APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT DANS LE DEVELOPPEMENT TYPIQUE

Tout d'abord, il est nécessaire de spécifier si l'influence des habiletés rythmiques est spécifique au début sur l'apprentissage du langage écrit ou si le lien entre ces habiletés persiste chez les élèves plus âgés. En effet, beaucoup de travaux se sont intéressés à cette relation chez des élèves de maternelle et Anvari et al. (2002) proposent que l'effet des habiletés rythmiques soit limité au début de l'apprentissage du langage écrit. Ils rapportent dans leur étude que les compétences musicales (rythme et hauteur) sont corrélées significativement au langage écrit chez des élèves de 4 ans (r = .57) mais ne retrouvent pas de corrélations significatives entre les habiletés rythmiques et la lecture chez les élèves de 5 ans (r = -.09). Ce résultat est toutefois en désaccord avec des études plus récentes qui ont montré que les habiletés rythmiques évaluées chez des enfants de 5 et 6 ans prédisent le niveau de lecture. Par exemple, Ozernov-Palchik et al. (2018) ont montré que la discrimination de rythme évaluée chez des élèves de maternelle prédit le niveau de langage écrit, évalué avec une tâche de conversion graphème-phonème, après

contrôle du QI. D'autres études longitudinales ont également confirmé ce lien. Ainsi, la production de rythme a été évalué dans de larges cohortes d'élèves de grande section de maternelle (Dellatolas et al., 2009; Lundetræ & Thomson, 2018) et de CP (David et al., 2007). Dans les différentes études, les habiletés rythmiques prédisent le niveau de décodage de mots et pseudo-mots dans les niveaux supérieurs jusqu'en CM2 après contrôle de prédicteurs langagier. Lundetræ et Thomson (2018) ont également rapporté que l'ajout du rythme dans un modèle de classification permet de mieux détecter les élèves à risque de présenter des difficultés d'orthographe. Ces trois études ont été menées dans différents pays auprès d'enfants parlant l'anglais (David et al., 2007), le français (Dellatolas et al., 2009) ou le norvégien (Lundetræ & Thomson, 2018) : les habiletés rythmiques précoces semblent donc être un prédicteur important de l'émergence du langage écrit, indépendamment de la langue. Par ailleurs, le lien entre habiletés rythmiques et lecture perdure chez des élèves plus âgés du CE2 jusqu'au lycée (Douglas & Willatts, 1994; González-Trujillo et al., 2014; Holliman et al., 2010; Tierney & Kraus, 2014; Zhang et al., 2017). Ainsi, la perception de rythme est corrélée au niveau de lecture en anglais chez des élèves de CE2 bilingues (chinois et anglais) (Zhang et al., 2017). De la même façon, Tierney et Kraus (2013) rapportent une corrélation significative entre production de rythme et lecture chez des adolescents de 14 à 17 ans. Au-delà de corrélations, plusieurs travaux rapportent que les habiletés rythmiques prédisent le niveau de lecture après contrôle de prédicteurs langagiers comme le niveau de vocabulaire (Douglas & Willatts, 1994; González-Trujillo et al., 2014) ou la mémoire de travail verbale (González-Trujillo et al., 2014) en CE2 et CM1. En conclusion, l'ensemble de ces travaux indique que les habiletés rythmiques sont un prédicteur du niveau de lecture indépendamment de la tranche d'âge.

2.2. DIMENSIONS DU LANGAGE ECRIT EN LIEN AVEC LES HABILETES RYTHMIQUES

Une deuxième question concerne les dimensions du langage écrit impactées par les habiletés rythmiques. En effet, la majorité des études s'est focalisée sur le lien entre habiletés rythmiques et le développement de la lecture (précision et fluence de la lecture) mais pas sur d'autres dimensions du langage écrit. Par exemple, alors que l'orthographe de mots partage de nombreux mécanismes communs avec la lecture de mots (Ehri, 2000), l'effet des habiletés rythmiques sur l'orthographe a été peu étudié. Une première étude suggère que la production rythmique évaluée en maternelle permet de prédire les difficultés d'orthographe en CP (Lundetræ & Thomson, 2018). Une seconde étude, menée chez des élèves plus âgés de CM1, a également rapporté une corrélation significative entre production rythmique et orthographe (r = .34) (Douglas & Willatts, 1994). Cependant, d'autres travaux sont nécessaires pour confirmer ce lien entre les habiletés rythmiques et orthographiques. Concernant les compétences de plus haut niveau, aucune étude n'a, à notre connaissance, rapporté de mesure de compréhension ou de

production de texte chez des élèves tout venants. En revanche, la capacité à discriminer des rythmes prédit les compétences grammaticales évaluées à l'oral (Gordon, Shivers, et al., 2015). D'autres études montrent également qu'un amorçage avec un rythme régulier – par rapport à un amorçage avec un stimulus non régulier, permet d'améliorer la détection d'erreur syntaxiques à l'oral. Ainsi, le rythme semble favoriser le traitement grammatical (Chern et al., 2018). Il est possible que cette effet se retrouve également à l'écrit et que les habiletés rythmiques influencent la compréhension écrite ou les compétences rédactionnelles.

2.3. HABILETES RYTHMIQUES EN LIEN AVEC L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT

Au-delà des distinctions entre les différentes dimensions du langage écrit, il est nécessaire d'identifier plus précisément quelles habiletés rythmiques influencent l'apprentissage de l'écrit. En effet, certains travaux suggèrent une influence distincte des différentes habiletés rythmiques. Tout d'abord, plusieurs études rapportent des liens entre le niveau de lecture et la capacité à percevoir des rythmes (e.g. Ozernov-Palchik et al., 2018; Zhang et al., 2017) ainsi que la capacité à reproduire des séquences rythmiques (González-Trujillo et al., 2014). Cependant, ces études n'ont pas mesuré à la fois de la perception et de la production de rythme afin de préciser l'existence d'un effet conjoint ou indépendant de ces deux versants du traitement rythmique sur l'apprentissage de l'écrit. Seule une étude a intégré ces deux type de mesures et rapporte que seule la perception – mais pas la production – de rythmes prédit le niveau de lecture chez des élèves de 5 à 8 ans (Holliman et al., 2010). Par ailleurs, beaucoup des études s'intéressant au lien entre traitement du rythme et lecture utilisent une tâche de reproduction de rythme complexes (González-Trujillo et al., 2014; Ozernov-Palchik et al., 2018). Par exemple, dans la tâche Stambak (1951) les participants doivent reproduire un rythme composé d'une succession d'intervalles longs et courts. Or ce type de tâche repose à la fois sur une perception de la durée et une perception de la régularité sous-jacente (Grahn, 2012). Aucun travaux n'a cherché à distinguer l'influence distincte de ces deux types de traitement temporel sur l'apprentissage de la lecture, bien que certains aient étudié plus spécifiquement l'influence du traitement de la régularité (e.g. synchronisation à un métronome régulier : David et al., 2007; Tierney & Kraus, 2014). Or, une meilleure identification des habiletés rythmiques et temporelles impliquées dans l'apprentissage du langage écrit permettrait de mieux comprendre comment elles influencent cet apprentissage.

Pour conclure sur cette partie, l'ensemble de ces travaux révèle que les habiletés rythmiques prédisent le niveau de langage écrit dans le développement typique (David et al., 2007; Dellatolas et al., 2009). Cet effet se retrouve dans différentes tranches d'âges jusqu'à l'adolescence (Tierney & Kraus, 2013). Cependant, la majorité de ces études s'est intéressée au

lien entre rythme et lecture et d'autres travaux doivent être menés afin de tester si le rythme est en lien avec d'autres dimensions du langage écrit. En outre, l'influence distincte de différentes habiletés rythmiques doit être examinée. Enfin, les mécanismes à l'origine du lien entre rythme et développement de la lecture et de l'écriture doivent être clarifiés. Plusieurs hypothèses seront exposées dans la section suivante.

3. MECANISMES EXPLICATIFS DU LIEN ENTRE RYTHME ET LANGAGE ECRIT

3.1. HYPOTHESE D'UNE MEDIATION VIA LA PHONOLOGIE

De par les relations existant entre le traitement du rythme musical et le langage oral, une première explication apportée a été celle d'une médiation par des habiletés langagières – et notamment la conscience phonologique. Cette hypothèse suggère que le traitement temporel et rythmique permet de mieux découper la parole en sons et permettrait donc d'améliorer la discrimination des mots, syllabes et phonèmes (Tierney & Kraus, 2014). Cette proposition est soutenue par les résultats d'études corrélationnelles (e.g. David et al., 2007), interventionnelles (e.g. Gordon et al., 2015) ou d'études ayant testé directement l'hypothèse de médiation au travers de modèles en piste causal (Ozernov-Palchik et al., 2018).

3.1.1. Influence du traitement rythmique sur le développement de la phonologie : Precise Auditory Timing Hypothesis

Afin d'expliquer les relations entre la capacité à se synchroniser sur un métronome régulier et le développement de la lecture dans le développement typique, Tierney et Kraus (2014) ont développé l'hypothèse de synchronisation auditive précise (Precise Auditory Timing Hypothesis). Cette théorie peut être rapprochée d'autres hypothèses qui suggèrent que le rythme permet de découper le flux de la parole (Cutler, 1991; Pitt & Samuel, 1990) et qui proposent que le traitement de la musique et du langage oral repose sur les mêmes réseaux cérébraux (Patel, 2011). L'hypothèse de Tierney et Kraus (2014) se base sur le phénomène d'entraînement au rythme : lors de la perception d'un stimulus régulier externe, on observe une synchronisation spontanée du mouvement qui est guidé par un oscillateur interne. Ce phénomène d'entraînement au rythme permet un traitement précis des indices temporels et rythmiques dans la parole et donc de discriminer les phonèmes et de segmenter le discours. Cette habileté est donc indispensable au développement des compétences phonologiques. L'hypothèse de Tierney & Kraus (2014) prédit en conséquence que les habiletés rythmiques sont reliées aux habiletés phonologiques et plusieurs études corrélationnelles confortent cette hypothèse. Par exemple, la capacité à se synchroniser sur un métronome est corrélée à la conscience phonologique et à la dénomination rapide en maternelle (David et al., 2007) et chez des élèves de CP et CE1 (Holliman et al., 2010).

3.1.2. Bénéfices des entraînements musicaux et rythmiques sur les compétences phonologiques.

Outre les études corrélationnelles, un nombre grandissant d'études interventionnelles soutiennent l'hypothèse d'une médiation phonologique chez les élèves de maternelle (Degé & Schwarzer, 2011). Ainsi, deux méta-analyses récentes confirment les bénéfices modérés apportés par ces entraînements musicaux sur les compétences phonologiques – les études rapportent une petite taille d'effet de respectivement d = .20 et d = .17 (Gordon, Fehd, et al., 2015; Sala & Gobet, 2017b). Cependant, dans ces études, il est difficile de démêler l'effet du rythme de celui d'autres compétences musicales alors même qu'il semble que la perception rythmique et la perception de la hauteur ont un effet distinct sur le développement du langage écrit (Anvari et al., 2002). De plus, dans la méta-analyse de Gordon et al. (2015), le bénéfice de la musique est principalement retrouvé sur la discrimination des rimes et les auteurs soulignent que les exercices de chants qui mettent l'accent sur la perception des rimes pourraient expliquer ce résultat. A notre connaissance, seules deux études interventionnelles ciblant spécifiquement le rythme ont été menées chez des élèves sans trouble du langage et ont été réalisées en maternelle. Une récente étude a comparé les bénéfices d'un entraînement à la perception de la hauteur et un entraînement au rythme à un entraînement contrôle (activité sportive) (Patscheke et al., 2019). Elle rapporte que seul l'entraînement ciblant la perception de la hauteur a permis d'améliorer la phonologie. Inversement, autre étude proposant un entraînement spécifiquement focalisé sur le rythme rapporte quant à elle une amélioration de la phonologie suite à l'intervention (Moritz et al., 2013). Les bénéfices des entraînements rythmiques sur les habiletés phonologiques restent donc à confirmer chez les élèves de maternelles et à tester chez les élèves plus âgés. Enfin, il est important de souligner que ces différents entraînements rythmiques impliquent à la fois des exercices langagiers (e.g. segmenter une phrase en syllabe en tapant des mains) et non langagiers (e.g. taper sur un tambourin). Il est donc nécessaire de confirmer l'efficacité d'interventions ciblant spécifiquement le rythme non-langagier sur le développement de la phonologie et du langage écrit.

3.1.3. Etudes de médiation dans le développement typique : une médiation phonologique partielle

Au-delà d'études corrélationnelles et interventionnelles menées afin de démontrer les liens entre habiletés rythmiques et phonologiques, l'hypothèse d'une médiation par la phonologie a été directement testée en utilisant des analyses de régressions ou des modèles en piste causale. Cependant, ces dernières sont à notre connaissance très peu nombreuses (Ozernov-Palchik et al., 2018; Zhang et al., 2017). Tout d'abord, Zhang et al. (2017) rapportent une médiation totale par la phonologie après avoir spécifiquement testé l'hypothèse d'une médiation au travers de

régressions en suivant la méthode de Baron et Kenny (1986). Cependant, il faut souligner que ces auteurs utilisent une mesure des habiletés musicales qui combine perception du rythme et perception de la hauteur. Leur résultat ne peut donc pas être généralisé au lien entre rythme et langage écrit. Une autre étude a exploré l'hypothèse d'une médiation via la phonologie en utilisant des modèles en piste causale (Ozernov-Palchik et al., 2018). Les résultats indiquent que l'effet indirect de la perception de rythme sur le langage écrit au travers de la conscience phonologique est significatif, ce qui soutient l'hypothèse de médiation chez des élèves de grande section de maternelle. Aucune étude n'a testé l'hypothèse d'un effet indirect des habiletés rythmiques sur le langage écrit via les compétences phonologiques chez les élèves plus âgés. L'hypothèse d'une médiation phonologique doit être confirmée dans cette tranche d'âge. Enfin, soulignons que dans l'étude de Ozernov-Palchik et al. (2018), la médiation phonologique est seulement partielle : l'effet direct du rythme sur le langage écrit perdure après contrôle de la conscience phonologique. Ce résultat suggère qu'un autre mécanisme pourrait sous-tendre cette relation.

3.2. 3.2. HYPOTHESE D'UNE MEDIATION VIA LES FONCTIONS EXECUTIVES

Une seconde hypothèse avancée pour expliquer l'effet des habiletés rythmiques sur l'apprentissage du langage écrit est celle d'une médiation via les fonctions exécutives. En effet, dans une précédente partie, nous avons pu voir que ces fonctions influençaient aussi bien l'identification et l'orthographe de mots (Altemeier et al., 2008; Best et al., 2011; Peng et al., 2018) que la compréhension et la rédaction (Butterfuss & Kendeou, 2018; MacArthur et al., 2008). Par ailleurs, plusieurs études rapportent que les habiletés rythmiques sont également en lien avec l'attention et les fonctions exécutives (Monier & Droit-Volet, 2019; Tierney & Kraus, 2014) et que l'entraînement musical et rythmique pourrait améliorer la cognition (Sala & Gobet, 2017b; Slevc et al., 2016). Dans la suite de cette section, les arguments en faveur d'un lien entre habiletés rythmiques et fonctionnement exécutives seront exposés en distinguant deux interprétations de ce lien : celle d'une implication des fonctions exécutives dans le traitement rythmique et celle d'une influence des habiletés rythmiques sur le développement du fonctionnement exécutif.

3.2.1. Liens entre rythme et fonctions exécutives

Plusieurs études rapportent des liens entre les habiletés rythmiques et les fonctions exécutives. Par exemple Tierney et Kraus (2013) ont montré que la capacité à se synchroniser à un métronome régulier était corrélée avec l'identification de mots mais aussi avec l'attention soutenue. Ils suggèrent que l'attention et plus généralement le contrôle exécutif pourraient expliquer en partie le lien entre rythme et langage écrit. La relation entre attention et habiletés rythmiques est confortée par l'étude du trouble déficitaire de l'attention avec ou sans

hyperactivité (TDAH). Ainsi, les enfants et adultes présentant ce trouble ont des difficultés pour percevoir et produire des rythmes (Puyjarinet et al., 2017). D'autres études rapportent que certaines tâches rythmiques sont en lien avec la mémoire de travail verbale (Grahn & Schuit, 2012). Par exemple, Monier et Droit-Volet (2019) ont fait passer deux tâches de rythme à des enfants de 4 à 7 ans : une tâche de synchronisation à un métronome et une tâche de poursuite de rythme (« continuation task »). Les résultats montrent que la variabilité de la synchronisation sur une tâche de poursuite de rythme est corrélée à la mémoire de travail. La capacité à reproduire un rythme est également corrélée à la mémoire de travail phonologique chez l'adulte (Grahn & Schuit, 2012; Saito, 2001) et chez l'enfant (González-Trujillo et al., 2014; Ireland et al., 2019).

Ces liens entre rythme et fonctions exécutives peuvent être expliqués de deux façon. La première interprétation est celle d'une implication de processus cognitifs de haut niveau dans la réalisation de tâche rythmiques. Une seconde interprétation propose l'existence d'un lien causal entre les habiletés rythmiques et les fonctions exécutives : il y aurait ainsi un bénéfice de l'exercice de tâches rythmiques sur le développement des fonctions exécutives.

3.2.2. Implication des fonctions exécutives dans certaines tâches de rythme.

Avant tout, il semble que l'attention et la mémoire de travail jouent un rôle clé dans certaines tâches de rythme. Ainsi, dans le développement typique et chez l'adulte sain, les liens entre fonctions cognitives et rythme pourraient dépendre des tâches utilisées. En effet, la capacité à se synchroniser à un rythme régulier repose sur des processus automatiques, tandis que d'autres tâches de rythme, plus coûteuses, impliquent l'attention et les fonctions exécutives (Grahn & Schuit, 2012; Monier & Droit-Volet, 2019; Repp & Keller, 2004). Par exemple, des études en double tâche suggèrent que le contrôle exécutif et attentionnel est plus important lors de la synchronisation à des fréquences lentes (Bååth et al., 2016), lorsque l'on demande de continuer à produire un rythme régulier en l'absence de stimuli (Repp & Keller, 2004) ou lors de l'adaptation à un nouveau tempo (Repp & Keller, 2004). De plus, la mémoire de travail prédit la capacité à reproduire un rythme. Ainsi, Grahn et Schuit (2012) ont montré que la mémoire de travail verbale est le principal prédicteur de la reproduction de rythme chez des adultes, et ce indépendamment de la pratique musicale. Chez l'enfant, les performances à cette tâche sont également prédites par la mémoire de travail verbale chez des élèves de 5 à 7 ans au-delà de l'effet de l'âge et du raisonnement non-verbal (González-Trujillo et al., 2014; Ireland et al., 2019).

Au-delà des arguments en faveur d'une implication des fonctions exécutives dans certaines tâches rythmiques, l'étude des musiciens et des bénéfices de la musique sur la cognition suggère que les entraînements rythmiques pourraient également améliorer les fonctions exécutives.

3.2.3. Hypothèse d'un lien causal : bénéfices de la musique et des entraînements rythmiques sur les fonctions exécutives

3.2.3.1. Etude des musiciens

L'étude des musiciens a permis de montrer que ces derniers ont un fonctionnement exécutif plus efficient par rapport à des sujets non musiciens : ils obtiennent de meilleurs performances sur des tâches évaluant la mémoire de travail verbale (Hansen et al., 2013) ou l'inhibition (Bialystok & DePape, 2009). Une étude s'est intéressée plus généralement au lien entre le niveau de compétences musicales (rythme et musique) et les performances lors de tâches évaluant trois fonctions exécutives (inhibition, mise à jour de la mémoire de travail et flexibilité) (Slevc et al., 2016). Les résultats montrent que les habiletés musicales prédisent la mise à jour de la mémoire de travail visuelle et auditive indépendamment de la modalité sensorielle après contrôle d'autres facteurs (âge, niveau socio-économique, latéralité et bilinguisme). Le contrôle inhibiteur est également significativement meilleur dans le groupe de musicien par rapport au groupe non musicien (Slevc et al., 2016). Cependant, ces études ne s'intéressent pas spécifiquement au rythme mais plus généralement aux habiletés musicales qui intègrent d'autres compétences – comme la perception de la hauteur du son. Aussi, certaines études ont examiné plus spécifiquement le lien entre rythme et fonctions exécutives chez les musiciens et rapportent que les percussionnistes ont de meilleures capacités attentionnelles et d'inhibition que les musiciens non-percussionnistes (Slater et al., 2017). De plus, la capacité à produire un rythme est corrélée à la mémoire de travail verbale (Bailey & Penhune, 2010) et à l'attention et l'inhibition au sein de cette population (Slater et al., 2017). En outre, la sensibilité neurale à l'alignement au rythme (i.e. mesure réalisée en EEG permettant de mesurer la perception de la régularité au sein d'une séquence rythmique) est également corrélée au niveau d'inhibition chez les musiciens (Slater et al., 2017). L'ensemble de ces résultats montre donc que les habiletés rythmiques – mesurées à la fois par des mesures électro-encéphalographiques et des mesures comportementales – sont reliées au fonctions exécutives chez les musiciens.

3.2.3.2. Etude interventionnelles

Les résultats d'études interventionnelles suggèrent également que les entraînement musicaux influencent le développement des fonctions exécutives (Jaschke et al., 2018; Moreno et al., 2011). Par exemple, une étude de Jaschke et al. (2018) a montré qu'un entraînement musical améliorait les fonctions cognitives (inhibition, planification et habiletés verbales) par rapport à un groupe contrôle actif (arts visuels) et un groupe contrôle passif chez des élèves de grande section de maternelle. Une analyse de médiation suggère que l'augmentation des habiletés cognitives liée à l'entraînement musical se transfère aux résultats scolaires (i.e. langage écrit et mathématiques). Une méta-analyse rapporte des bénéfices plus mitigés de la musique puisqu'elle

ne retrouve un effet de la pratique musicale que sur la mémoire (d = .39; p <.001) mais pas sur les autres fonctions exécutives (Sala & Gobet, 2017b). Cependant, il est à noter que la mémoire regroupe ici des tâches diverses ne se limitant pas à la mémoire de travail et que les autres mesures des fonctions exécutives sont mélangées à d'autres habiletés. D'autres méta-analyses distinguant plus finement les différentes habiletés cognitives doivent être réalisées pour confirmer les bénéfices de la musique sur les fonctions exécutives. Enfin, comme nous l'avons abordé dans une section précédente, les entraînements musicaux ne ciblent pas uniquement sur le rythme. Seule une étude récente, a dissocié spécifiquement les bénéfices d'un entraînement musical basé sur le rythme (percevoir ou reproduire des rythmes avec des instruments ou la voix) et ceux d'un entraînement basé sur la perception de la hauteur (discriminer les instruments, les sons hauts et graves, chant) chez des enfants de grande section de maternelle (Frischen et al., 2019). Les deux interventions ont été comparées à un entraînement sportif (pratique du yoga, jeux de balles et d'équilibres). Les résultats ont montré un bénéfice de l'entraînement rythmique sur l'inhibition par rapport au groupe contrôle. Cependant, aucun effet significatif n'a été retrouvé sur les autres fonctions exécutives (flexibilité et mémoire de travail visuo-spatiale).

L'ensemble de ces résultats indique qu'il existe un lien entre habiletés rythmique et apprentissage du langage écrit dans le développement typique. Ce lien semble partiellement expliqué par les habiletés phonologiques (Moritz et al., 2013; Ozernov-Palchik et al., 2018). Toutefois, un effet direct du rythme sur le langage écrit persiste au-delà de l'inclusion de prédicteurs phonologiques, ce qui suggère que d'autres mécanismes peuvent expliquer ce lien. Une hypothèse alternative proposée par Tierney et Kraus (2013) est celle d'une médiation par les fonctions exécutives, qui est confortée par l'étude des musiciens et des interventions musicales. Par ailleurs, la relation entre habiletés rythmiques et apprentissage du langage écrit n'est pas retrouvée uniquement dans le développement typique : l'étude des troubles du langage – qu'il s'agisse de la dyslexie ou du trouble spécifique du langage oral – révèle une altération du traitement rythmique dans cette population et de nouveaux modèles théoriques émergent pour proposer de nouvelles théories pour expliquer l'origine des troubles du langage.

4. HABILETES RYTHMIQUES CHEZ LES ELEVES PRESENTANT UN TROUBLE DE L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT

4.1. ALTERATION DU TRAITEMENT RYTHMIQUES DANS LES TROUBLES DE L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT

De nombreuses études rapportent un déficit du traitement du rythme dans les troubles du langage, comme dans la dyslexie développementale (Bhide et al., 2013; Huss et al., 2011; Thomson et al., 2006; Thomson & Goswami, 2008), ou dans le trouble spécifique du langage oral (Corriveau & Goswami, 2009). Ce déficit se retrouve aussi bien sur le versant de la perception de rythme, comme la sensibilité à la métrique (Flaugnacco et al., 2014; Huss et al., 2011), qu'au niveau de la production de rythme, comme la capacité à se synchroniser sur un métronome régulier (Flaugnacco et al., 2014; Thomson & Goswami, 2008; Wolff, 2002). De plus, outre une plus moindre précision et une plus grande variabilité lors de la réalisation d'une tâche de synchronisation sensori-motrice, les élèves dyslexiques présentent des spécificités dans leur synchronisation – comme une plus grande anticipation de l'apparition du stimulus (Thomson & Goswami, 2008; Wolff, 2002). Par ailleurs, les déficits du traitement temporel dans la dyslexie se retrouve aussi bien sur des tâches d'estimation de la durée d'un intervalle (e.g. Nicolson et al., 1995; Thomson & Goswami, 2008) que sur des tâches nécessitant de traiter la régularité d'un rythme régulier – comme la synchronisation à un métronome (e.g. Thomson & Goswami, 2008; Wolff, 2002). Ces difficultés ne sont pas limitées au début de l'apprentissage du langage écrit mais perdurent au cours du temps et se retrouvent également chez les adultes dyslexiques (Thomson et al., 2006). Enfin, le déficit du traitement temporel – qu'il s'agisse de l'estimation de la durée ou du traitement de rythmes réguliers – est corrélé au trouble phonologique et aux difficultés de lecture et d'orthographe (Flaugnacco et al., 2014; Huss et al., 2011; Thomson & Goswami, 2008). Une étude longitudinale a notamment montré que les habiletés rythmiques des élèves dyslexiques prédisent le niveau de décodage et de compréhension ultérieur (Goswami et al., 2013). Ces observations ont amenés certains auteurs à formuler de nouveaux modèles théoriques pour essayer d'expliquer le déficit phonologique et les troubles de l'apprentissage du langage écrit (Goswami, 2011; Tallal, 1980).

4.2. TRAITEMENT DU RYTHME ET DEFICIT PHONOLOGIQUE DANS LA DYSLEXIE

Si l'existence d'un déficit phonologique dans la dyslexie fait consensus, certains auteurs ont émis l'hypothèse que ce déficit phonologique pourrait être la conséquence d'un déficit

perceptif auditif temporel primaire qui, en altérant le traitement phonologique, serait à l'origine des troubles du langage écrit (Ramus, 2003).

Une première théorie, proposée par Tallal (1980, 2004), suggère l'existence d'un déficit du traitement temporel auditif rapide (RAPD) dans la dyslexie qui serait à l'origine de difficultés de discrimination de certains phonèmes. Dans son étude princeps, deux stimuli auditifs étaient présentés consécutivement et l'enfant devait indiquer l'ordre des deux stimuli en appuyant sur un boitier de réponse (1-1, 1-2, 2-1 ou 2-2). Dans une première condition, les deux stimuli étaient espacés par un intervalle fixé à 428 ms et dans une seconde condition l'intervalle était raccourci (8 à 305 ms). Les résultats ont montré que les élèves dyslexiques étaient moins performants que les élèves tout venant sur cette tâche – notamment quand les stimuli étaient espacés par un intervalle court. Cependant, les tentatives de réplications n'ont pas rapporté de résultats consistants et certaines ont parfois montré des résultats inverses qui indiqueraient un déficit du traitement des intervalles longs plutôt que des intervalles courts (Ramus, 2003; Thomson, 2009). De plus, ces difficultés du traitement temporel rapide ne sont pas retrouvés chez tous les élèves dyslexiques ni toujours associés au déficit phonologique ce qui remet en cause l'hypothèse d'un lien causal entre traitement auditif rapide et phonologie (Mody et al., 1997; Ramus, 2003; Thomson, 2009).

Pour autant, l'hypothèse d'un déficit temporel à l'origine des troubles phonologiques de la dyslexie n'a pas été totalement abandonnée. Plus récemment, Goswami (2011) a proposé un nouveau modèle explicatif, le « temporal sampling framework » (TSF) (2011). Plutôt que de mettre l'accent sur la discrimination de la durée des intervalles, le TSF s'intéresse à la perception de changement d'amplitude de l'enveloppe temporelle dans le discours (Figure 2a) et de la montée de l'amplitude au sein d'une syllabe ou « rise time » (Figure 2b). Ce modèle propose qu'il existe un déficit de la perception des changements d'amplitude de l'enveloppe temporelle chez les élèves présentant une dyslexie (Goswami et al., 2010; Muneaux et al., 2004). Or, les variations de l'enveloppe temporelle permettraient notamment de discriminer certains phonèmes (Rosen et al., 1992) mais aussi les syllabes (Goswami, 2011). Plus spécifiquement, le TSF propose qu'il existe dans la dyslexie un défaut de synchronisation des rythmes cérébraux delta et thêta dans le cortex auditif lors de l'écoute de signaux acoustiques. Ce fonctionnement oscillatoire atypique associé au traitement et à la perception de basses fréquences acoustiques (2 à 10 Hz) entraverait en conséquence le traitement des syllabes et de l'accent tonique qui apparaissent respectivement à une fréquence de 5Hz et de 2Hz (Goswami, 2011, 2019; Leong & Goswami, 2014). Ceci impacterait plus généralement le développement de la phonologie sur lequel repose l'apprentissage du langage écrit.

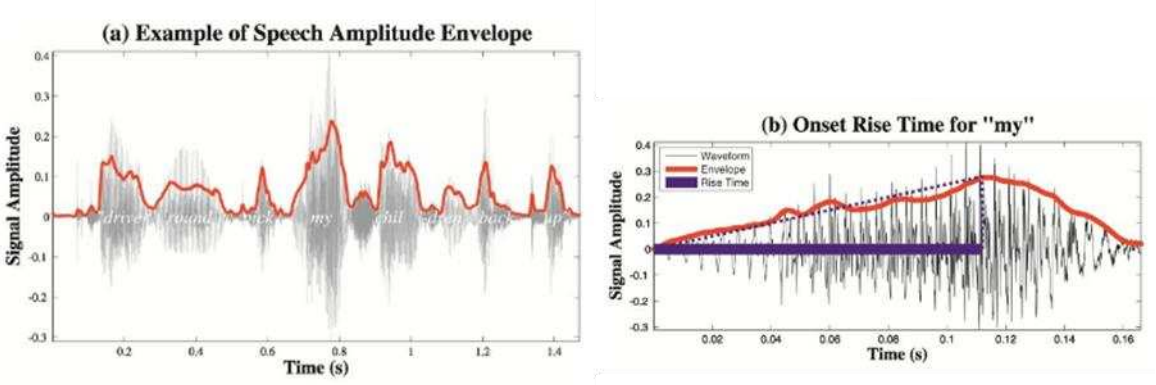

Figure 2 : Amplitude de l'enveloppe temporelle de la parole et montée d'amplitude au niveau de la syllabe. (a) Exemple des variations de l'enveloppe temporelle (représentée en rouge) dans une courte phrase. (b) Exemple de la montée de l'amplitude (rise time) pour la syllabe « my ». L'enveloppe temporelle est représentée en rouge et la montée de l'amplitude en bleu. (Leong & Goswami, 2014).

L'hypothèse d'un déficit rythmique à l'origine de trouble phonologique est soutenue par des études qui révèlent que, chez les élèves dyslexiques, les habiletés phonologiques sont corrélées à la capacité à se synchroniser à un métronome (Flaugnacco et al., 2014) et à la perception de rythme réguliers (Flaugnacco et al., 2014; Huss et al., 2011). Par ailleurs, des études interventionnelles menées chez les élèves dyslexiques (Flaugnacco et al., 2015; Habib et al., 2016; Overy, 2000) et faibles lecteurs (Cogo-Moreira et al., 2013) rapportent un bénéfice des interventions musicales et rythmiques sur les habiletés phonologiques. Des bénéfices sont également retrouvés sur la lecture et l'orthographe, ce qui suggère que l'amélioration de la conscience phonologique découlant de l'entraînement musical se généralise au langage écrit (Flaugnacco et al., 2015; Habib et al., 2016; Overy, 2000). Quelques études se sont intéressées spécifiquement aux bénéfices d'un entraînement rythmique chez des élèves dyslexiques. Dans une première étude, deux types d'intervention ont été proposés à des élèves dyslexiques (Bhide et al., 2013) : le premier groupe a bénéficié d'une intervention ciblant directement la phonologie tandis que le second groupe s'est vu proposer différents exercices ciblant le rythme (e.g. reproduction et discrimination de rythmes et tempi). Une amélioration des habiletés phonologiques et du langage écrit (lecture et orthographe) a été retrouvée à l'issu des deux entraînements. De plus, l'amélioration des habiletés rythmiques au sein du groupe « Rythme » était corrélée à l'amélioration du niveau de lecture (Bhide et al., 2013). Dans une seconde étude, un protocole similaire a été proposé mais un groupe contrôle passif a également été ajouté au protocole (Thomson et al., 2013). Seuls les élèves des groupes « Phonologie » et « Rythme » ont amélioré significativement les habiletés phonologiques. Ces deux études rapportent donc un bénéfice des entraînements rythmiques sur la phonologie et le langage écrit chez les élèves dyslexiques. Cependant, soulignons que ces entraînements rythmiques intègrent des exercices entraînant le

rythme langagier (e.g. taper dans ces mains pour segmenter une phrase en syllabe). L'efficacité d'entraînements ciblant spécifiquement le rythme non-langagier doivent encore être démontrée.

4.3. HABILETES RYTHMIQUE ET FONCTIONS EXECUTIVES DANS LES TROUBLES DU LANGAGE ECRIT

En accord avec les résultats retrouvés dans le développement typique, l'ensemble de ces travaux suggère que le développement des habiletés phonologiques explique la relation entre les troubles du langage écrit et du traitement rythmique. Plus spécifiquement, il a été proposé que les troubles du traitement rythmique soient à l'origine du déficit phonologique retrouvé dans la dyslexie. Cependant, l'étude du développement typique permet également de proposer une seconde hypothèse explicative : celle d'une médiation au travers des fonctions exécutives. Actuellement, cette question n'a pas été explorée dans les troubles du langage écrit. Certains travaux révèlent que les troubles du traitement temporel et rythmique dans les troubles du langage écrit ne sont pas dus à la présence d'un TDAH associé – et ne sont donc pas la conséquence d'une altération des fonctions exécutives propres à ce trouble (Gooch et al., 2011; Tiffin-Richards et al., 2004). Cependant, l'attention semble corrélée aux performances obtenues sur certaines tâches temporelles dans la dyslexie (Gooch et al., 2011). Notons par ailleurs que Goswami (2011) propose que certains troubles fréquemment retrouvés dans la dyslexie – comme le difficultés à déplacer rapidement son attention – puisse-t-être expliqués par son modèle théorique, le TSF : le défaut de synchronisation des oscillations cérébrales à un stimulus rythmique externe retrouvé dans la dyslexie impactant l'orientation de l'attention.

L'ensemble de ces travaux suggère donc que les difficultés rythmiques sont à l'origine des symptômes retrouvés dans la dyslexie – qu'il s'agisse d'un déficit phonologique ou de difficultés attentionnelles ou de flexibilité parfois retrouvées dans ce trouble (Goswami, 2011). Contrairement aux difficultés motrices – que nous avions présentées dans une partie précédente et qui pourrait majorer le trouble de l'apprentissage du langage écrit – le déficit du traitement rythmique a été proposé ici comme étant à l'origine des troubles du langage. Toutefois, la majorité de ces études a été réalisée à l'échelle du groupe et peu d'études ont étudié les liens entre troubles phonologiques et troubles rythmiques au sein même de groupes d'élèves dyslexiques (Flaugnacco et al., 2014). Il est nécessaire de confirmer que tous les élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit – et d'un trouble phonologique – présentent une altération du traitement rythmique, et, si ce n'est pas le cas, d'étudier plus précisément les conséquences de l'association de difficultés rythmiques associés à ces troubles.

5. CONCLUSION

Actuellement, de nombreux travaux tendent à montrer que les habiletés rythmiques sont un prédicteur de l'apprentissage du langage écrit à la fois dans les troubles du langage écrit – comme la dyslexie (Goswami, 2011; Huss et al., 2011; Wolff, 2002) et dans le développement typique (David et al., 2007; González-Trujillo et al., 2014; Ozernov-Palchik et al., 2018). Cet effet du rythme pourrait être médiatisé par les compétences phonologiques dans le cadre du développement atypique ou chez des élèves en début d'apprentissage de la lecture et de l'écriture (i.e. en maternelle ou CP) mais cette médiation doit être confirmée chez des élèves plus âgés. De plus, d'autres mécanismes pourraient également être envisagés comme une médiation par les fonctions exécutives (Tierney & Kraus, 2013). En effet, la médiation via la phonologie serait seulement partielle dans le développement typique (Ozernov-Palchik et al., 2018) ce qui souligne la nécessité d'envisager plusieurs mécanismes distincts pour expliquer la relation entre rythme et l'apprentissage du langage écrit.

CHAPITRE 4 : ENTRAINER LA MOTRICITE FINE ET LES HABILETES RYTHMIQUES – APPORT DE L'UTILISATION D'UN JEU VIDEO

Au cours des parties précédentes, deux habiletés non-langagières qui semblent jouer un rôle dans cet apprentissage ont été décrites : les habiletés motrices et les habiletés rythmiques. L'ensemble des travaux présentés précédemment suggère une efficacité d'interventions ciblant ces habiletés non-langagières pour améliorer l'apprentissage du langage écrit, ce qui pourrait ouvrir de nouvelles pistes de remédiation pour les élèves présentant des difficultés de lecture et d'écriture. Dans cette partie, nous allons nous intéresser à l'utilisation d'outils numériques – les jeux vidéo – qui pourraient servir de support pour entraîner ces deux habiletés non-langagières.

Actuellement, un nombre grandissant d'études s'intéresse à l'efficacité de l'utilisation de jeux sérieux pour améliorer différents apprentissages (pour une revue : Riopel et al., 2019; Wouters et al., 2013) et certains ont été développés pour soutenir l'apprentissage du langage écrit – en proposant par exemple des entraînements à la phonologie (e.g. Richardson & Lyytinen, 2014). Outre ces jeux sérieux, certains travaux suggèrent que la pratique de certains jeux vidéo ludiques, et donc conçus sans intention pédagogique, (comme les jeux vidéo d'action) peuvent impacter positivement le développement cognitif et l'apprentissage de la lecture (pour une méta-analyse : Bediou et al., 2018). Par exemple, des interventions basées sur la pratique de jeux vidéo d'action améliore les capacités d'attention et la vitesse de lecture chez les élèves dyslexiques (Franceschini et al., 2017). L'ensemble de ces travaux suggère donc que les jeux vidéo, qu'ils soient ou non conçus à des fins pédagogiques, peuvent être des outils pédagogiques et/ou de remédiation utiles pour soutenir l'apprentissage du langage écrit chez les élèves avec ou sans troubles. Or, bien que les habiletés motrices et rythmiques semblent jouer un rôle dans l'apprentissage de la lecture et de l'écriture, comme nous l'avons présenté dans les parties précédentes, très peu d'études se sont intéressées à l'efficacité des jeux vidéo pour améliorer ces habiletés non-langagières. Dans cette partie, nous questionnerons la pertinence de l'utilisation des jeux vidéo sérieux, mais également des jeux vidéo ludiques, comme support d'entraînement de ces deux habiletés.

1. DES JEUX VIDEO POUR ENTRAINER LES HABILETES MOTRICES

Actuellement, les bénéfices des jeux vidéo sur la motricité globale ont fait l'objet de nombreuses études – notamment au travers de l'évaluation des bénéfices des exergames – des jeux vidéo proposant des exercices physiques impliquant l'ensemble du corps en détectant les mouvements du joueur (e.g. Nintendo Wii, Kinect). Cependant, les effets des jeux vidéo sur la motricité fine sont beaucoup moins documentés. Dans cette partie, nous exposerons les travaux

s'étant intéressé aux bénéfices des jeux vidéo – sérieux et ludiques – sur la motricité globale et sur la motricité fine en soulignant les limites des études actuelles.

1.1. BENEFICES DES JEUX VIDEO SUR LA MOTRICITE GLOBALE

Un nombre grandissant d'études rapporte les bénéfices des exergames pour remédier aux difficultés motrices chez les personnes souffrants de troubles moteurs (pour une revue : Wilson et al., 2016) ou chez les patients âgés (pour une revue : Chao et al., 2015). Chez l'enfant, ce type d'entraînement a également été testé afin d'améliorer la motricité globale aussi bien chez les élèves tout venants (Barnett et al., 2015; Vernadakis et al., 2015) que chez les élèves présentant un trouble de la motricité comme le TDC (Wilson et al., 2016; Bonney et al., 2017; Mentiplay et al., 2019). Néanmoins, les résultats sont divergents. Ainsi, chez les élèves tout venants de CE1, certains auteurs retrouvent un bénéfice d'une intervention via les exergames, similaire à un entraînement sportif classique, et supérieur à une absence d'entraînement sur la motricité globale (Vernadakis et al., 2015) alors que d'autres ne retrouvent pas ce type de bénéfices sur la motricité globale chez des enfants de 4 à 8 ans (Barnett et al., 2015). De façon similaire, les résultats chez les enfants présentant des troubles moteurs, comme le TDC, peuvent varier. Par exemple, l'étude de Mombarg et al. (2013) montre que des enfants avec un TDC améliorent leur équilibre statique et dynamique suite à un entraînement de 6 semaines basé sur la pratique d'un exergame, comparativement à des élèves n'en ayant pas bénéficié. Inversement, l'étude de Straker et al. (2015) indique que la pratique d'exergames n'améliore pas significativement les habiletés motrices des enfants avec un TDC. Dans une revue de littérature, Mentiplay et al. (2019) indiquent que, la majorité des études rapporte un bénéfice de ce type d'intervention sur la motricité globale des enfants avec un trouble moteur, mais soulignent également la faible qualité des études (peu de participants, peu d'étude randomisées et contrôlées) et indiquent la nécessité de poursuivre les études sur ces questions.

1.2. BENEFICES DE JEUX VIDEO SUR LA MOTRICITE FINE

1.2.1. Comparaison des joueurs et des non-joueurs.

La comparaison du fonctionnement cognitif entre les personnes jouant ou non aux jeux vidéo d'action a montré que les joueurs présentaient de meilleures habiletés spatiales et attentionnelles (Bediou et al., 2018). Pourtant, alors que les jeux vidéo sollicitent également le contrôle moteur peu d'études se sont intéressées aux potentiels bénéfices de jeux vidéo sur la motricité (Gozli et al., 2014). Toutefois, les résultats actuels tendent à montrer que les joueurs ont de meilleures performances motrices. Par exemple, une étude de Griffith et al. (1983) a montré de meilleures performances des joueurs sur une tâche de coordination occulo-manuelle. Une autre étude a utilisé la tâche de Fitt – qui nécessite de réaliser un mouvement entre deux cibles le plus

vite possible. Les résultats montrent que les joueurs sont plus rapide, y compris quand la distance entre les cibles augmente ou quand la taille des cibles diminue – ce qui témoigne à la fois d'un meilleur contrôle moteur et d'une meilleure planification du mouvement (Rupp et al., 2019). Cette amélioration des compétences motrices chez les joueurs semble associée une plus grande excitabilité du cortex moteur primaire (Morin-Moncet et al., 2016). Soulignons toutefois que les bénéfices de la pratique d'un jeu vidéo sur la motricité n'ont pas toujours été retrouvée : par exemple, Gozli et al. (2014) ont montré en utilisant une tâche de poursuite de cible que les joueurs apprenaient plus vite à suivre la cible quand elle été prédictible (apprentissage moteur), mais que leurs performances étaient similaires aux non joueurs quand le déplacement de la cible était aléatoire (contrôle moteur).

1.2.2. Etudes interventionnelles

Alors que la comparaison des joueurs et des non-joueurs laisse supposer un bénéfice de la pratique de jeux vidéo d'action sur le contrôle moteur et la motricité fine, à notre connaissance, aucune étude interventionnelle n'a été menée pour confirmer cette hypothèse. Par contre, de plus en plus de travaux cherchent à montrer l'efficacité de certains jeux vidéo sérieux ou applications spécifiquement développées pour améliorer les habiletés motrices. Par exemple, dans une étude de Kazimoglu et Bacon (2020), un jeu vidéo spécialement conçu pour améliorer les compétences motrices (cliquer sur les plateformes) a été proposé à des élèves de 16 à 19 ans. Les résultats montrent que le groupe ayant bénéficié du jeu s'améliore plus que le groupe contrôle passif sur une tâche de motricité écologique nécessitant de reproduire une figure en lego (Kazimoglu & Bacon, 2020). D'autres études interventionnelles ont été proposées en utilisant cette fois ci non pas un jeu vidéo mais des applications sur tablettes non ludiques – elles aussi conçues spécifiquement pour entraîner la motricité fine. Par exemple, l'application Dexteria propose des exercices ciblant les compétences motrices – comme toucher une cible le plus vite possible ou pincer un item avec la pince pouce-index. Les premiers résultats des études interventionnelles suggèrent un bénéfice de l'application sur la motricité fine (exercice de déplacement de cheville) et sur l'intégration visuo-motrice menées chez des élèves de CP (Axford et al., 2018). Une autre étude de Poon et al. (2010) utilisant une application ciblant les compétences visuo-perceptives et visuo-motrices (tracer avec le doigt) rapporte une amélioration de ces compétences chez des élèves de maternelle. Enfin, certaines interventions utilisant des applications conçues pour entraîner l'écriture manuscrite (Butler et al., 2019) ou l'écriture tapuscrite (McGlashan et al., 2017) améliore la motricité fine évaluée avec la batterie du M-ABC (tracé de la fleur et dextérité unimanuelle) chez des élèves de maternelle (Butler et al., 2019) et de CM1 (McGlashan et al., 2017). Notons toutefois que l'ensemble de ces études présente des limites méthodologiques : les échantillons sont de petite taille (généralement autour de 10 participants par groupe) et les

études n'intègrent pas de groupe contrôle actif (Axford et al., 2018; McGlashan et al., 2017; Short et al., 2018). D'autres études doivent être menées afin de confirmer que les applications sur tablettes peuvent améliorer les compétences motrices.

2. DES JEUX VIDEO POUR ENTRAINER LES HABILETES RYTHMIQUES

Bien que les bénéfices d'entraînements musicaux et rythmiques sur le traitement rythmique, la cognition et l'apprentissage de l'écrit aient déjà été évalués (pour une revue : Gordon, Fehd, et al., 2015), l'utilisation d'outils numériques comme les jeux vidéo ou les applications d'entraînement visant à améliorer les habiletés rythmiques reste encore peu développée. Quelques études ont toutefois cherché à déterminer les bénéfices d'un entraînement basé sur un jeu vidéo pour améliorer les habiletés rythmiques. Par exemple, un étude a testé les effets de la pratique d'un jeu musical (Rock Band) sur les compétences de batteur chez des participants novices (i.e. n'ayant peu ou pas pratiqué de la batterie) (Sakkal & Martin, 2019). Les résultats suggèrent un effet de transfert de l'entraînement : suite à la pratique du jeu, les participants tendent à améliorer les performances sur différentes tâches de transfert, comme jouer une musique sur un autre jeu de rythme ou sur une vraie batterie. Néanmoins, l'étude n'évalue pas précisément l'évolution des habiletés rythmiques et des mesures plus fines seront nécessaires pour confirmer les bénéfices de ce type de jeux sur le traitement rythmique.

Globalement, les jeux vidéo musicaux actuellement sur le marché semblent présenter de sévères limites pour entraîner et améliorer les habiletés rythmiques (Bégel et al., 2017). En effet, les activités proposées nécessitent généralement de réagir face à un stimulus (e.g. cliquer quand une note apparaît à l'écran) mais pas de mémoriser et se synchroniser à une structure rythmique (Bégel et al., 2017). De plus, les jeux actuels ne permettent pas d'enregistrer la réponse du joueur de façon suffisamment précise pour isoler les caractéristiques rythmiques de la performance (variabilité de la performance, précision de la synchronisation) (Bégel et al., 2017). Enfin, la progression de la difficulté proposée dans ce type de jeu ne se base généralement pas sur la complexité de la structure rythmique à traiter mais plutôt sur le nombre de stimuli présentés. La plupart des jeux vidéo musicaux ne semblent donc pas pertinents pour proposer un entraînement rythmique (Bégel et al., 2017).

Dans ce contexte, certains travaux ont été menés pour développer spécifiquement des jeux vidéo pour entraîner les habiletés rythmiques et valider leur efficacité (Alexandrovsky et al., 2016; Bégel et al., 2018; Dauvergne et al., 2018). Par exemple, une étude menée chez des jeunes adultes a testé l'efficacité d'un entraînement rythmique proposé au travers d'un jeu sur tablette (Bégel et al., 2018). Les résultats indiquent que seul le groupe ayant bénéficié du jeu a amélioré sa perception rythmique. Aucun effet significatif n'est retrouvé pour la production de rythme. Par

ailleurs, une étude pilote menée chez des patients présentant une maladie de Parkinson rapporte également une amélioration des habiletés rythmiques suite à l'utilisation du même jeu (Dauvergne et al., 2018). Soulignons que les deux études présentées intègrent très peu de participants – parfois sans groupe contrôle (Dauvergne et al., 2018) – et il est nécessaire de confirmer ces résultats en testant les bénéfices de ce type d'intervention dans de plus grandes cohortes. De plus, toutes les études présentées ont été réalisées chez l'adulte – avec ou sans pathologie associée – et les bénéfices de jeux vidéo sur les habiletés rythmiques doivent être généralisé chez l'enfant.

3. CONCLUSION

Bien que les jeux vidéo – ludiques ou sérieux – soient de plus en plus utilisés pour soutenir les apprentissages, très peu de travaux ont étudié leurs effets sur la motricité fine et les habiletés rythmiques. Or, les résultats présentés dans les chapitres précédents suggèrent une influence de ces habiletés sur l'apprentissage du langage écrit : un jeu vidéo ciblant les habiletés motrices et rythmiques pourrait en conséquence impacter positivement cet apprentissage. Actuellement, seules quelques études interventionnelles suggèrent que les jeux vidéo peuvent être un outil efficace pour entraîner ces habiletés non-langagières (Axford et al., 2018; Bégel et al., 2018). Cependant l'ensemble de ces études souffre de limites méthodologiques importantes (e.g. petit échantillon, absence de groupe contrôle) qui obligent à interpréter les résultats avec précaution. De plus, peu d'études ont été menées chez les enfants sans troubles associés et il est nécessaire de prouver que l'utilisation de ces outils numériques peut être bénéfique pour le développement moteur et rythmique dans cette population. Enfin, compte tenu du peu d'études ayant prouvé l'efficacité de l'utilisation de jeux vidéo pour entraîner les habiletés rythmiques, les bénéfices de ce type d'outil sur l'apprentissage du langage écrit n'ont pas encore été évalués.

CHAPITRE 5 : PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS DE LA THESE

L'apprentissage de la lecture et de l'écriture est l'une des clés de la réussite scolaire. Aussi, une meilleure compréhension des mécanismes qui sous-tendent ces apprentissages et des facteurs qui permettent d'identifier les enfants en difficulté constitue un enjeu crucial. Un grand nombre de recherches s'est intéressé à l'implication de facteurs langagiers dans cet apprentissage. Parmi ceux-ci, les habiletés phonologiques (conscience phonologique, dénomination rapide, mémoire de travail phonologique) jouent un rôle central. Elles influencent à la fois les traitements de bas niveau comme le décodage et la construction des représentations orthographiques, et les traitements de haut niveau, comme la compréhension de la lecture et la rédaction. Pourtant, au-delà de ces facteurs, des études récentes suggèrent que d'autres facteurs non-langagiers, tels que les habiletés motrices ou les habiletés rythmiques peuvent également jouer un rôle dans l'apprentissage du langage écrit. Plusieurs études rapportent que ces habiletés prédisent l'émergence du langage écrit (Cameron et al., 2016; Ozernov-Palchik et al., 2018) et qu'elles sont fréquemment altérées dans les troubles de l'apprentissage du langage écrit (Goswami, 2011; Jover et al., 2013). Cependant, plusieurs questions restent à clarifier pour mieux comprendre le rôle de ces facteurs non langagiers dans l'apprentissage du langage écrit.

Tout d'abord, la motricité fine et les habiletés rythmiques sont actuellement mesurées de façon très hétérogènes d'une étude à l'autre. Par exemple, certaines études intègrent des mesures de copie de lettres dans l'évaluation la motricité fine (e.g. Greenburg et al., 2020), alors que, dans ce type de tâche, la composante langagière n'est pas dissociée de la composante motrice. Il est donc nécessaire d'identifier plus précisément quelles sont les habiletés motrices et rythmiques en lien avec l'apprentissage du langage écrit.

Par ailleurs, les mécanismes qui sous-tendent les relations entre ces habiletés non-langagières et l'apprentissage du langage écrit doivent être identifiés. Actuellement, plusieurs hypothèses ont été formulées :

- Le lien entre les habiletés motrices et l'apprentissage du langage écrit serait expliqués par (1) une médiation par l'automatisation de l'écriture manuscrite et/ou (2) une médiation par les fonctions exécutives.
- Le lien entre les habiletés rythmiques et l'apprentissage du langage écrit serait quant à lui sous-tendu par (1) une médiation par la conscience phonologique et/ou (2) une médiation par l'attention et les fonctions exécutives.

Ces hypothèses de médiation ont été principalement testées chez des élèves de maternelle mais pas chez des élèves plus âgés (e.g. Oberer et al., 2018; Ozernov-Palchik et al., 2018). De plus, elles ont toujours été formulées indépendamment mais jamais réunies et confrontées dans un même modèle alors qu'il s'agit théoriquement de mécanismes distincts. Il semble donc nécessaire de considérer simultanément ces différentes hypothèses de médiation. Par ailleurs, les liens entre les prédicteurs non langagiers et l'apprentissage de la lecture et de l'écriture, ainsi que les facteurs explicatifs de cette relation pourraient dépendre des dimensions du langage écrit évaluées. Par exemple, les fonctions exécutives ont principalement été mises en lien avec les compétences de haut niveau comme la compréhension écrite ou la rédaction mais d'autres médiateurs pourraient expliquer l'effet de la motricité/des habiletés rythmiques sur les compétences de bas niveau. L'ensemble de ces éléments soulève la nécessité d'intégrer à la fois différentes mesures de la lecture et de l'écriture dans les études pour mieux comprendre les relations entre les habiletés non-langagières et l'apprentissage du langage écrit.

Outre l'existence d'un lien entre ces habiletés non-langagières et l'apprentissage du langage écrit dans le développement typique, il est important de s'intéresser aux conséquences de leur altération chez les élèves présentant des difficultés de lecture et d'écriture. En effet, il a déjà été proposé que des difficultés sensorimotrices (Nicolson & Fawcett, 1994) ou rythmiques (Goswami, 2011) soient associées voire à l'origine des troubles du langage écrit. D'autres auteurs proposent au contraire que ces difficultés ne se retrouvent que chez certains élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit – mais que la présence de difficultés motrices et/ou rythmiques associées majorent le trouble de la lecture et de l'écriture (Di Brina et al., 2018). Des études s'intéressant aux relations entre ces deux habiletés non-langagières et les troubles du langage écrit doivent donc être menées pour clarifier ces questions.

Pour finir, l'influence de ces habiletés non-langagières sur le langage écrit doit être démontrée. Actuellement, seules des études utilisant des approches corrélationnelles ont été utilisées alors qu'elles ne permettent pas de conclure à l'existence d'un lien de causalité entre la motricité ou le rythme et l'apprentissage de la lecture ou l'écriture. Des études interventionnelles sont nécessaires pour confirmer les relations causales proposées dans les modèles explicatifs. En outre, ces études interventionnelles permettront de proposer et valider de nouvelles pistes de remédiation pour les élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit.

La thèse a donc pour objectif général d'examiner les liens entre l'apprentissage du langage écrit et deux prédicteurs non langagiers – la motricité fine et le rythme. Plus précisément, elle s'organise autour des quatre objectifs suivants :

1) **Préciser le lien entre ces prédicteurs non langagiers et l'apprentissage du langage écrit chez des élèves au développement typique** de CE2 et CM1[4] en distinguant différentes habiletés motrices (e.g. motricité fine vs graphomotricité), rythmiques (e.g. perception vs production rythmique) et dimensions du langage écrit (lecture et orthographe de mots, compréhension et rédaction)
2) **Tester et confronter les différentes hypothèses explicatives** de ces relations en utilisant (1) une méthode de modélisation par équations structurales, qui permettent d'intégrer de nombreux prédicteurs dans un même modèle, et (2) des études interventionnelles, qui permettent de confirmer les liens de causalité prédits par les modèles.
3) Examiner les conséquences de difficultés motrices et/ou rythmiques **dans une population d'élève présentant des troubles de l'apprentissage du langage écrit** afin de mieux comprendre les interactions entre ces difficultés.
4) **Tester l'efficacité d'une application ciblant les habiletés non-langagières sur l'apprentissage du langage écrit** afin de proposer de nouveaux outils pédagogiques pour les élèves de 8-9ans avec ou sans trouble de l'apprentissage du langage écrit.

Enfin, les relations entre les deux prédicteurs (i.e. motricité fine et habiletés rythmiques) et leur influence conjointe sur l'apprentissage du langage écrit seront évaluées à la fois chez les élèves avec et sans troubles des apprentissages.

Dans un premier temps, l'effet indépendant de ces deux prédicteurs non-langagiers sur l'apprentissage du langage écrit dans le développement typique a été testé au travers de différentes études corrélationnelles[5] présentées dans les chapitre 5 (liens entre la motricité fine et l'apprentissage du langage écrit) et dans le chapitre 6 (liens entre les habiletés rythmiques et l'apprentissage du langage écrit). Dans le chapitre 7, l'influence conjointe de ces deux prédicteurs la motricité et des habiletés rythmiques sur le langage écrit a été évaluée. Le chapitre 8 s'intéresse plus spécifiquement aux habiletés motrices et rythmiques dans les troubles de l'apprentissage de la lecture et de l'écriture. Enfin, une étude interventionnelle visant à valider l'efficacité d'un outil ciblant les habiletés non-langagière sera présentée dans le chapitre 9.

[4] Soulignons que plusieurs choix méthodologiques ont été fait suite à des contraintes liées aux projet auquel est rattaché la thèse. Par exemple, les changements dans les niveaux (du CE2 au CM2) d'une étude à l'autre n'ont pas été seulement guidés par des hypothèses théoriques spécifiques à chacun de ces niveaux mais par le projet qui devait inclure des interventions dans des classes du CE2 au CM2. De la même façon, les interventions basées sur l'outil développé dans le cadre du projet dépendaient des avancées des différents partenaires.

[5] Soulignons que les études basées sur une méthode de modélisation par équations structurales sont considérées comme des approches corrélationnelles (Gana & Broc, 2018)

PARTIE EXPERIMENTALE

CHAPITRE 6 : RELATIONS ENTRE LES HABILETES MOTRICES ET L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT DANS LE DEVELOPPEMENT TYPIQUE

Plusieurs études rapportent que les habiletés motrices précoces sont des prédicteurs du niveau ultérieur du langage écrit (Cameron et al., 2012; Doyen et al., 2017). Afin d'expliquer cette relation, deux hypothèses explicatives ont été proposées. La première est celle d'une médiation par les fonctions exécutives – qui sont reliées à la fois aux habiletés motrices et à l'apprentissage du langage écrit (Cameron et al., 2016; Oberer et al., 2018; Schmidt et al., 2017). Une seconde hypothèse postule que les habiletés motrices influencent l'apprentissage du langage écrit de mots par le biais de l'écriture manuscrite (Suggate et al., 2016) : la capacité à manipuler un stylo (i.e. habiletés graphomotrices) faciliteraient l'automatisation du geste d'écriture ce qui permettrait d'allouer plus de ressources cognitives au traitement du langage (orthographe et rédaction) lors de l'écriture (Suggate et al., 2016). Ceci favoriserait en retour l'apprentissage de la lecture de mots par la pratique de l'orthographe (ShaharYames & Share, 2008; Suggate et al., 2016). Cette dernière hypothèse est soutenue par plusieurs résultats qui montrent que l'effet prédictif des habiletés motrice sur l'apprentissage du langage écrit semble dépendre du type de mesure de motricité utilisé. Les habiletés graphomotrices qui nécessitent l'utilisation d'un stylo – et seraient donc plus impliquées dans l'écriture manuscrite – semblent être de meilleurs prédicteurs du langage écrit que la dextérité manuelle (i.e. motricité fine non graphomotrice) (Carlson et al., 2013; Dinehart & Manfra, 2013; Greenburg et al., 2020; Suggate et al., 2016).

L'objectif de ce premier chapitre est d'étudier la relation entre les habiletés motrices et l'apprentissage du langage écrit chez des élèves de fin de cycle 2 et cycle 3 (du CE2 au CM2) afin de mieux comprendre les mécanismes qui sous-tendent cette relation et de préciser quelles sont les habiletés motrices en lien avec l'apprentissage du langage écrit dans cette tranche d'âge. Dans une première étude, nous testerons deux hypothèses explicatives du lien entre habiletés motrices et l'apprentissage du langage écrit chez des élèves de CE2 : et celle d'une médiation par les fonctions exécutives et celle d'une médiation par l'écriture manuscrite. Puis, dans une seconde étude longitudinale, nous chercherons à identifier les compétences de motricité fine qui prédisent le niveau ultérieur de lecture et d'écriture chez des élèves de CM1. Deux types d'habiletés motrices seront distinguées (la dextérité manuelle et les habiletés graphomotrices) et seront mises en lien avec des mesures de l'automatisation de l'écriture manuscrite et du langage écrit.

ETUDE 1.1. MECANISMES SOUS-TENDANT LES LIENS ENTRE LA MOTRICITE FINE ET LE DEVELOPPEMENT DU LANGAGE ECRIT CHEZ LES ELEVES DE CE2.

1. INTRODUCTION

Plusieurs études ont montré un lien entre les habiletés motrices et l'apprentissage du langage écrit chez les élèves de la maternelle au CP (Cameron et al., 2012; Doyen et al., 2017; Suggate et al., 2018). Deux hypothèses ont été proposées pour expliquer cette relation (Cameron et al., 2016; Suggate et al., 2018). La première est celle d'une médiation par l'écriture manuscrite : selon la proposition de Suggate et al. (2018 ; 2019), de meilleures compétences motrices faciliteraient le développement des compétences graphomotrices puis de l'écriture manuscrite ce qui améliorerait en retour l'apprentissage de l'orthographe puis de la lecture. Cette hypothèse est soutenue par plusieurs travaux rapportant d'une part des liens entre les compétences motrices et l'écriture manuscrite (Kaiser et al., 2009; Volman et al., 2006; Weintraub & Graham, 2000) et d'autre part entre l'écriture manuscrite et l'identification de mots, l'orthographe et la rédaction de texte (Berninger & Fuller, 1992; Pontart et al., 2013). Un second mécanisme explicatif proposé est celui d'une médiation par les fonctions exécutives (Cameron et al., 2016; Oberer et al., 2018; Schmidt et al., 2017). En effet, ces dernières sont corrélées à la fois aux habiletés motrices (MacDonald et al., 2016) et au niveau de lecture et d'écriture chez de la maternelle au collège (Altemeier et al., 2008; Butterfuss & Kendeou, 2018; Cordeiro et al., 2020). Plusieurs études utilisant une méthode de modélisation par équations structurales ont également montré que l'effet de la motricité sur la réussite scolaire était sous-tendu par les fonctions exécutives (Oberer et al., 2018; Schmidt et al., 2017). Bien que d'un point de vue théorique, ces différentes hypothèses proposent des mécanismes distincts pour expliquer le lien entre motricité et langage écrit, elles n'ont pour l'instant été testées que de façon indépendante. Or, il est indispensable de les confronter dans un même modèle explicatif afin de confirmer leur complémentarité. De plus, les liens entre les deux médiateurs potentiels et le langage écrit semble dépendre des dimensions du langage écrit étudiées. Par exemple, l'automatisation de l'écriture a principalement été mise en lien avec l'orthographe et la rédaction de texte (Berninger & Fuller, 1992; Connelly et al., 2012; Pontart et al., 2013) mais plus rarement avec la lecture. Quelques études ont toutefois montré un effet de l'écriture sur le niveau ultérieur d'identification de mots (Dinehart & Manfra, 2013; Greenburg et al., 2020). De la même façon, si de nombreux travaux rapportent une implication des différentes fonctions exécutives (inhibition, flexibilité, mémoire de travail et planification) dans les compétences de haut niveau comme la compréhension de textes écrits (Butterfuss & Kendeou, 2018; Cordeiro et al., 2020), peu d'études rapportent un lien entre les compétences de bas niveau

et les fonctions exécutives, hormis la mémoire de travail phonologique (Peng et al., 2018). En conséquence, l'étude des relations entre les habiletés motrices et l'apprentissage du langage écrit doit à la fois intégrer ces deux médiateurs potentiels et considérer leurs effets sur les différentes dimensions du langage écrit.

Dans cette étude nous chercherons à mettre à l'épreuve les deux hypothèses avancées dans la littérature en modélisant les relations entre le langage écrit, les habiletés motrices, les fonctions exécutives et l'écriture manuscrite chez des élèves de CE2. Le premier objectif est de confirmer que les deux hypothèses proposées expliquent de façon indépendante le lien entre motricité et langage écrit. Pour cela, une méthode de comparaison de modèles sera utilisée. Notre hypothèse est que le modèle proposant deux médiations – via les fonctions exécutives et via l'écriture manuscrite – s'adapte mieux aux données. Le second objectif est d'explorer les effets directs et indirects de la motricité sur différentes dimensions du langage écrit en dissociant la lecture de mots, l'orthographe de mots, la compréhension écrite et la rédaction. En effet, les mécanismes expliquant le lien entre motricité et langage écrit pourraient dépendre de la dimension du langage écrit mesurée : une médiation par l'écriture manuscrite pourrait expliquer le lien entre les habiletés motrices et l'écriture (orthographe et rédaction de texte) et la lecture de mots (Berninger & Fuller, 1992; Pontart et al., 2013; Santangelo & Graham, 2016; Suggate et al., 2018) alors qu'une médiation par les fonctions exécutives pourrait expliquer le lien entre habiletés motrices et compétences de langage écrit de haut niveau (compréhension et rédaction de textes) (Butterfuss & Kendeou, 2018; Cordeiro et al., 2020). Les hypothèses formulées sont reportées dans la figure ci-dessous (Figure 3).

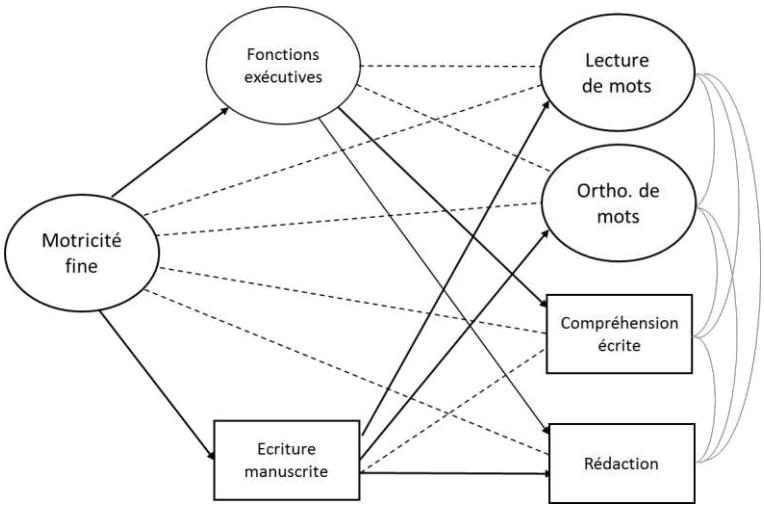

Figure 3 : Relations attendues entre les habiletés motrices, les deux médiateurs potentiels (fonctions exécutives et écriture manuscrite) et le langage écrit. Les traits pleins indiquent les relations attendues d'après les hypothèses formulées. Les traits en pointillé indiquent les autres relations testées dans les différents modèles de médiation.

2. METHODE

Cette étude s'intéresse spécifiquement aux liens entre motricité fine et apprentissage du langage écrit ainsi qu'aux mécanismes qui sous-tendent cette relation. Cependant, elle s'inscrit dans un projet de plus grande ampleur au cours duquel des tests étalonnés évaluant la motricité, le langage écrit, l'écriture manuscrite, les habiletés phonologiques, le rythme, les fonctions exécutives et le quotient intellectuel non verbal ont été administrés à des élèves avec ou sans troubles des apprentissages. Dans la partie méthode, seuls les tests utilisés spécifiquement pour cette étude seront détaillés. L'ensemble de la procédure ainsi que la liste des tests utilisés dans chaque étude peuvent être retrouvés en annexe (voir Annexe 1, p.249).

2.1. PARTICIPANTS

Les participants de cette étude étaient des élèves de CE2 recrutés dans 25 classes réparties dans 16 écoles élémentaires de la région Nouvelle Aquitaine. Tous les élèves disposant d'une autorisation parentale ont réalisé l'ensemble du protocole (N = 278 ; âge moyen = 8 ans et 5 mois ; écart-type = 4 mois ; 154 filles). Les performances des enfants présentant un retard intellectuel ou des difficultés d'apprentissage du langage écrit ont été retirées avant les analyses statistiques. Ainsi, quatre enfants ont été exclus à cause d'un quotient intellectuel faible (QI non verbal < 70). Trente-cinq enfants ont également été exclus car ils présentaient des difficultés d'apprentissage du langage écrit (scores de lecture et d'orthographe de mots <.1,5 e.t.). Au final, les analyses ont été effectuées sur un total de 239 enfants (âge moyen : 8 ans et 6 mois ; écart-type = 4 mois ; 137 filles).

2.2. MATERIEL

2.2.1. Langage écrit

Lecture de mots. La tâche de la Batterie Analytique du Langage Ecrit (BALE ; Jacquier-Roux et al., 2010) a été utilisée pour évaluer la lecture de mots. Au cours de cet exercice, les enfants devaient lire le plus rapidement et le plus précisément possible trois listes de mots comprenant respectivement des mots réguliers, des mots irréguliers ou des pseudo-mots. Pour chacune des listes, un score sur 20 et un temps en seconde ont été reportés. Cependant, seuls les scores ont été utilisés comme variables observées dans le modèle.

Orthographe de mots. Comme pour la lecture de mot, l'orthographe a été évaluée avec une tâche issue de la BALE (Jacquier-Roux et al., 2010). Trois listes comprenant respectivement des mots réguliers, irréguliers et des pseudo-mots étaient dictées aux élèves. Un score sur 10 correspondant au nombre de mots correctement orthographiés a été calculé pour chacune des listes et utilisé comme variable observée.

Compréhension écrite : La compréhension écrite a été évaluée avec une tâche développée par Potocki et al. (2014) dans laquelle les élèves devaient lire attentivement un texte sans temps imparti puis répondre à 12 questions littérales et inférentielles. Les questions ont été présentées sous forme de questionnaire à choix multiple où il fallait choisir la bonne réponse parmi trois réponses possibles. Les élèves ne disposaient pas du texte pour répondre aux questions. Le score total sur 12 a été utilisé comme variable dépendante.

Rédaction. Une tâche de rédaction adaptée de la WOLD (Rust & Wechsler, 1996) a été proposée aux enfants pour évaluer leurs compétences rédactionnelles. La consigne était la suivante : « Décris la maison de tes rêves avec le plus de détails possibles. » La qualité de la syntaxe (ordre des mots dans la phrase, complexité syntaxique, présence de connecteurs) et la qualité du vocabulaire utilisé (fréquence des mots utilisés, diversité du vocabulaire et du champ lexical, adéquation du vocabulaire à la description d'une maison) ont été évaluées sur une échelle de 1 à 5 par deux évaluateurs différents. En cas de désaccord important entre les deux évaluateurs (i.e. différence de plus de deux points sur le score), le jugement d'un troisième évaluateur était requis. Pour chacune des échelles (syntaxe et vocabulaire), la moyenne des notes des deux évaluateurs a été calculée. Enfin, un score total de qualité de la rédaction, correspondant à la somme des deux mesures (syntaxe et vocabulaire) était utilisé comme variable observée.

2.2.2. Motricité fine

La motricité fine des élèves a été évaluée avec le subtest de Dextérité Manuelle du M-ABC qui comporte trois épreuves évaluant la dextérité unimanuelle de la main dominante et non dominante (Placer les Chevilles), la coordination bimanuelle (Enfiler le Lacet) et le contrôle visuo-moteur (Tracé de la Fleur) (Henderson & Sugden, 1992). Le temps mis pour réaliser la tâche a été utilisé comme variable pour la dextérité de la main dominante et de la main non dominante ainsi que pour la coordination bimanuelle. Pour la tâche de contrôle visuo-moteur, seul le nombre d'erreurs a été utilisé comme variable observée.

2.2.3. Fonctions exécutives

Mémoire de travail. Deux épreuves évaluant la mémoire de travail verbale et la mémoire de travail visuo-spatiale ont été administrées. Tout d'abord, la mémoire de travail verbale a été testée avec l'item « Séquence Lettres-Chiffres » de la WISC-V (Wechsler, 2016). Dans cet exercice, l'enfant devait restituer une séquence de chiffres et lettres, énoncée par l'expérimentateur, en commençant par donner les chiffres dans l'ordre (du plus petit au plus grand) puis les lettres dans l'ordre alphabétique (e.g. si la séquence est 3-F-2, la réponse est 2-3-F). La mémoire de travail visuo-spatiale a quant à elle été testée avec l'item « Mémoire spatiale » de la WNV (Wechsler & Naglieri, 2009). Au cours de cette épreuve, l'enfant devait alors reproduire la séquence de cubes

touchés par l'examinateur dans le même ordre (empan endroit) puis dans l'ordre inverse (empan envers). Pour chacun de ces tests, les notes brutes, sur 30 pour la mémoire verbale et sur 32 pour la mémoire visuo-spatiale, ont été utilisées comme variables observées dans le modèle.

Inhibition. Afin d'évaluer l'inhibition, les enfants ont réalisé le subtest Inhibition de la NEPSY-II (Korkman et al., 2012). Dans cet exercice, une planche comportant quarante formes carrées ou rondes de deux couleurs différentes (blanches ou noires) a été présentée au participant. Dans un premier temps, il devait nommer les formes le plus rapidement et le plus précisément possible indépendamment de leur couleur (item « Dénomination »). Puis, l'enfant devait inhiber la réponse automatique en donnant le nom de la forme inverse : par exemple dire « carré » pour nommer une forme ronde (item « Inhibition »). Enfin, dans l'item « Changement », le participant devait tenir compte de la couleur de la forme et donner le nom correct de la forme quand elle était noire et le nom inverse de la forme quand elle était blanche : par exemple, dire « carré » pour un carré noir ou un rond blanc. Deux mesures ont été utilisées pour être utilisées comme variables observées dans le modèle : Inhibition (a) correspond à la différence des temps obtenus entre l'item Dénomination et l'item Inhibition, et Inhibition (b) correspond à la différence entre les temps obtenus entre l'item Dénomination et l'item Changement.

Flexibilité. La flexibilité a été évaluée avec deux tests. Le Trail Making Test (TMT) (Reitan, 1971) est une mesure classique de la flexibilité où il est demandé de relier des chiffres et les lettres en alternant entre les chiffres et les lettres. Le subtest des « Petits Hommes Verts » de la TEA-Ch (Manly et al., 2006) a également été utilisé. Dans cette épreuve, il est demandé de compter des créatures à l'endroit ou à rebours en tenant compte du sens des flèches qui indiquent le sens de comptage. La variable du modèle Flexibilité (a) correspond au TMT, la mesure utilisée étant la différence des temps mis pour réaliser la planche A (i.e. relier les points de 1 à 25) et pour réaliser la planche B (i.e. relier les chiffres de 1 à 13 et les lettres de A à L en alternant entre un chiffre et une lettre). La variable Flexibilité (b) correspond à la note issue de la TEA-Ch calculée à partir du temps d'exécution et du nombre de changement de direction.

Planification. Une version informatisée de la Tour de Londres (Piper et al., 2012; Shallice et al., 1982) a été administrée pour évaluer la planification. Dans cette version de la tâche, l'enfant devait déplacer des disques de couleurs en un nombre limité de déplacements afin d'arriver à un modèle final. Au total, douze problèmes ont étéproposés et un score – pondéré par la difficulté du problème (i.e. nombre de déplacements à planifier) est utilisé comme variable observée.

2.2.4. Ecriture manuscrite

L'écriture manuscrite a été évaluée au travers de la tâche de l'alphabet (Berninger et al., 1992). Au cours de cette tâche, l'enfant devait écrire les lettres de l'alphabet dans l'ordre, avec son

écriture habituelle, le plus rapidement et le plus précisément possible pendant 30 secondes. Le nombre de lettres correctement produites a ensuite été reporté et utilisé comme variable observée. Notons qu'en accord avec la proposition de Berninger et al. (1992), les inversions dans l'ordre des lettres (e.g. a, b, d, c) et les substitutions (e.g. remplacer un j par un g) ont été considérées comme des erreurs et n'ont pas été comptabilisées dans le score total. De la même façon, les lettre illisibles ou raturées n'ont pas été prises en compte dans le calcul du score.

2.3. PROCEDURE

Tous les élèves ont réalisé l'ensemble de tests langagiers, moteurs et cognitifs, répartis sur une session collective d'une heure et deux sessions individuelles de 45 minutes. Ces évaluations comprenaient à la fois les tâches présentées dans la partie « matériel » ci-dessus et d'autres tâches évaluant d'autres compétences qui n'ont pas été utilisées dans la présente étude (voir Annexe 1, p.249). Au cours de la session collective, les élèves ont réalisé trois tâches de langage écrit en classe entière : dictée de mots, compréhension écrite et rédaction. Pendant la première session individuelle, les tâches de planification, de dextérité unimanuelle (placer les chevilles), de lecture de mots, de mémoire de travail verbale et de flexibilité mentale (TMT) ont été administrées. Au cours de la seconde session, les élèves ont réalisé les tâches de flexibilité mentale (les petits hommes verts de la TEA-Ch), de coordination bimanuelle (enfiler le lacet), de conscience phonologique, d'inhibition (inhibition de la NEPSY), de dénomination rapide, de contrôle visuo-moteur (tracé de la fleur), de mémoire visuo-spatiale (WNV) et de l'alphabet. L'ordre des tâches était fixe au sein de chaque session mais l'ordre des deux sessions individuelles ont été contrebalancés entre les participants. L'ensemble des tests a été administré par des intervenants de l'Université de Poitiers formés à l'évaluation des tests.

2.4. ANALYSES STATISTIQUES

Avant les analyses statistiques, les données aberrantes, correspondant aux données en dessous ou au-dessus de trois écart-types, ont été exclues. Suite à l'examen des histogrammes et des diagrammes quantile-quantile (Q-Q plots) (Gel et al., 2005), les variables qui ne suivaient pas une loi normale ont été transformées en appliquant une transformation (des racines carrées ou des carrées) (Daumas, 1982). Les variables transformées étaient les suivantes : coordination bimanuelle, coordination visuo-motrice, flexibilité (a), lecture de mots réguliers et pseudo mots, orthographe de mots réguliers et pseudo-mots, compréhension de la lecture et mémoire de travail verbale. Puis des corrélations entre les différentes variables motrices et de langage écrit ont été réalisées. Suite à cela, des analyses factorielles confirmatoires et de modélisation par équations structurales ont été menées pour étudier les relations entre différentes variables latentes à l'aide du package Lavaan du logiciel R (R Development Core Team, 2005). La qualité des modèles a été

évaluée en examinant différents indices d'ajustement : le chi-square, le CFI (comparative fit index), le RMSEA (root mean square error of approximation) et le SRMR (standardized root mean square). Le Chi-Square étant sensible à la taille d'échantillon et du modèle (Hu & Bentler, 1998), le modèle était accepté même si l'indicateur était en dessous du cut-off (p > .05). Les modèles étaient considérés comme représentant correctement les données si la valeur du CFI était supérieure ou égale à .90, du SRMR inférieur à .09 et du RMSEA inférieure à .06 (Hooper, Coughlan, & Mullen, 2008). Différents modèles de médiations ont été comparés à l'aide de tests de Satorra-Bentler afin de déterminer si l'ajout d'une autre médiation améliorait significativement le modèle. En l'absence de différence significative, le modèle le plus parcimonieux était conservé (Kline, 2015). Enfin, les relations entre les différentes variables latentes ont été modélisées sur la base du modèle de médiation retenu.

3. RESULTATS

3.1. ANALYSE DESCRIPTIVE ET CORRELATIONS

Les analyses descriptives sont reportées dans le tableau ci-dessous (Tableau 1).

Tableau 1 : Statistiques descriptives (moyenne, écart-types, minimum et maximum) des mesures de langage écrit, des habiletés motrices, des fonctions exécutives et de l'écriture manuscrite de l'étude 1.1.

	Moyenne	Ecart-type	Min.	Max.
Langage écrit (scores)				
Lecture de mots réguliers (/20)	17,7	1,90	12	20
Lecture de mots irréguliers (/20)	10,3	4,07	2	20
Lecture de pseudo-mots (/20)	15,6	2,46	8	20
Orthographe de mots réguliers (/10)	7,17	2,09	1	10
Orthographe de mots irréguliers (/10)	3,77	2,12	0	10
Orthographe de pseudo-mots (/10)	7,55	1,71	2	10
Compréhension écrite (/12)	9,12	2,18	3	12
Rédaction (/10)	5,42	1,09	2.5	8
Habiletés motrices				
Dextérité manuelle (main dominante) (temps en s.)	25,8	3,14	16	30
Dextérité manuelle (main non dominante) (temps en s.)	29,6	3,66	18	37
Coordination bimanuelle (temps en s.)	29,6	8,57	16	60
Contrôle visuo-moteur (nombre d'erreurs)	2,13	1,82	0	7
Fonctions exécutives				
Mémoire de travail visuo-spatiale (score /32)	12,0	2,60	5	18
Mémoire de travail verbale (score /30)	14,6	3,30	4	20
Inhibition (a) (différence des temps entre les conditions en s.)	9,67	6,02	-8	30
Inhibition (b) (différence des temps entre les conditions en s.)	33,8	10,7	3	68
Flexibilité (a) : TMT (différence des temps entre les conditions en s.)	92,4	42,9	6	233
Flexibilité (b) : TeaCh (score/temps)	5,52	1,35	2.43	10
Planification (score /46)	19,1	6,66	3	37
Ecriture manuscrite				
Tâche de l'alphabet (nombre de lettres produites en 30 s)	13,2	4,33	4	25

Plusieurs corrélations négatives ont été retrouvées entre les variables motrices et les différentes variables de langage écrit (Tableau 2) : les élèves obtenant les meilleures performances sur les tâches motrices (i.e. temps de réalisation de la tâche plus court) sont également ceux qui obtiennent les meilleurs scores sur les tâches de langage écrit. Les mesures de lecture et d'orthographe de mots sont les plus corrélées aux différentes variables motrices (lecture de mots : -.06 à -.20 ; orthographe de mots : -.02 à -.20). A l'inverse la compréhension écrite et la qualité de la rédaction ne sont que peu voire pas corrélées significativement aux compétences motrices, malgré la présence de résultats tendanciels (compréhension écrite : -.07 à -.12 ; rédaction : -.12 à -.14). Les corrélations entre les habiletés motrices et les deux médiateurs, et entre les médiateurs et les différentes dimensions du langage écrit peuvent être retrouvées en annexes (voir Annexe 2, p.252).

Tableau 2 : Corrélations entre les mesures motrices et du langage écrit

	Dextérité manuelle MD (temps)	Dextérité manuelle MND (temps)	Coordination bimanuelle (temps)	Contrôle visuo-moteur (erreurs)
Lecture de mots réguliers (score /20)	-.09	**-.14***	**-.15***	-.08
Lecture de mots irréguliers (score /20)	-.11$^{\#}$	**-.14***	**-.20****	**-.19***
Lecture de pseudo-mots (score /20)	-.08	-.13$^{\#}$	-.06	**-.14***
Orthographe de mots réguliers (score /10)	-.12$^{\#}$	**-.20****	-.09	-.12$^{\#}$
Orthographe de mots irréguliers (score /10)	-.08	-.08	**-.16***	**-.14***
Orthographe de pseudo-mots (score /10)	-.02	-.08	-.09	-.10
Compréhension écrite (score /12)	-.13$^{\#}$	-.12$^{\#}$	-.07	-.12$^{\#}$
Rédaction (score /10)	-.10	-.13$^{\#}$	-.12$^{\#}$	**-.14***

* $p < .05$. ; ** $p < .01$; $^{\#}$ $p < .10$

Note. MD : main dominante ; MND : main non dominante

3.2. ANALYSE FACTORIELLE CONFIRMATOIRE

Avant de tester l'hypothèse de médiation par les fonctions exécutives et par l'écriture manuscrite, une analyse factorielle confirmatoire (AFC) a été réalisée afin de confirmer la qualité des différentes variables latentes que nous avions formulées sur la base de nos hypothèses initiales. L'AFC spécifiait sept variables latentes :

- Habiletés motrices : dextérité manuelle de la main dominante, dextérité manuelle de la main non dominante, coordination bimanuelle et contrôle visuo-moteur.
- Fonctions exécutives : mémoire de travail verbale, mémoire de travail visuo-spatiale, inhibition (a), inhibition (b), flexibilité (a), flexibilité (b) et planification
- Ecriture manuscrite : tâche de l'alphabet
- Lecture de mots : lecture de mots réguliers, irréguliers et pseudo-mots
- Orthographe de mots: orthographe de mots réguliers, irréguliers et pseudo-mots
- Compréhension : compréhension en lecture
- Rédaction : qualité de la rédaction

Les indices d'ajustement indiquent un bon ajustement du modèle au données, $\chi^2(152) = 208.29$, $p < .001$, CFI = .90, RMSEA = .05; SRMR = .07. L'analyse des indices locaux révèle que certaines variables manifestes (contrôle visuo-moteur, inhibition (b) et planification) ne sont pas significativement représentées par leur variable latente ($p > .05$). Cependant, compte tenu de la qualité des indices d'ajustement, ces variables ont été conservées dans les analyses.

3.3. COMPARAISON DE MODELES

Avant de procéder à l'analyse des effets directs et indirects de la motricité sur les différentes dimensions du langage écrit, plusieurs modèles de médiation ont été confrontés (Figure 4). Dans chacun des modèles, l'effet des deux médiateurs potentiels (fonctions exécutives et écriture manuscrite) a été contrôlé. Pour le modèle 1, seul l'effet direct de la motricité sur le langage écrit a été modélisé. Ce modèle initial a ensuite été comparé à différents modèles de médiations. Les modèles 2a et 3a proposaient une médiation unique (via les fonctions exécutives ou via l'écriture manuscrite) en contrôlant en même temps l'autre facteur. Le modèle 4a proposait à la fois une médiation via l'écriture manuscrite et une médiation via les fonctions exécutives. L'objectif de cette analyse était de confirmer la complémentarité des deux médiations. Nous nous attendions à ce que le modèle avec une double médiation présente un meilleur ajustement aux données. Après avoir sélectionné le meilleur modèle de médiation, celui-ci a été comparé à un modèle plus simple, sans l'effet direct de la motricité sur le langage écrit (modèles 2b, 3b et 4b), afin de confirmer l'existence d'une médiation complète.

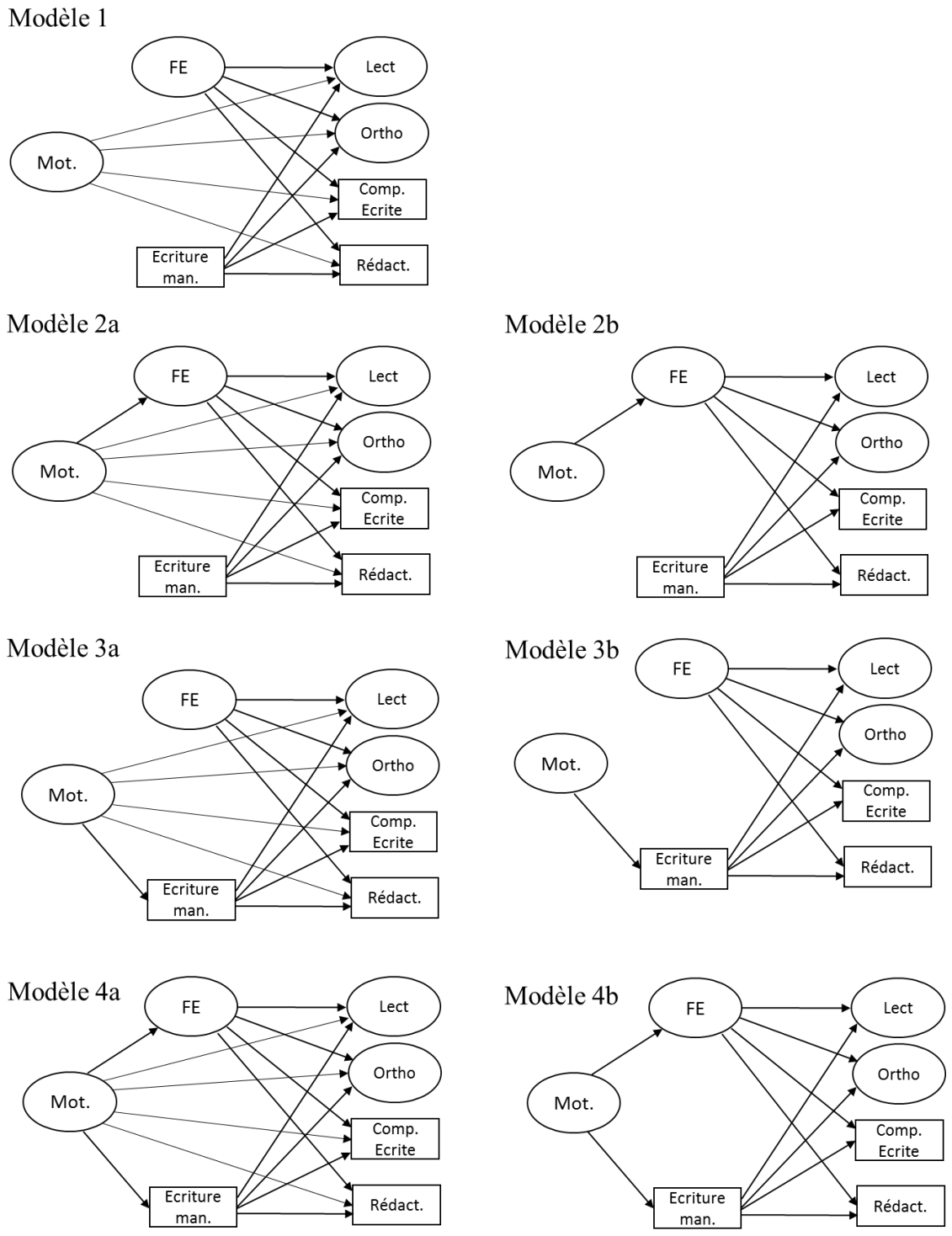

Figure 4 : Présentation des différents modèles de médiation testés pour expliquer la relation entre habiletés motrices et langage écrit : (1) Effet direct sans médiation, (2) Médiation par les fonctions exécutives, (3) Médiation par l'écriture manuscrite et (4) Double médiation. Les modèles présentés à gauche intègrent les effets directs de la motricité sur le langage écrit (1, 2a, 3a et 4a). Les modèles présentés à droite intègrent les modèles sans les effets directs de la motricité sur le langage écrit (2b, 3b et 4b).

Note. Mot. : Motricité fine ; FE : fonctions exécutives ; Ecriture man. : écriture manuscrite ; Lect : lecture de mots ; Ortho : orthographe de mots ; Comp. : compréhension ; Rédact : rédaction.

Tableau 3 : Indicateurs d'ajustement des différents modèles testés pour expliquer la relation entre habiletés motrices et langage écrit. Les modèles représentant correctement les données (i.e. CFI ≥.90, RMSEA ≤.06, SRMR ≤ .09) sont indiqués en gras.

	CFI	RMSEA	SRMR	AIC
Modèle 1 *Effet direct*	.85	**.06 (.04-.07)**	**.09**	8771.54
Modèle 2a *Effet direct + indirect via les fonctions exécutives*	.88	**.05 (.04-.07)**	**.08**	8759.47
Modèle 2b *Effet indirect via les fonctions exécutives*	.88	**.05 (.04-.07)**	**.09**	8755.07
Modèle 3a *Effet direct + indirect via l'écriture manuscrite*	.87	**.05 (.04-.07)**	**.09**	8763.50
Modèle 3b *Effet indirect via l'écriture manuscrite*	.87	**.05 (.04-.07)**	**.09**	8756.82
Modèle 4a *Effet direct + effet indirect via les fonctions exécutives + effet indirect via l'écriture manuscrite*	**.90**	**.05 (.03-.06)**	**.07**	8749.14
Modèle 4b *Effet indirect via les fonctions exécutives +effet indirect via l'écriture manuscrite*	**.90**	**.05 (.03-.06)**	**.08**	8744.72

L'examen des indices d'ajustement des différents modèles suggère que les modèles présentant une double médiation (4a et 4b) présentent un meilleur ajustement aux données (Tableau 3). Une méthode de comparaison a été réalisée afin de confirmer l'amélioration significative des modèles lors de l'ajout de relations entre la motricité et les différents médiateurs. Tout d'abord, les résultats indiquent que l'ajout d'une relation entre les compétences motrices et les fonctions exécutives améliore significativement le modèle 1 (Satorra–Bentler $\Delta\chi^2 = 14.07$, $\Delta df = 1$, $p < .001$). Le modèle 2a a donc été conservé pour la suite des analyses. De plus, ce modèle est amélioré suite à l'ajout d'une relation entre l'écriture manuscrite et la motricité (Satorra–Bentler $\Delta\chi^2 = 12.33$, $\Delta df = 1$, $p < .001$). En accord avec nos hypothèses, les résultats indiquent que le modèle 4a proposant une double médiation est celui qui s'ajuste le mieux aux données. Pour finir, afin de tester l'hypothèse d'une médiation totale, les liens directs entre les compétences motrices et les différentes dimensions du langage écrit ont été retirés (modèle 4b). Les analyses ne reportent pas

de différence significative entre les modèles 4a et 4b (Satorra–Bentler $\Delta\chi^2 = 3.58$, $\Delta df = 4$, p .47) : le modèle le plus parcimonieux, n'intégrant pas les effets directs de la motricité sur le langage écrit, a donc été conservé pour l'analyse finale (Kline, 2015). Pour conclure, les analyses de comparaison de modèles confirment l'hypothèse d'une médiation totale par les deux médiateurs (fonctions exécutives et écriture manuscrite).

3.4. ANALYSE DE MEDIATION

Les effets indirects de la motricité sur les différentes dimensions du langage écrit ont été modélisés sur la base du modèle à double médiation présenté précédemment (Figure 5). Les indicateurs d'ajustement indiquent un bon ajustement du modèle au données, $\chi^2(157) = 217.62$, $p < .001$, CFI = .90, RMSEA = .05, SRMR = .08. L'analyse reporte des effets indirects de la motricité fine par les fonctions exécutives (FEs) et/ou par l'écriture manuscrite, sur chacune des dimensions du langage écrit.

Tout d'abord, l'effet de la motricité fine sur les processus de bas niveau est expliqué à la fois par les FEs et par l'écriture manuscrite. Pour la lecture de mots, les résultats indiquent que les effets indirects par les FEs (β = -.15 ; p = .03) et par l'écriture manuscrite (β = -.13 ; p = .007) sont significatifs. De façon similaire, les effets indirects de la motricité sur les compétences orthographiques via les FEs (β = -.13 ; p = .05) comme via l'écriture manuscrite (β = -.16 ; p = .004) sont significatifs.

En ce qui concerne les processus de haut niveau, une médiation totale est également retrouvée à la fois pour la compréhension et pour la rédaction. Cependant, pour la compréhension, l'effet est totalement médiatisé par les FEs (β = -.17 ; p = .01) alors que l'effet indirect via l'écriture manuscrite n'est pas significatif (β = -.02 ; p = .41). A l'inverse, pour la rédaction, on retrouve un effet indirect par l'écriture manuscrite (β = -.10 ; p = .01) mais pas d'effet indirect significatif par les FEs (β = -.05 ; p = .39).

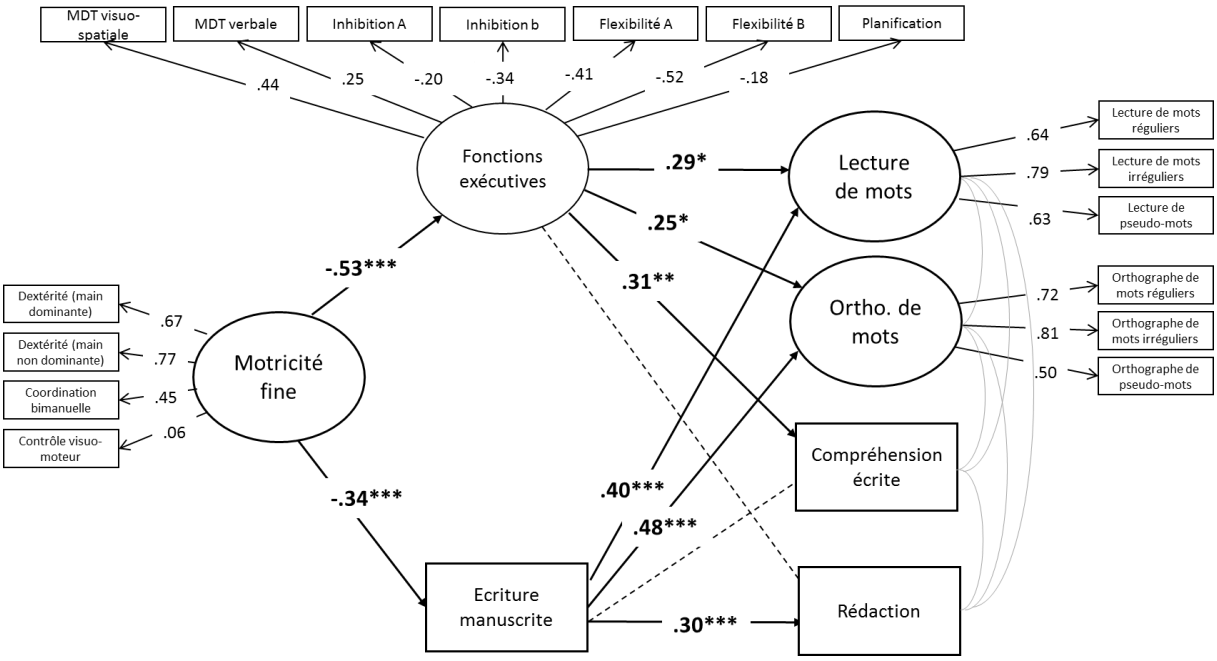

Figure 5 : Modèle de médiation final avec la motricité comme prédicteur, les fonctions exécutives et l'écriture manuscrite comme médiateurs et les différentes composantes du langage écrit (lecture de mots, orthographe de mots, compréhension de la lecture et rédaction) comme variables prédites.

*p <.05 ; ** p < .01 ; *** p < .001

4. DISCUSSION

Dans cette étude, nous avons examiné les relations entre les compétences motrices et différentes dimensions du langage écrit chez des élèves de CE2 sans troubles des apprentissages. Plus précisément, notre principal objectif était de tester deux hypothèses explicatives de cette relation : celle d'une médiation par l'écriture manuscrite et celle d'une médiation par les fonctions exécutives. En premier lieu, l'examen des corrélations indique que les différentes habiletés motrices évaluées sont en lien avec le langage écrit et notamment avec les compétences de bas niveau (i.e. la lecture et l'orthographe de mots). De plus, les résultats des modèles d'équations structurales suggèrent que la motricité fine exerce un effet indirect sur l'ensemble des dimensions du langage écrit évaluées. La présente étude permet donc d'étendre les résultats antérieurs à une population plus âgée en rapportant des liens entre habiletés motrices et apprentissage du langage écrit chez des élèves de CE2. En accord avec la proposition de plusieurs auteurs (Cameron et al., 2016; Suggate et al., 2016), les analyses de médiations soutiennent que deux mécanismes distincts sous-tendent le lien entre les habiletés motrices et l'apprentissage du langage écrit. En effet, la qualité du modèle statistique est significativement meilleure quand les deux médiations sont intégrées. Ce résultat souligne la nécessité de prendre en compte ces deux mécanismes pour expliquer le lien entre motricité fine et langage écrit. Au-delà de l'existence des deux médiations,

l'étude souligne l'importance de distinguer les différentes dimensions du langage écrit. En effet, le lien entre la motricité fine et le langage écrit est sous-tendu par différents facteurs en fonction de la dimension du langage écrit évaluée. Ainsi, l'effet de la motricité sur les compétences de bas niveaux (identification et orthographe de mots) est expliqué par les deux médiateurs, alors que l'effet sur la compréhension est sous-tendu uniquement par les fonctions exécutives et que l'effet sur la rédaction est uniquement médiatisé par l'écriture manuscrite. Afin de détailler plus précisément les implications de ces résultats, nous discuterons une à une chaque médiation ainsi que les relations entre les médiateurs et les différentes dimensions du langage écrit.

4.1. MEDIATION PAR L'ECRITURE MANUSCRITE

L'étude confirme tout d'abord que l'effet de la motricité fine sur le langage écrit est en partie expliqué par l'écriture manuscrite. Cet effet indirect de la motricité via l'automatisation de l'écriture est rapporté sur trois dimensions du langage écrit : la lecture de mots, l'orthographe de mots et la qualité de la rédaction.

L'analyse des différentes relations dans le modèle final permet tout d'abord de confirmer la relation entre les compétences motrices et l'écriture manuscrite chez des élèves de CE2. Ces résultats sont en accord avec de précédentes études qui ont montré que les compétences motrices et graphomotrices sont corrélées à la qualité et à la vitesse d'écriture manuscrite chez les élèves tout venants de cette tranche d'âge (Berninger & Fuller, 1992; Volman et al., 2006). Notons que toutes les habiletés motrices évaluées sont significativement corrélées à l'écriture manuscrite (voir Annexe 2, p.252).

Par ailleurs, nos résultats rapportent des relations significatives entre les performances obtenues sur la tâche de l'alphabet et différentes dimensions du langage écrit. En accord avec de précédentes études (Connelly et al., 2012; Pontart et al., 2013), un lien est retrouvé avec deux composantes de l'écriture : l'orthographe de mots et la rédaction. Ces résultats confortent l'hypothèse qu'un meilleur contrôle moteur pendant l'écriture permettrait de consacrer plus de ressources cognitives au traitement langagier – qu'il s'agisse de processus de bas niveau, comme le traitement orthographique, ou du processus de plus haut niveau, comme la planification des idées pendant la rédaction d'un texte (Limpo et al., 2017). Néanmoins, l'effet de l'écriture manuscrite sur le langage écrit n'est pas limité au versant de la production. Nos résultats rapportent que la tâche de l'alphabet est également en lien avec la lecture de mots. Ceci conforte l'hypothèse proposée par Suggate et al. (2018 ; 2019) : les enfants présentant de meilleures compétences motrices investissent plus les tâches d'écriture ce qui leur permet de consolider leur apprentissage de la lecture. Ce bénéfice sur l'identification de mots peut s'expliquer de plusieurs façons. Tout d'abord, les bénéfices d'une écriture plus automatisée sur la construction des

représentations orthographiques pourrait l'identification de mots (ShaharYames & Share, 2008; Share, 1995). Une explication alternative, mais non contradictoire, suggère que l'écriture manuscrite permet de construire une représentation sensori-motrice du mot qui est réactivée lors de la lecture (James & Engelhardt, 2012). Plus spécifiquement, il semble qu'apprendre au travers de l'écriture manuscrite favorise l'apprentissage des caractéristiques spatiales des lettres ce qui pourrait faciliter leur reconnaissance (Bara & Gentaz, 2011; Longcamp et al., 2011; Longcamp et al., 2005). Plusieurs travaux ont ainsi montré que la reconnaissance d'une nouvelle lettre ou d'un nouveau mot était facilitée suite à un apprentissage au travers de l'écriture manuscrite, comparativement à une simple présentation visuelle ou à un apprentissage sur clavier (Bosse et al., 2014; Longcamp et al., 2005, 2011; Shahar-Yames & Share, 2008).

Pour conclure, cette étude permet de démontrer que l'effet de la motricité sur différentes dimensions du langage écrit est expliquée par une médiation via l'écriture manuscrite chez des élèves de CE2. Cet effet est également retrouvé quand on contrôle l'effet des fonctions exécutives.

4.2. MEDIATION PAR LES FONCTIONS EXECUTIVES

Les résultats confirment également que le lien entre motricité et langage écrit est en partie expliquée par les fonctions exécutives. Cette hypothèse de médiation a déjà été testée par plusieurs auteurs à la fois chez des élèves de maternelle et chez des élèves plus âgés (Michel et al., 2019; Oberer et al., 2018; Schmidt et al., 2017). Cependant, aucune de ces études n'avait évalué spécifiquement les différentes dimensions du langage écrit – certaines utilisant parfois une mesure composite de la réussite scolaire, combinant une évaluation du niveau de langage écrit et de mathématiques (e.g. Schmidt et al., 2017). Or, nos résultats indiquent que les fonctions exécutives expliquent l'effet de la motricité sur certaines dimensions du langage écrit évaluées dans l'étude, mais pas sur d'autres, ce qui souligne la nécessité de distinguer ces différentes dimensions.

En premier lieu, l'examen des différentes relations du modèle de médiation final montre l'existence d'un lien entre la motricité et les fonctions exécutives. Ce résultat est concordant avec ceux d'études antérieurs (Geertsen et al., 2016; MacDonald et al., 2016). Cependant, il est important de souligner que, bien que nous ayons testé dans notre modèle l'effet de la motricité sur les fonctions exécutives, le lien entre ces deux compétences a été interprété de différentes façons. La première hypothèse, que nous défendons dans notre modèle, est celle d'un lien causal qui postule que les compétences motrices influencent le fonctionnement exécutif. Plusieurs auteurs ont proposé que la réalisation d'activités motrices sous-tend le développement cognitif (Oberer et al., 2018; Schmidt et al., 2017). Une seconde hypothèse stipule que le fonctionnement exécutif et les compétences motrices se développent de façon conjointe car ils reposent sur des

structures cérébrales similaires (Cameron et al., 2016; Grissmer et al., 2010; Suggate et al., 2018). Selon cette approche, la motricité n'exerce donc pas d'influence sur les fonctions exécutives mais est influencée par un même facteur supra-ordonné que les fonctions exécutives. Néanmoins, la nature corrélationnelle de la méthode employée dans cette étude, ne permet pas de confirmer le lien de causalité entre la motricité et les fonctions exécutives. De futures études interventionnelles sont nécessaires pour démontrer la nature causale de ce lien.

En second lieu, les résultats reportent que les fonctions exécutives sont en lien à la fois avec certaines compétences de langage écrit de haut niveau, conformément à nos hypothèses, mais également avec des compétences de bas niveau. Tout d'abord, l'analyse du modèle suggère une influence du fonctionnement exécutif sur la compréhension écrite. Ceci fait écho aux nombreuses études qui rapportent une implication de la mémoire de travail, de l'inhibition, de la flexibilité mentale et de la planification dans les processus de compréhension écrite (Butterfuss & Kendeou, 2018; Christopher et al., 2012; Kieffer et al., 2013; Potocki et al., 2015). De plus, cet effet des fonctions exécutives se retrouve également sur les compétences de bas niveau. Ceci confirme des résultats antérieurs qui suggèrent que les fonctions exécutives non verbales comme l'inhibition ou la flexibilité mentale prédisent le niveau de lecture et l'orthographe de mots et pseudo-mots chez des élèves du CP au CM2 (Altemeier et al., 2008). Par ailleurs, en accord avec le modèle de Miyake et al. (2000), notre variable latente intègre une mesure de mémoire de travail phonologique, dont l'influence sur le développement de la lecture et de l'orthographe a été largement démontrée (Peng et al., 2018).

Pour finir, contrairement à nos hypothèses, les fonctions exécutives ne semblent pas être en lien avec la qualité de la rédaction. Pourtant, des études antérieures ont montré que les fonctions exécutives prédisaient le niveau ultérieur de rédaction chez des élèves de CE1 et CM1 après contrôle de l'écriture manuscrite (Cordeiro et al., 2020; Drijbooms et al., 2015, 2017). Ces résultats discordants pourraient provenir de différences dans les tâches de rédaction utilisées d'une étude à l'autre. En effet, nous avons utilisé ici un exercice de description (i.e. décrire la maison de ses rêves) alors qu'un exercice de narration a été utilisé dans les précédentes études (e.g. : raconte l'histoire d'un enfant qui a perdu son ballon) (Cordeiro et al., 2020 ; Drijbooms et al., 2015, 2017). Or, le type de texte à produire influe à la fois sur la qualité du produit (Beers & Nagy, 2011) et sur les stratégies employées pendant la rédaction (Roussey et al., 1990). Il est donc possible que l'implication des fonctions exécutives dans la rédaction diffère en fonction du type de texte à produire, ou que l'analyse de la qualité des textes descriptifs ne permette pas de saisir les processus en lien avec le fonctionnement exécutif. D'autres études doivent être menées pour confirmer cette hypothèse.

5. CONCLUSION

La présente étude permet de confirmer l'existence d'une relation entre les habiletés motrices et différentes dimensions du langage écrit chez des élèves de CE2 : l'identification de mots, les compétences orthographiques, la compréhension écrite et la rédaction. De plus, l'objectif principal était d'expliquer ce lien testant deux hypothèses : celle d'une médiation par les fonctions exécutives et celle d'une médiation par l'écriture manuscrite. Les résultats du modèle testé confirment ces hypothèses. Tout d'abord, les résultats soulignent la nécessité de tenir compte des deux médiateurs pour expliquer cette relation. De plus, ils suggèrent que les facteurs explicatifs de ce lien diffèrent en fonction de la dimension du langage écrit étudiée. Ainsi, la motricité influence les compétences de bas niveau (lecture et orthographe de mots) au travers des deux médiateurs. Par contre, l'effet des compétences motrices sur la compréhension est totalement expliqué par les fonctions exécutives. A l'inverse le lien entre les habiletés motrices et la rédaction est expliqué par l'automatisation du geste graphique mais pas par les fonctions exécutives.

Pour finir, bien que la méthode employée dans cette étude ait plusieurs avantages – comme le fait de pouvoir intégrer et modéliser les relations entre de nombreux facteurs – elle présente également des limites. Il est notamment nécessaire de confirmer les relations de causalité testées dans le modèle au travers d'études interventionnelles. De futures recherches doivent donc être menées pour confirmer le lien causal entre les compétences motrices et les différentes dimensions du langage écrit. Par ailleurs, si les modèles d'équations structurales permettent de réunir différentes mesures au sein d'une même variable latente, l'effet distinct de différentes variables motrices (e.g. dextérité manuelle et compétences graphomotrices) n'a pas pu être étudié. Or, certains auteurs suggèrent que certaines habiletés motrices sont plus impliquées dans l'automatisation du geste graphique et sont en conséquence de meilleurs prédicteurs de l'apprentissage du langage écrit. Dans une seconde étude nous avons cherché à dissocier différentes mesures de la motricité fine afin d'étudier leurs relations avec l'écriture manuscrite d'une part, et avec l'apprentissage du langage écrit d'autre part.

ETUDE 1.2. EFFET DISTINCT DE LA DEXTERITE MANUELLE ET DES HABILETES GRAPHOMOTRICES SUR L'APPRENTISSAGE DE LA LECTURE ET DE L'ECRITURE

1. INTRODUCTION

L'étude précédente permet de confirmer que les habiletés motrices sont en lien avec l'apprentissage du langage écrit chez des élèves de CE2. Or, si des travaux antérieurs ont également montré que la motricité évaluée en grande section de maternelle prédit le niveau ultérieur de langage écrit (Cameron et al., 2012; Grissmer et al., 2010), ce lien prédictif semble dépendre des tâches de motricité utilisées. Plusieurs auteurs ont ainsi proposé que seules les habiletés motrices les plus sollicitées dans le développement de l'écriture manuscrite influencent l'apprentissage du langage écrit (Cameron et al., 2016; Greenburg et al., 2020). Comme présenté dans l'étude précédente, l'une des hypothèses proposée pour expliquer la relation entre les habiletés motrices et l'apprentissage du langage écrit est celle d'une médiation par l'écriture manuscrite. L'automatisation du geste d'écriture permettrait de consacrer plus de ressources attentionnelles au traitement langagier lors de l'écriture ce qui faciliterait l'apprentissage de l'orthographe (Bosse et al., 2014; Pontart et al., 2013) et l'identification de mots (Suggate et al., 2018).

Cependant, certains auteurs suggèrent que toutes les habiletés motrices ne soient pas impliquées de la même façon dans l'automatisation de l'écriture manuscrite. Par exemple, Suggate et al. (2018) ont souligné la nécessité de distinguer les tâches de dextérité manuelle[6] (e.g. déplacer des pions) des tâches graphomotrices qui nécessitent l'utilisation d'un stylo (e.g. copier des figures). Dans une étude portant sur 144 élèves de maternelle, ils ont ainsi montré au travers d'analyses de régressions que les compétences graphomotrices médiatisaient le lien entre la dextérité manuelle et la lecture. Les auteurs proposent que de meilleures compétences motrices facilitent le contrôle graphomoteur et, en conséquence, le développement de l'écriture manuscrite (i.e. tracé de lettres)[7]. Plusieurs études longitudinales rapportent également que lorsque l'on distingue les différentes habiletés motrices mesurées en maternelle, seules les habiletés

[6] En accord avec la terminologie adoptée dans le chapitre 2, le terme « dextérité manuelle » fait référence aux habiletés de motricité fine n'impliquant pas l'utilisation d'un stylo – par opposition aux habiletés graphomotrices.

[7] En accord avec la terminologie adoptée dans le chapitre 2, le terme habiletés graphomotrices renverra ici spécifiquement aux habiletés graphomotrices non langagières (e.g. copie de figures) en excluant l'écriture manuscrite. En effet, l'écriture manuscrite correspond à la capacité à tracer des lettres et comporte donc une composante graphomotrice et une composante langagière (Suggate et al., 2016)

graphomotrices, a priori plus impliquées dans l'écriture manuscrite, prédisent significativement la réussite scolaire ultérieure (Dinehart & Manfra, 2013; Greenburg et al., 2020).

Cependant, ces études présentent plusieurs limites. En premier lieu, les liens entre dextérité manuelle, habiletés graphomotrices non langagières et écriture manuscrite ont été peu étudiés et les résultats ne sont pas toujours congruents. Certains auteurs soutiennent que les habiletés graphomotrices non-langagières (e.g. copie de figures), sont de meilleurs prédicteurs du niveau de l'automatisation de l'écriture que les habiletés motrices qui ne requièrent pas l'utilisation d'un stylo (e.g. déplacer des pions) (Suggate et al., 2018). De ce fait, les compétences graphomotrices seraient un meilleur prédicteur du langage écrit que la dextérité manuelle de par leur implication dans le développement de l'écriture manuscrite (Cameron et al., 2016; Greenburg et al., 2020; Suggate et al., 2018) (Figure 6a). A l'inverse, d'autres travaux rapportent que la dextérité manuelle (e.g. toucher chaque doigt avec le pouce le plus vite possible) et les compétences graphomotrices non-langagières (e.g. copie de figures) contribuent de façon distincte à la qualité et à la vitesse de l'écriture manuscrite (Volman et al., 2006; Weintraub & Graham, 2000) (Figure 6b). L'hypothèse avancée est que la tâche de dextérité manuelle permettrait d'évaluer le contrôle moteur alors que la tâche de copie de figure permettrait d'évaluer les processus visuo-moteurs (i.e. contrôle visuel du mouvement), tous deux impliqués dans l'écriture. Ainsi, la distinction entre les deux habiletés se ferait sur la base de l'implication du traitement visuel plutôt que de la maîtrise de l'outil scripteur. Il semble donc nécessaire de démêler les liens entre les différentes habiletés motrices et l'écriture manuscrite pour pouvoir confirmer l'interprétation proposée par Suggate et al. (2018 ; 2019).

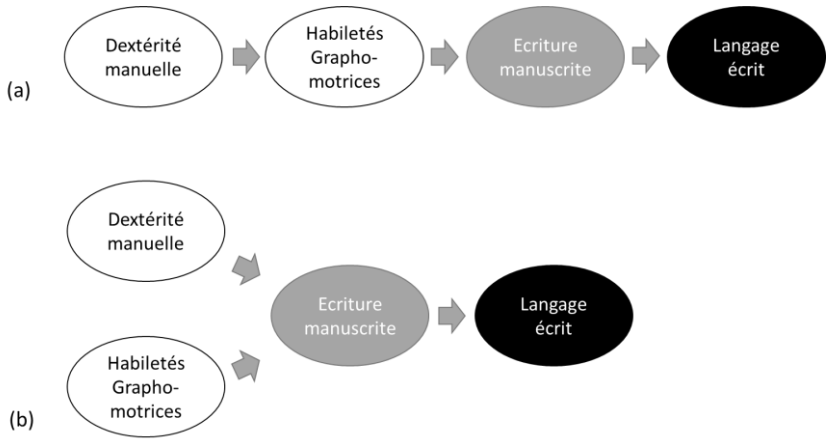

Figure 6 : (a) Hypothèse de médiation formulée par Suggate et al. (2016). (b) Hypothèse alternative formulée sur la base des travaux de Weintraub & Graham (2000) qui rapportent que la dextérité manuelle et les habiletés graphomotrices contribuent indépendamment au niveau d'écriture manuscrite. Notons que dans cette étude, les habiletés graphomotrices sont considérées comme une mesure du contrôle visuo-moteur : la dissociation ne se fait plus au niveau de l'utilisation du stylo mais au niveau de l'implication du traitement visuel.

Une seconde question concerne la tranche d'âge. En effet, dans la majorité des études, les différentes habiletés motrices sont évaluées en début d'apprentissage (i.e. en maternelle ou en CP) (Dinehart & Manfra, 2013; Greenburg et al., 2020; Suggate et al., 2016). Bien que des études aient montré que les liens entre les habiletés graphomotrices et l'écriture manuscrite ou le langage écrit diminue avec l'âge (Karlsdottir & Stefansson, 2002), aucune étude n'a pour l'instant évalué l'influence distincte de différentes mesures de la motricité fine sur l'écriture manuscrite et sur l'apprentissage du langage écrit chez des élèves de CM1 sans difficultés. En outre, bien que l'étude précédente rapporte des liens entre la motricité fine et différentes mesures du langage écrit, un effet prédictif n'a pas pu être démontré du fait du caractère transversal de l'étude. Il est donc nécessaire de tester si la dextérité manuelle et/ou les compétences graphomotrices prédisent l'automatisation de l'écriture manuscrite et le niveau ultérieur de langage écrit chez des élèves plus âgés, comme en CM1.

Cette étude a donc pour objectif de confirmer l'existence d'un effet prédictif de différentes habiletés motrices (dextérité manuelle et habiletés graphomotrices) et de l'écriture manuscrite sur le niveau de langage écrit chez des élèves de CM1. De plus, nous chercherons à tester l'hypothèse proposée par Suggate et al. (2016) présentée dans la Figure 6a au travers de régressions hiérarchiques. Pour cela, une étude longitudinale a été réalisée chez des élèves de CM1-CM2. Différentes compétences de motricité fine (dextérité manuelle et habiletés graphomotrices) ainsi que l'automatisation du geste d'écriture (tâche de l'alphabet) ont été évaluées en CM1. Les tâches graphomotrices et la tâche de l'alphabet ont été réalisées sur tablette graphique afin d'obtenir un indicateur de la vitesse de tracé. Un an plus tard, les élèves ont réalisé plusieurs exercices évaluant l'identification de mots, les compétences orthographiques et la compréhension écrite. Deux hypothèses ont été formulées. Tout d'abord, les différentes habiletés motrices évaluées devraient prédire le niveau ultérieur de langage écrit. De plus, en accord avec l'hypothèse formulée par Suggate et al. (2016), nous nous attendons à ce que (1) les compétences graphomotrices sous-tendent le lien entre dextérité manuelle et l'écriture manuscrite et que (2) l'écriture manuscrite explique le lien entre les compétences graphomotrices et l'apprentissage du langage écrit (Figure 6a).

2. METHODE

2.1. PARTICIPANTS

Au total, 41 élèves de CM1 issus de deux écoles de la région Nouvelle Aquitaine ont été recrutés dans le cadre de cette étude (âge moyen = 9 ans et 8 mois ; écart-type = 4 mois ; 18 filles). Tous les participants ont réalisé l'ensemble des tâches de motricité fine la première année (T1 :

avril 2018). Au cours du suivi longitudinal effectué un an plus tard (T2 : juin 2019), seuls 33 élèves ont réalisé les tâches de langage écrit (âge moyen = 10 ans et 11 mois ; écart-type = 4 mois ; 13 filles). Parmi eux, les résultats d'une élève ont été exclus des analyses car elle présentait un handicap sensoriel. Tous les représentants légaux des enfants qui ont participé à l'étude ont complété le formulaire d'autorisation parentale.

2.2. MATERIEL

2.2.1. Epreuves administrées en CM1 (T1)

Dextérité manuelle. La dextérité manuelle a été évaluée au travers du test du Purdue Pegboard (Tiffin, 1968). Après une phase de familiarisation, les élèves devaient placer le plus de chevilles possible dans les trous d'une planche en un temps limité. Quatre scores ont été relevés : le nombre de chevilles placées en 30 secondes avec la main dominante, le nombre de chevilles placées en 30 secondes avec la main non dominante, le nombre de chevilles placées en 30 secondes par les deux mains (coordination bimanuelle) et le nombre d'ensembles chevilles-rondelles placés en 1 minute (assemblage).

Compétences graphomotrices. Afin d'évaluer les compétences graphomotrices, deux subtests du Developmental Test of Visual Perception (DTVP-2 ; Hammill et al., 1993) ont été administrés. Au cours du subtest 1 du DTVP-2 « coordination oculomotrice », l'élève devait tracer le plus vite et le plus précisément possible un parcours entre deux lignes sans s'arrêter. Au cours du subtest 2 du DTVP-2 « copie de figure », un ensemble de figures a été présenté à l'enfant et il devait les recopier le plus vite et le plus précisément possible. Afin d'enregistrer la vitesse du tracé, les deux tâches ont été réalisées sur une tablette à digitaliser (Wacom Intuos3, format A5 Wide) associée à un ordinateur (Dell Latitude E6550). Pour chacun des subtests, un score a été calculé conformément à la cotation du test. Les deux scores dépendaient respectivement de la distance parcourue sans erreurs de tracé (Subtest 1) ou de la qualité de la copie (Subtest 2), un score élevé indiquant une bonne performance dans les deux cas.

Ecriture manuscrite. L'automatisation du geste d'écriture a été évaluée avec la tâche de l'alphabet (Berninger et al., 1992). Au cours de cette tâche, l'enfant devait écrire les lettres de l'alphabet dans l'ordre, avec son écriture habituelle, le plus rapidement et le plus précisément possible pendant 30 secondes. Comme pour les tâches évaluant la graphomotricité, la tâche de l'alphabet était proposée sur tablette graphique afin d'enregistrer la dynamique du geste d'écriture. Seules les 15 premières secondes d'écriture ont été utilisées pour l'extraction de ces variables. La vitesse d'écriture moyenne, correspondant à la distance parcourue en cm en une seconde, a été utilisée dans les analyses.

2.2.2. Epreuves administrées en CM2 (T2)

Orthographe de mots isolés : La dictée de mots et pseudo-mots issue de la BALE (Jacquier-Roux et al., 2010) a été administrée pour évaluer l'orthographe des élèves. Elle est décrite dans l'étude précédentes. Le score total (/30) a été utilisé comme variable dépendante.

Orthographe lexicale et grammaticale : Une seconde tâche d'orthographe a été utilisée : la dictée de texte « le corbeau » issue de la batterie Langage Oral, Langage écrit, Mémoire et Attention (L2MA; Chevrie-Muller et al., 1997). Au cours de cet exercice, les enfants devaient copier l'histoire dictée par l'expérimentateur. Deux scores étaient ensuite calculés afin d'évaluer l'orthographe lexicale (/30) et l'orthographe grammaticale (/23).

Identification de mots : Le test « La pipe et le rat » (Lefavrais, 1968) a été utilisé afin d'évaluer l'identification de mots écrits des élèves. Pour cela, une liste de mots a été présentée aux enfants qui devaient rayer les noms d'animaux (ex : chat, papillon, requin) le plus vite possible pendant 3 minutes. Il leur était précisé de lire les mots dans le sens de lecture et d'être attentif à ne pas oublier le nom d'un animal. Le nombre total d'animaux rayés a été utilisé comme variable dépendante.

Compréhension de la lecture. L'épreuve de compréhension développée par Potocki et al. (2014) a été utilisée pour évaluer la compréhension de la lecture. Elle est décrite plus précisément dans l'étude précédente (Etude 1.1, p.75). Un score sur 12 a été utilisé comme variable observée.

2.3. PROCEDURE

Tous les élèves ont réalisé les différentes tâches motrices en fin de CM1 (avril 2018) au cours de sessions individuelles. L'ordre des tâches était fixe : les élèves ont d'abord réalisé le test du Purdue Pegboard. Puis, ils ont réalisé les autres tests sur la tablette graphique. Après une phase de familiarisation avec le matériel (écriture du prénom sur une première page), les enfants réalisaient les deux subtests du DTVP-2 et la tâche de l'alphabet.

Les tâches de langage écrit ont quant à elles été proposées lors de sessions collectives en classe entière un an plus tard (juin 2019). Les élèves étaient alors scolarisés en CM2. Les exercices ont été proposés dans l'ordre suivant : d'abord les deux tâches de dictée – de mots isolés puis de texte – la tâche d'identification de mots, et enfin, la tâche de compréhension en lecture.

2.4. ANALYSES DES DONNEES DE LA TABLETTE GRAPHIQUE

Les différentes tâches graphomotrices (contrôle visuo-moteur et copie de figures) et la tâche d'écriture manuscrite (tâche de l'alphabet) ont été réalisées sur tablette graphique afin

d'enregistrer les propriétés kinesthésiques de l'écriture. Le logiciel Eye & Pen (version 3.0 ; Alamargot et al., 2006) a été utilisé pour l'enregistrement. Pour chacune des tâches graphomotrices, la vitesse moyenne, correspondant à la distance parcourue en cm en une seconde, a été calculée.

2.5. ANALYSES STATISTIQUES

Dans un premier temps, les données aberrantes – définies comme des observations déviant de plus ou moins 3 écart-type par rapport à la moyenne pour chaque épreuve – ont été retirées des analyses[8]. Certaines mesures ont également été normalisées en utilisant une transformation racine carrée (dextérité manuelle : assemblage) ou une transformation carrée (score du contrôle visuo-moteur, dictée de mots, compréhension et attention) (Daumas, 1982). Les coefficients de corrélation de Pearson ont été calculés afin d'évaluer la relation entre les différentes mesures motrices et l'écriture manuscrite, d'une part, puis entre les mesures motrices, d'écriture manuscrite et les mesures de langage écrit, d'autre part. Enfin, quand des corrélations significatives étaient retrouvées, des régressions hiérarchiques ont été effectuées afin d'étudier les contributions distinctes des différentes mesures motrices sur l'écriture manuscrite et sur le langage écrit.

3. RESULTATS

3.1. ANALYSES DESCRIPTIVES

Les statistiques descriptives des mesures en T1 et T2 sont reportées dans les tableaux ci-dessous (Tableau 4Tableau 5).

[8] Au total, trois valeurs ont été supprimées suite à ce traitement (vitesse du contrôle visuo-moteur : suppression d'une valeur ; vitesse d'écriture manuscrite : suppression d'une valeur ; score total de dictée de mots : suppression d'une valeur).

Tableau 4: Statistiques descriptives des mesures réalisée en T1 (N = 40)

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
1. Âge (année)	9 ans, 8 mois	4 mois	8 ans, 6 mois	10 ans 4 mois
Dextérité manuelle				
2. Dextérité MD (nombre de chevilles placées)	13,1	1,65	10	16
3. Dextérité MND (nombre de chevilles placées)	11,8	1,70	8	16
4. Coord. Bim. (nombre de chevilles placées)	21,1	3,83	12	28
5. Assemblage (nombre d'éléments placés)	24,3	6,46	9	37
Compétences graphomotrices				
6. Contrôle VM (score /192)	183	6,99	163	192
7. Contrôle VM (vitesse en cm/s)	3,59	1,57	1,03	7,94
8. Copie de figures (score /54)	32,6	4,47	21	41
9. Copie de figures (vitesse en cm/s)	2,72	0,86	1,20	4,70
Ecriture manuscrite				
10. Alphabet (vitesse en cm/s)	2,09	0,98	0,55	5,21

Note. MD : Main dominante ; MND : Main non dominante ; Coord. Bim. : Coordination bimanuelle ; VM : visuo-moteur.

Tableau 5: Statistiques descriptives des mesures réalisées en T2 (N = 32)

	Moyenne	Ecart-type	Minimum	Maximum
1. Âge (année)	10 ans 11 mois	4 mois	9 ans 8 mois	11 ans et 5 mois
2. Identification de mots (nombre de mots rayés)	74,8	16,9	34	104
3. Dictée de mots/pseudo-mots (/30)	25,5	3,70	15	30
4. Dictée de texte - lexical (/30)	19,2	4,95	7	27
5. Dictée de texte - grammatical (/23)	13,7	4,59	3	23
6. Compréhension	10,1	1,81	6	12

3.2. RELATIONS ENTRE LA DEXTERITE MANUELLE, LES COMPETENCES GRAPHOMOTRICES ET L'ECRITURE MANUSCRITE

Dans un premier temps des analyses corrélationnelles entre les différentes variables de motricité fine ont été réalisées. Elles apparaissent dans le tableau ci-dessous (Tableau 6).

Les mesures de dextérité manuelle (dextérité manuelle de la main dominante, de la main non dominante, de coordination bimanuelle et d'assemblage) sont fortement corrélées entre elles (coefficients de corrélation de .32 à .58). Cependant, elles ne sont pas corrélées significativement aux compétences graphomotrices : les coefficients de corrélation sont très faibles à modérés (avec le contrôle visuo-moteur : .02-.28 ; avec la copie de figures : .08 à .25).

Concernant les deux tâches graphomotrices, les scores et les vitesses sont négativement corrélés pour chacune des deux tâches, ce qui indique que les élèves obtenant un bon score sont généralement plus lents pour réaliser la tâche[9] (contrôle visuo-moteur : -.34 ; copie de figures : -.38). Par ailleurs, la tâche de contrôle visuo-moteur est significativement corrélée à la vitesse de copie de figure (coefficients de corrélations de -.32 et .47) mais pas au score de qualité de la copie (coefficients de corrélations de .19 et -.10).

Enfin, seule une corrélation significative est retrouvée entre l'écriture manuscrite et les variables motrices : la vitesse d'écriture manuscrite est positivement corrélée à la dextérité manuelle de la main dominante (r = .48). Par conséquent, aucune régression n'a été réalisée pour explorer la contribution distincte de la dextérité manuelle et des compétences graphomotrices sur l'automatisation de l'écriture.

[9] Notons que l'examen des nuages de points révèle des cas particuliers. Deux participants réalisent la tâche du subtest 1 très rapidement (vitesse de 7,9 cm/s) tout en ne faisant que peu d'erreur de tracé (score de 185 et 187 sur 192).

Tableau 6: Corrélations entre les différentes variables motrices et l'écriture manuscrite

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Dextérité manuelle									
1. Dextérité MD (score)	-	.58***	.32*	.43**	.23	-.04	.10	.25	.48**
2. Dextérité MND (score)		-	.51***	.43**	.08	.13	.08	.27	.25
3. Coord. Bim. (score)			-	.50**	.02	.11	.12	.25	.30
4. Assemblage (score)				-	.28	.16	.09	.19	.13
Compétences graphomotrices									
5. Contrôle VM (score)					-	-.34*	.19	-.32*	.21
6. Contrôle VM (vitesse)						-	-.10	.47**	.07
7. Copie de figures (score)							-	-.48**	-.03
8. Copie de figures (vitesse)								-	.27
Ecriture manuscrite									
9. Alphabet (vitesse)									-

Note. * $p < .05$; ** $p < .01$; *** $p < .001$

Note. MD : Main dominante ; MND : Main non dominante ; Coord. Bim. : Coordination bimanuelle ; VM : Visuo-moteur

3.3. RELATIONS ENTRE LA MOTRICITE FINE, L'ECRITURE MANUSCRITE ET LE LANGAGE ECRIT

3.3.1. Corrélations entre les habiletés motrices, l'écriture manuscrite et le langage écrit

Les corrélations entre les différentes variables de langage écrit et les variables motrices et cognitives sont reportées ci-dessous (Tableau 7). Aucune corrélation significative entre les variables de dextérité manuelle et de langage écrit n'est retrouvée. Plusieurs mesures de compétences graphomotrices sont significativement corrélées au langage écrit. Ainsi, le score

obtenu à la tâche de contrôle visuo-moteur est corrélé au scores d'orthographe de mots (orthographe de mots et pseudo-mots : .39 ; orthographe lexicale – texte : .42). Quant à la vitesse, elle est corrélée significativement à l'orthographe grammaticale (r = .37). Le score de copie de figure est corrélé significativement à la lecture et l'orthographe de mots (identification de mots : .41 ; orthographe de mots et pseudo-mots : .38). Enfin, la vitesse d'écriture est corrélée à l'identification de mots et à l'orthographe lexicale et grammaticale (texte) (identification de mots : .44 ; orthographe lexicale – texte : 47 ; orthographe grammaticale – texte : .38).

Tableau 7: Corrélations entre les différentes variables motrices et cognitives et les mesures du langage écrit

	Ident. mots	Dictée mots/PM	Dictée texte (lexical)	Dictée texte (grammatical)	Compréhension
Dextérité manuelle					
Dextérité MD (score)	.13	-.002	.09	.11	.06
Dextérité MND (score)	-.06	-.19	.03	-.02	-.10
Coord. Bim. (score)	-.14	.05	.01	.18	.11
Assemblage (score)	-.14	.09	-.04	.07	.09
Compétences graphomotrices					
Contrôle VM (score)	.22	**.39***	**.42***	.20	.30
Contrôle VM (vitesse)	.04	.15	.14	**.37***	.10
Copie de figures (score)	**.41***	**.38***	.26	.34#	.31#
Copie de figures (vitesse)	-.19	-.16	-.05	-.04	-.34#
Ecriture manuscrite					
Alphabet (vitesse)	**.44***	.22	**.47****	**.38***	.12

* $p < .05$; # $p < .10$

Note. MD : Main dominante ; MND : Main non dominante ; Coord. Bim. : coordination bimanuelle ; VM : visuo-moteur ; Ident. Mots : identification de mots ; PM : pseudo-mots

3.3.2. Influence distincte de la motricité fine et de l'écriture manuscrite

Des modèles de régression hiérarchique ont été réalisés pour chacune des variables de langage écrit afin de déterminer si les différentes variables corrélées au langage écrit prédisent de façon indépendantes le niveau de langage écrit (Tableau 8). Seules les variables corrélées significativement à chacune des variables du langage écrit ont été intégrées au modèle ; par conséquent, les variables de dextérité manuelle (dextérité de la main dominante, de la main non dominante, coordination bimanuelle et assemblage) et de vitesse pour la tâche de copie de figures n'ont pas été intégrées dans les analyses de régression. Par ailleurs, en nous basant sur les travaux antérieurs (Suggate et al., 2016), nous nous attendions à ce que les tâches de contrôle visuo-moteur et de copie de figures mesurent une même habileté : les compétences graphomotrices. Toutefois, étant donné que les analyses ne rapportent pas de corrélations significatives entre elles, elles ont été intégrées successivement dans le modèle de régression plutôt que simultanément. Les variables ont été ajoutées au modèle dans l'ordre suivant : le contrôle visuo-moteur (score et vitesse), la copie de figures (score uniquement) et l'écriture manuscrite.

Tableau 8: Analyses de régressions multiples prédisant les scores de langage écrit

	Identification de mots		Dictée mots pseudo-mots		Dictée texte (lexical)		Dictée (texte) (grammatical)	
	ΔR^2	β	ΔR^2	β	ΔR^2	β	ΔR^2	β
Modèle 1	-		-		-		-	
Contrôle VM (score)		-		.44*		.45*		-
Contrôle VM (vitesse)		-		-		-		.36*
Modèle 2	-		.09$^{\#}$		-		-	
Contrôle VM (score)		-		.38*		-		-
Contrôle VM (vitesse)		-		-		-		-
Copie de figures (score)		.40*		.31$^{\#}$		-		-
Modèle 3	.18*		-		.17*		.13*	
Contrôle VM (score)		-		-		.39*		-
Contrôle VM (vitesse)		-		-		-		.35*
Copie de figures (score)		.39*		-		-		-
Ecriture manuscrite		.42*		-		.41*		.36*

* $p < .05$; $^{\#}$ $p < .10$

Les différents modèles de régressions réalisées indiquent que les mesures graphomotrices (i.e. contrôle visuo-moteur et copie de figures) et l'écriture manuscrite expliquent une part de la variance des scores ultérieurs d'identification de mots (39%), d'orthographe de mots (31%), d'orthographe lexicale (texte) (37%) et d'orthographe grammaticale (texte) (26%). De plus, les résultats montrent que la vitesse d'écriture manuscrite et les mesures graphomotrices ont une contribution distincte. Ainsi, le niveau d'identification de mots est prédit à la fois par la copie de figures (15%) et par l'écriture manuscrite (18%). De façon similaire, la variance des scores d'orthographe lexicale (texte) et grammaticale (texte) est expliquée à la fois par le contrôle visuo-moteur (respectivement : 15% et 12%) et par la vitesse d'écriture (respectivement 17% et 13%). Enfin, bien que le score d'orthographe de mot isolés soit corrélé à la fois aux scores obtenus sur la tâche de contrôle visuo-moteur et de la copie de figures, seul le contrôle visuo-moteur explique significativement la variance quand les deux prédicteurs sont intégrés dans le modèle.

4. DISCUSSION

Plusieurs auteurs ont souligné la nécessité de dissocier différentes compétences de motricité fine pour expliquer le lien entre la motricité et l'apprentissage du langage écrit (Carlson et al., 2013; Suggate et al., 2016). En effet, ils proposent que les compétences graphomotrices, plus impliquées dans l'écriture manuscrite, soient en conséquence de meilleurs prédicteurs de l'apprentissage du langage écrit. Cependant, actuellement la dextérité manuelle, les compétences graphomotrices, l'écriture manuscrite et le langage écrit ont rarement été dissociés au sein d'une même étude. Par exemple, Greenburg et al. (2020) ne distinguent pas les compétences graphomotrices non langagières de l'écriture manuscrite. Par ailleurs, cette hypothèse n'a été formulée et partiellement testée que chez des élèves en début d'apprentissage de l'écrit (i.e. scolarisés en maternelle ou CP) (Doyen et al., 2017; Greenburg et al., 2020; Pitchford et al., 2016; Suggate et al., 2016). Or, il est nécessaire de démontrer que les habiletés motrices prédisent le niveau ultérieur de langage écrit chez des élèves plus âgés, chez qui les liens entre motricité et écriture manuscrite tend à diminuer avec l'automatisation du geste graphique (Karlsdottir & Stefansson, 2002). Afin de répondre à ces questions, nous avons étudié les relations entre différentes habiletés motrices (dextérité manuelle et habiletés graphomotrices), l'écriture manuscrite et l'apprentissage du langage écrit dans une étude longitudinale menée chez des élèves de CM1-CM2.

4.1. RELATIONS ENTRE LES HABILETES MOTRICES ET L'ECRITURE MANUSCRITE CHEZ LES ELEVES DE CM1.

Nous avons cherché dans un premier temps à évaluer les relations entre les deux types d'habiletés motrices (dextérité manuelle et habiletés graphomotrices) et l'écriture manuscrite chez des élèves de CM1. En effet, selon Suggate et al. (2018), le lien entre les habiletés motrices et le langage écrit découlerait de l'implication de la motricité dans le développement de l'écriture manuscrite. Plus précisément, ces auteurs proposent que le lien entre la dextérité manuelle et l'écriture manuscrite soit lui-même sous-tendu par les compétences graphomotrices non langagières qui permettent la manipulation du stylo.

L'hypothèse formulée était que les deux types d'habiletés motrices évaluées dans l'étude (dextérité manuelle et habiletés graphomotrices) soient corrélées à l'écriture manuscrite. De plus, en accord avec l'hypothèse de Suggate et al. (2018) (Figure 6a), nous nous attendions à ce que des analyses de régressions révèlent que la relation entre la dextérité manuelle et l'écriture manuscrite soit sous-tendue, au moins partiellement, par les habiletés graphomotrices (i.e. diminution ou disparition de l'effet de la dextérité manuelle sur l'écriture manuscrite suite à l'inclusion des habiletés graphomotrices dans le modèle de régression). Notons toutefois qu'une hypothèse alternative basée sur les travaux de Weintraub et Graham (2000) suggère que ces deux types de compétences influencent distinctement l'écriture manuscrite (Figure 6b). Leurs résultats indiquent en effet que la dextérité manuelle prédit la présence d'un trouble de l'écriture indépendamment des compétences graphomotrices, ce qui suggère que ces deux types d'habiletés motrices renvoient à différents processus, tous deux impliqués dans l'acquisition de l'écriture manuscrite.

4.1.1. Relations entre les deux types d'habiletés motrices

En premier lieu, l'existence de liens entre différentes mesures de la motricité fine – la dextérité manuelle et les habiletés graphomotrices – a été testée au travers d'analyses corrélationnelles. Les résultats indiquent que les différentes mesures de dextérité manuelle (dextérité de la main dominante, de la main non dominante et coordination bimanuelle) sont fortement corrélées entre elles. Des résultats similaires sont retrouvées entre les différentes mesures graphomotrices (contrôle visuo-moteur et copie de figure). Toutefois, aucune corrélation significative n'a été retrouvée entre la dextérité manuelle et les habiletés graphomotrices. Ces résultats confirment que les deux types d'habiletés mesurées sont distinctes.

4.1.2. Relations entre les deux types d'habiletés motrices et l'écriture manuscrite

En second lieu, les relations entre l'écriture manuscrite et les différentes habiletés motrices (dextérité manuelle et habiletés graphomotrices) ont été évaluées. Les résultats des analyses corrélationnelles montrent que certaines mesures de dextérité manuelle (dextérité de la main dominante) sont corrélées à l'écriture manuscrite. Ceci est concordant avec les études antérieures qui montrent que la dextérité manuelle prédit la qualité et la vitesse d'écriture manuscrite chez des élèves de la même tranche d'âge (Volman et al., 2006; Weintraub & Graham, 2000). A l'inverse, aucune corrélation significative n'est retrouvée entre les habiletés graphomotrices et l'écriture manuscrite, contrairement aux études antérieures qui rapportent des liens entre l'écriture manuscrite et le contrôle visuo-moteur (Bara & Gentaz, 2011 ; Kaiser et al., 2009) ou la copie de figures (Bara & Gentaz, 2011 ; Kaiser et al., 2009 ; Volman et al., 2006 ; Weintraub & Graham, 2000).

Bien qu'il ne soit pas possible d'interpréter l'absence de résultats significatifs – d'autant plus compte tenu de la petite taille de l'échantillon, plusieurs points de discussion peuvent être abordés pour expliquer l'absence de relation significative entre les habiletés graphomotrices et l'écriture manuscrite. Tout d'abord, notre étude s'est focalisée sur des élèves de CM1 sans difficultés d'apprentissage et les études pointant des liens entre les habiletés graphomotrices et l'écriture manuscrite ont étudié des populations plus jeunes - de CP (Bara & Gentaz, 2011) ou CE1 (Kaiser et al., 2009 ; Volman et al., 2006). Or, il a été montré que cette relation diminue au cours du temps (Karlsdottir & Steffanson, 2002). Il est donc possible que les habiletés graphomotrices non-langagières – telles que mesurées ici – ne jouent plus un rôle majeur dans l'écriture manuscrite en CM1. Plus spécifiquement, cette tranche d'âge se caractérise par des changements importants dans les processus d'écriture : en effet, aux alentours de 9 ans, l'enfant abandonne un mode de contrôle rétroactif visuel pour utiliser un contrôle proactif de l'écriture (Palmis et al., 2017). Or, plusieurs auteurs ont proposé que les compétences graphomotrices (copie de figure, tracé entre des lignes) sollicitent plus de compétences visuo-motrices et visuo-spatiales que d'autres tâches de motricité fine (e.g. Carlson et al., 2013 ; Greenburg et al., ; Weintraub & Graham, 2000). Selon ces auteurs, la distinction entre les tâches papier-crayon (e.g. copie de figure) et les tâches de dextérité manuelle (e.g. déplacement de chevilles) repose sur l'implication du traitement visuel plutôt que sur le contrôle moteur du stylo. Il est possible que les compétences dites graphomotrices dans cette étude (i.e. copie de figure et contrôle visuo-moteur) évaluent en réalité le traitement visuo-moteur. De ce fait, elles seraient impliquées dans l'écriture manuscrite quand le tracé des lettres s'appuie sur un contrôle rétroactif visuel (i.e. chez les élèves plus jeunes). A l'inverse, ces compétences seraient moins impliquées dans l'écriture manuscrite quand

le recourt à ce type de contrôle diminue. De plus, nous avons utilisé ici une mesure de la *vitesse* d'écriture. Or, la majorité des études rapportant des liens entre les compétences graphomotrices et l'écriture a mesuré la *qualité* de l'écriture (e.g. qualité des lettres produite) (Kaiser et al., 2009 ; Volman et al., 2006). Chez l'adulte expert, le retrait de feedbacks visuels lors de l'écriture semble affecter principalement la qualité du produit (orientation des lettres ou des mots) plutôt que la dynamique du tracé (Palmis et al., 2017). En conséquence, des difficultés lors des tâches graphomotrices – correspondant plutôt à un traitement visuo-moteur altéré – pourraient être en lien avec la qualité du produit plutôt que la vitesse de l'écriture, chez des élèves plus âgés.

Pour conclure, contrairement aux hypothèses formulées, nos résultats ne permettent pas de confirmer que le lien entre les habiletés motrices et le développement de l'écriture manuscrite est expliqué par les compétences graphomotrices chez des élèves de CM1. En effet, aucun lien significatif n'est retrouvé entre la dextérité manuelle et les compétences graphomotrices, ni entre les compétences graphomotrices et l'écriture manuscrite. Par contre, une mesure de la dextérité manuelle est corrélée à l'écriture manuscrite. Certains auteurs ont proposé de distinguer les différentes habiletés motrices en se basant sur l'implication du traitement visuel dans la tâche plutôt que sur l'utilisation d'un stylo. Par exemple, Weintraub et Graham (2000) ont distingué la dextérité manuelle (i.e. séquence digitale), qui jouerait un rôle dans l'exécution du programme moteur de l'écriture, des habiletés visuo-motrices (i.e. copie de figure), qui renverraient plutôt au contrôle visuel du mouvement. Ces deux habiletés prédisent toutes les deux l'automatisation du geste graphique chez des élèves de CM2 présentant des troubles de l'écriture et renvoient à différents processus impliqués dans l'écriture manuscrite. Dans la même étude, les auteurs proposent que le traitement visuo-moteur joue un rôle moins important que les processus moteurs chez les experts (Palmis et al., 2017; Weintraub & Graham, 2000). Les résultats de notre étude menée chez des élèves de CM1 sans difficultés, confortent cette hypothèse puisque seul le contrôle moteur et non le traitement visuo-moteur semble relié à l'écriture manuscrite. D'autres travaux comparant différentes tranches d'âge pourraient permettre de confirmer l'évolution des liens entre les habiletés visuo-motrices (e.g. copie de figure) et l'écriture manuscrite. Plus spécifiquement, il est attendu que la dextérité manuelle comme les habiletés graphomotrices (i.e. visuo-motrices) prédisent le niveau d'écriture manuscrite chez les élèves qui n'ont pas encore automatisé l'écriture (e.g. avant 9 ans) et que seule la dextérité manuelle prédise significativement la vitesse d'écriture chez les élèves plus âgés. Enfin, il est important de souligner que le peu de corrélations significatives retrouvé dans cette étude est certainement lié au petit échantillon. Il est donc important de les interpréter avec précautions. D'autres études impliquant un plus grand nombre de participants sont nécessaires pour étayer ces interprétations.

4.2. LES HABILETES MOTRICES COMME PREDICTEUR DE L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT EN CM2

Le second objectif de l'étude était de préciser les liens entre différentes compétences motrices et l'apprentissage du langage écrit chez des élèves de CM1-CM2. Conformément aux résultats de travaux antérieurs, menés chez des élèves plus jeunes, nous nous attendions à ce que les différentes mesures de la motricité évaluées soient corrélées à différentes dimensions du langage écrit et notamment à l'identification de mots (Suggate et al., 2016) et à l'orthographe de mots (Cameron et al., 2012; Doyen et al., 2017). Des régressions hiérarchiques ont également été effectuées pour tester l'hypothèse proposant que l'effet des habiletés motrices sur le langage écrit soit expliqué par l'écriture manuscrite.

4.2.1. Quels prédicteurs de l'apprentissage du langage écrit en CM1 ?

Tout d'abord, des corrélations ont été réalisées entre les différentes mesures motrices et le langage écrit (identification de mots, orthographe et compréhension écrite). Les analyses indiquent que les performances de dextérité manuelle ne sont pas corrélées significativement avec les différentes mesures du langage écrit. A l'inverse, les différentes mesures graphomotrices sont reliées significativement au niveau de langage écrit ultérieur. Le contrôle visuo-moteur (i.e. tracé entre deux lignes) est en lien avec l'orthographe lexicale et grammaticale. La capacité à recopier une figure est également reliée aux mesures d'identification et d'orthographe de mots. En outre, des corrélations proches de la significativité sont également retrouvées entre la copie de figures et les autres mesures du langage écrit (orthographe grammaticale et compréhension écrite). Les analyses de régression confirment que les deux compétences graphomotrices évaluées en CM1 prédisent le niveau ultérieur du langage écrit, évalué un an plus tard en CM2. Ces résultats sont en accord avec des études antérieures menées chez des élèves de grande section de maternelle qui ont montré que seules les habiletés graphomotrices (langagières et non langagières), prédisent significativement le niveau ultérieur du langage écrit (Dinehart & Manfra, 2013; Greenburg et al., 2020). Nos résultats confirment donc que les compétences graphomotrices semblent être de meilleurs prédicteurs du niveau ultérieur du langage écrit que la dextérité manuelle. Cet effet prédictif ne se limite pas aux élèves en début d'apprentissage du langage écrit (Greenburg et al., 2020)mais perdure chez des élèves de CM1-CM2.

4.2.2. Contribution distincte des habiletés graphomotrices et de l'écriture manuscrite

Il avait été proposé que les compétences graphomotrices prédisent le développement des compétences de langage écrit au travers de l'écriture manuscrite (Cameron et al., 2016; Suggate et al., 2016). Cependant, l'examen des corrélations présentées dans les paragraphes précédents

indique que les compétences graphomotrices ne sont pas en lien avec la vitesse d'écriture manuscrite bien qu'elles soient reliées aux mesures de lecture et d'orthographe. Ces résultats ne soutiennent donc pas l'hypothèse d'une médiation par l'écriture manuscrite (Suggate et al., 2018) et ne conforte pas les résultats que nous avions retrouvés chez des élèves plus jeunes de CE2 (voir Etude 1.1., p. 73).

Par ailleurs, les analyses de régression indiquent que l'effet des compétences graphomotrices sur le langage écrit perdure après contrôle de l'écriture manuscrite dans les modèles de régression. Ceci suggère qu'un autre facteur que l'écriture manuscrite explique le lien entre ces compétences de motricité fine et le langage écrit. Dans l'étude précédente, nous avons confirmé l'existence d'un autre mécanisme explicatif chez des élèves de CE2 : celui d'une médiation par les fonctions exécutives (Cameron et al., 2016; Oberer et al., 2018; Suggate et al., 2018) (voir Etude 1.1., p.73). Plusieurs études de médiation avaient déjà montré que ces habiletés sont en lien à la fois avec les compétences motrices et avec la réussite scolaire (Oberer et al., 2018; Schmidt et al., 2017). Plus spécifiquement, Cameron et al. (2016) ont avancé l'hypothèse que les tâches graphomotrices, telles que la copie de figures, impliquent également les fonctions exécutives, et que ces dernières puissent être un facteur confondant lors de l'étude du lien entre motricité et langage écrit. Plus récemment, Sulik et al. (2018) ont étudié les liens entre les habiletés graphomotrices, évaluées au travers d'une tâche de copie de figures, les fonctions exécutives (inhibition, flexibilité et mémoire de travail phonologique) et les performances académiques (mathématiques et niveau d'anglais) chez 343 élèves de CE2, CM1 et CM2. Pour cela, ils ont évalué ces différentes compétences au début d'année scolaire, puis six mois plus tard en fin d'année scolaire. Les résultats de cette étude longitudinale indiquent que les compétences graphomotrices sont des prédicteurs du niveau scolaire ultérieur. En outre, une analyse de médiation indique que cet effet est sous-tendu par les fonctions exécutives.

Nos résultats vont donc à l'encontre de l'hypothèse de Suggate et al. (2016) et suggèrent que l'effet des habiletés graphomotrices sur l'apprentissage du langage écrit est principalement sous-tendu par les fonctions exécutives plutôt que par l'écriture manuscrite chez des élèves de CM1-CM2. Notons cependant que la tranche d'âge étudiée peut faire varier les résultats : il est possible que les habiletés graphomotrices sous-tende le lien entre dextérité manuelle et écriture manuscrite chez des élèves en début d'apprentissage, comme proposé par Suggate et al. (2016), et que les relations entre les différentes habiletés motrices évoluent quand l'écriture commence à s'automatiser, comme c'est le cas en CM2. Par ailleurs, des limites méthodologiques dans notre étude – comme la petite taille de l'échantillon – peuvent expliquer le peu de corrélations significatives retrouvées. De plus, du fait de la taille de l'échantillon, les hypothèses de médiations ont été testées au travers de régressions hiérarchiques. Néanmoins, cette approche présente des

limites et une méthode plus adaptée pour tester les hypothèses de médiation, comme la modélisation par équations structurales, serait préférable.

5. CONCLUSION

Dans la présente étude, nous avons cherché à évaluer l'influence distincte de la dextérité manuelle et des habiletés graphomotrices sur l'écriture manuscrite et sur l'apprentissage du langage écrit. Les résultats confirment que les habiletés graphomotrices – mais pas la dextérité manuelle – prédisent significativement le niveau ultérieur de la lecture et de l'écriture et permet de généraliser ce résultat à des élèves de CM1-CM2. Cependant, contrairement à nos hypothèses, les résultats ne permettent pas de confirmer que les habiletés graphomotrices sont plus impliquées dans l'automatisation de l'écriture manuscrite que la dextérité manuelle. Par ailleurs, des analyses de régressions rapportent que les compétences graphomotrices prédisent le langage écrit au-delà de l'écriture manuscrite, ce qui soutient l'existence d'une autre mécanismes explicatif – comme l'hypothèse d'une médiation par les fonctions exécutives – testée dans l'étude précédente.

CONCLUSION DU CHAPITRE 6

Dans ce chapitre, plusieurs études s'intéressant aux relations entre les habiletés motrices et l'apprentissage du langage écrit chez des élèves du CE2 au CM2 ont été présentées.

Dans la première étude, nous avons cherché à identifier les mécanismes expliquant la relation entre les habiletés motrices et l'apprentissage du langage écrit. Les résultats montrent que deux mécanismes explicatifs complémentaires doivent être considérés : une médiation par les fonctions exécutives et une médiation par l'écriture manuscrite. De plus, les facteurs expliquant l'effet de la motricité sur le langage écrit dépendent de la dimension évaluée. L'écriture manuscrite explique le lien entre les habiletés motrices et l'apprentissage des compétences de bas niveau (lecture et orthographe de mots) et des compétences rédactionnelles. Les fonctions exécutives expliquent l'effet de la motricité sur les compétences de bas niveau (lecture et orthographe de mots) et sur la compréhension écrite.

Dans la seconde étude, nous avons cherché à identifier quelles sont les compétences motrices en lien avec l'apprentissage du langage écrit chez des élèves de CM1-CM2. Les résultats suggèrent que les compétences graphomotrices (e.g. copier une figure) sont de meilleurs prédicteurs du niveau ultérieur de langage écrit que les habiletés non graphomotrices (e.g. déplacer des pions). De plus, les résultats indiquent que l'effet des compétences graphomotrices n'est pas totalement expliqué par l'automatisation de l'écriture manuscrite. En effet, les modèles de régressions hiérarchiques indiquent que les compétences graphomotrices prédisent le niveau de langage écrit indépendamment de l'écriture manuscrite.

Les deux études présentées dans ce chapitre apportent chacune un éclairage différent sur le lien entre motricité et langage écrit. La première étude utilisant une méthode de modélisation par équations structurales permet de conforter l'existence de liens entre les habiletés motrices et le niveau de langage écrit dans un plus grand échantillon et de tester les hypothèses de médiations. La seconde étude permet quant à elle d'analyser finement l'influence distincte de différentes habiletés motrices. Cependant, le faible échantillon limite l'interprétation : il n'est pas possible d'utiliser des analyses de médiation et l'absence de résultats significatifs retrouvés (par exemple, entre les mesures de dextérité manuelle et les mesures de langage écrit) peuvent être la conséquence de la faible puissance. Cependant, du fait de la durée du protocole, le nombre de mesures motrices est plus réduit. Ces mesures sont réunies dans une même variable latente et l'influence distincte de différentes habiletés motrices n'a pas été étudiée.

Pour conclure, les études présentées dans ce chapitre soutiennent l'hypothèse de l'influence d'un prédicteur non langagier – la motricité fine, sur l'apprentissage du langage écrit. Cependant, l'utilisation de méthodes corrélationnelles dans les deux études limite l'interprétation et des études interventionnelles doivent être réalisées pour confirmer les liens de causalité testés dans les modèles. Par ailleurs, d'autres habiletés non langagières – comme les habiletés rythmiques – pourraient être impliquées dans l'apprentissage du langage écrit. Cette question sera abordée dans le chapitre suivant.

CHAPITRE 7 : RELATIONS ENTRE LES HABILETES RYTHMIQUES ET L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT DANS LE DEVELOPPEMENT TYPIQUE

Au cours de la partie précédente nous nous sommes intéressés à la relation entre un prédicteur langagier, la motricité fine, et l'apprentissage du langage écrit. Nos résultats confirment les liens entre ce prédicteur et les compétences de langage écrit de bas niveau comme de haut niveau. Toutefois, la motricité n'est pas la seule habileté non langagière à avoir été mise en lien avec l'apprentissage du langage écrit. En effet, un nombre croissant d'études rapporte que la capacité à percevoir et à produire un rythme non langagier est en lien avec la maîtrise de la lecture que ce soit chez les élèves dyslexiques (Flaugnacco et al., 2014; Goswami, 2011; Huss et al., 2011) ou chez les élèves sans trouble (González-Trujillo et al., 2014; Ozernov-Palchik et al., 2018; Tierney & Kraus, 2014). Ces relations se retrouvent dès la maternelle (e.g. Ozernov-Palchik et al., 2018) mais aussi chez des élèves plus âgés de primaire (e.g. en CE2, González-Trujillo et al., 2014) ou chez des adolescents (Tierney & Kraus, 2014). Malgré l'abondance des travaux rapportant l'existence de ces relations, très peu d'études ont cherché à identifier les mécanismes explicatifs de ce lien dans le développement typique. En outre, la majorité de ces études s'est intéressée aux relations entre les habiletés rythmiques et l'apprentissage de la lecture mais pas aux autres dimensions du langage écrit. Or, les hypothèses de médiation avancées dans la littérature (i.e. médiation par les habiletés phonologiques et/ou par les fonctions exécutives) suggèrent que l'effet des habiletés rythmiques ne se limiterait pas à l'apprentissage de la lecture mais influencerait également l'apprentissage de la production écrite. Enfin, comme nous l'avions souligné dans la partie sur la motricité fine, l'étude des relations entre les habiletés rythmiques et le langage écrit souffre de l'utilisation de mesures différentes d'une étude à l'autre (e.g. tâches de perception et production rythmiques) alors même qu'elles peuvent renvoyer à des processus distincts. Ces différences peuvent expliquer en partie les divergences retrouvées entre certaines études.

Dans ce chapitre, nous chercherons à préciser le lien entre les habiletés rythmiques et l'apprentissage du langage écrit chez des élèves de CE2 et CM1. Dans une première étude, les liens entre les habiletés rythmiques et différentes dimensions du langage écrit seront évalués. De plus, nous testerons deux hypothèses explicatives : celle d'une médiation par la conscience phonologique et celle d'une médiation par les fonctions exécutives. Dans une seconde étude, les relations entre différentes habiletés rythmiques et l'apprentissage du langage écrit seront étudiées afin de spécifier l'influence distincte ou conjointe de ces différentes habiletés rythmiques.

ETUDE 2.1. MECANISMES SOUS-TENDANT LES LIENS ENTRE LES HABILETES RYTHMIQUES ET L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT CHEZ LES ELEVES DE CE2

1. INTRODUCTION

L'existence d'un lien entre habiletés rythmiques et l'apprentissage de la lecture a été rapporté à la fois dans les troubles du langage comme la dyslexie (Thomson et al., 2006; Thomson & Goswami, 2008; Wolff, 2002) et dans le développement typique (David et al., 2007; Ozernov-Palchik et al., 2018; Zhang et al., 2017). L'une des hypothèses les plus souvent proposée pour expliquer ce lien est celle d'une médiation par la conscience phonologique. En effet, les habiletés rythmiques permettraient de découper le langage en unités sous-lexicales – syllabes, rimes et phonèmes – et influencerait donc indirectement l'apprentissage du langage écrit (Goswami, 2011; Tierney & Kraus, 2014). Cette hypothèse est soutenue par plusieurs résultats qui rapportent d'une part que les habiletés rythmiques prédisent le niveau de conscience phonologique ultérieur (David et al. 2007; Goswami et al., 2011) et d'autre part que les entraînements musicaux et rythmiques améliorent la conscience phonologique chez les élèves dyslexiques (Bhide et al., 2013; Thomson et al., 2013) et chez les élèves de maternelle (Moritz et al., 2013). De plus, l'effet indirect de la perception rythmique sur le langage écrit à travers la conscience phonologique a été confirmé chez des élèves de maternelle (Ozernov-Palchik et al., 2018). Néanmoins, les évidences d'une médiation phonologique ne proviennent que de l'étude d'enfants avec des troubles du langage ou chez des élèves en début d'apprentissage du langage écrit. Cette hypothèse explicative doit être confirmée chez des élèves plus âgés. Par ailleurs, bien que l'étude de Ozernov-Palchik et al. (2018) confirme l'existence d'une médiation phonologique chez des élèves de maternelle, elle montre également un lien direct entre la perception de rythmes et le langage écrit – qui persiste malgré l'intégration des habiletés phonologiques dans le modèle. Ce résultat suggère que d'autres mécanismes expliquent également la relation entre les habiletés rythmiques et l'apprentissage du langage écrit. Nous proposons dans cette étude de tester l'hypothèse alternative d'une médiation par les fonctions exécutives. En effet, plusieurs études montrent des liens entre les fonctions exécutives et les habiletés rythmiques (Bailey & Penhune, 2010; Hansen et al., 2013; Tierney & Kraus, 2014). De plus, des études interventionnelles suggèrent que les activités sollicitant le rythme, comme la musique, améliorent le fonctionnement exécutif ce qui soutient l'hypothèse que les habiletés rythmiques influent sur l'apprentissage du langage écrit au travers des fonctions exécutives (Slater et al., 2017; Slevc et al., 2016).

Afin de tester ces deux hypothèses de médiation, les habiletés rythmiques, les fonctions exécutives, la conscience phonologique et le langage écrit ont été évalués chez des élèves de CE2

sans troubles des apprentissages. Différentes dimensions du langage écrit ont été mesurées : la lecture, l'orthographe, la compréhension écrite et la rédaction de texte. Des analyses de modélisation par équations structurales ont été utilisées pour étudier les relations entre les habiletés rythmiques et le langage écrit. L'objectif était en premier lieu d'examiner les relations entre les habiletés rythmiques et différentes dimensions du langage écrit, et, en second lieu de confirmer les deux hypothèses de médiation avancées dans la littérature pour expliquer ce lien (par les habiletés phonologiques et les fonctions exécutives). Comme pour l'étude précédente, des mécanismes explicatifs différents en fonctions des dimensions du langage écrit étudiées étaient attendus, avec une médiation par les habiletés phonologiques pour toutes les dimensions du langage écrit, et une médiation par les fonctions exécutives pour les compétences de haut niveau et (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**).

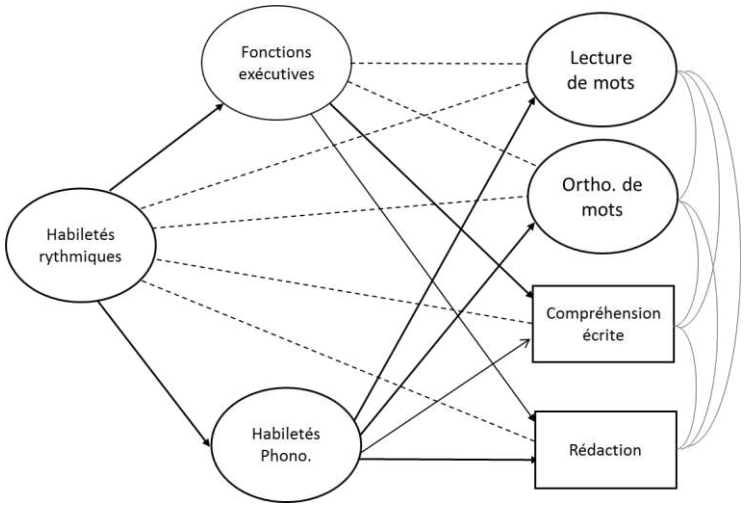

Figure 7: Relations attendues entre les habiletés rythmiques, les deux médiateurs potentiels (fonctions exécutives et habiletés phonologiques) et le langage écrit. Les traits pleins indiquent les relations attendues d'après les hypothèses formulées. Les traits en pointillé indiquent les autres relations testées dans les différents modèles de médiation.

2. METHODE

Cette étude s'inscrit dans un protocole de recherche de plus grande ampleur au cours de laquelle différentes habiletés motrices, langagières et cognitives ont été évaluées chez des élèves de CE2. Le détail de la procédure complète peut être retrouvé en annexes (voir Annexe 1, p.249).

2.1. PARTICIPANTS

Au total, 239 élèves de CE2 sans difficultés cognitives ou langagières ont été inclus dans cette étude (âge moyen = 8 ans et 6 mois ; écart-type = 4 mois ; 137 filles). Les élèves avec un quotient intellectuel non verbal inférieur à 70 ou ayant obtenu des scores déficitaires en lecture et en orthographe (i.e. inférieurs à 1,5 e.t.) ont été exclus de l'étude (voir Etude 1.1. p.75).

2.2. MATERIEL

2.2.1. Langage écrit

Différentes dimensions du langage écrit ont été évaluées. Les tâches de lecture et de dictée de mots et pseudo-mots issus de la BALE (Jacquier-Roux et al., 2010) ont été administrées pour évaluer la lecture et les compétences orthographiques. La compréhension écrite a été testée avec une tâche développée par Potocki et al. (2014). Enfin, la qualité de la rédaction a été évaluée avec une épreuve issue de la WOLD (Rust & Wechsler, 1996). Le détail de ces tests peut être retrouvé dans l'Etude 1.1. (p.75).

2.2.2. Habiletés rythmiques

Les habiletés rythmiques ont été évaluées à l'aide d'une tâche de synchronisation et de poursuite de rythme proposée dans l'étude de Wolff (2002). Cette tâche évalue plus précisément la production rythmique. Pendant la phase de *synchronisation*, il a été demandé au participant de se synchroniser pendant 20 secondes avec un métronome régulier en cliquant à l'aide d'une souris exactement en même temps que le son émis directement depuis l'ordinateur. Au cours de la phase de *poursuite de rythme*, le stimulus auditif a été retiré et l'enfant devait continuer à cliquer sur la même fréquence en l'absence du stimulus pendant 20 secondes. Les stimuli rythmiques ont été présentés à différentes fréquences de respectivement 1.5 Hz (soit un intervalle inter stimulus de 666 ms), 2 Hz (soit un ISI de 500 ms) et 2.5 Hz (soit un ISI de 400 ms). Pour chacune de ces fréquences, l'enfant devait réaliser successivement la tâche de synchronisation puis la tâche de poursuite de rythme.

La *précision* et la *variabilité* de la synchronisation ont été mesurées pour les deux tâches (synchronisation et poursuite de rythme) et pour chaque fréquence (1.5 Hz, 2 Hz et 2.5 Hz) (Thomson & Goswami, 2008 ; Wolff, 2002). La *précision* de la synchronisation correspondait à la moyenne des 15 intervalles intertap (ITIs) extraits au milieu de chaque bloc. La différence entre

l'IIT moyen du bloc et l'intervalle inter stimuli (IIS) permettait d'obtenir une mesure de la précision de synchronisation pour chaque condition. Cette mesure était ensuite transformée en valeur absolue, un score proche de 0 indiquant une précision importante et un score élevé, une faible précision. La *variabilité* de la synchronisation correspondait à l'écart-type des 15 IITs au milieu de chaque bloc. Au final, les mesures de précision et de variabilité de chaque condition (synchronisation et poursuite de rythme) et de chaque fréquence ont été moyennées afin de n'obtenir que deux mesures : une mesure de la précision et une mesure de la variabilité.

2.2.3. Fonctions exécutives

Comme pour la précédente étude, plusieurs tests ont été administrés afin d'évaluer les fonctions exécutives. Le subtest « Séquence Lettre-Chiffre » de la WISC-V (Wechsler, 2016) a été utilisé pour tester la mémoire de travail verbale. La mémoire de travail visuo-spatiale a été évaluée avec le subtest « Mémoire spatiale » de la WNV (Wechsler & Naglieri, 2009). Deux mesures calculées à partir du subtest « Inhibition » de la NEPSY-II (Korkman et al., 2012) ont été utilisées pour évaluer l'inhibition. Concernant la flexibilité mentale, deux tests ont été administrés : le Trail Making Test (Reitan, 1971) (flexibilité a) et le subtest « Petits Hommes Verts » de la TEA-Ch (Manly et al., 2006) (flexibilité b). Enfin, la Tour de Londres (Shallice et al., 1982) a été administrée pour évaluer la planification. Les tâches utilisées pour l'évaluation des fonctions exécutives sont détaillées dans l'Etude 1.1. (voir p.76).

2.2.4. Habiletés phonologiques

Conscience phonologique. La tâche de suppression de phonèmes issue de la BALE a été utilisée pour évaluer la conscience phonologique (Jacquier-Roux et al., 2010). Au cours de cet exercice, l'enfant devait produire un nouveau mot à partir d'un mot énoncé par l'expérimentateur en supprimant le phonème initial ou final (par exemple, dire [œil] après avoir supprimé le premier son /f/ du mot [feuille]). Un score total sur 20 a été calculé et utilisé comme variable observée pour le modèle.

Dénomination rapide. La dénomination rapide a été évaluée avec une tâche issue de la BALE (Jacquier-Roux et al., 2010) au cours de laquelle l'enfant devait nommer 25 images le plus vite possible. Le temps total de dénomination en secondes a été utilisé comme variable.

2.3. PROCEDURE

Les élèves ont réalisé l'ensemble des tâches au cours d'une session collective d'une heure et de deux sessions individuelles de 45 minutes. Les exercices de dictée de mots, compréhension écrite et rédaction ont été réalisés au cours de la session collective. La planification, la lecture de mots, la mémoire de travail phonologique, les habiletés rythmiques et la flexibilité mentale (TMT) ont été évaluées au cours de la première session individuelle. La flexibilité mentale (TEACh), la

conscience phonologique, l'inhibition et la mémoire de travail visuo-spatiale ont été évaluées au cours d'une seconde session individuelle. D'autres tâches évaluant la motricité fine ont également été administrées. Le détail de la procédure complète est présenté en Annexe (voir Annexe 1, p.249).

2.4. ANALYSES STATISTIQUES

En amont des analyses, les valeurs aberrantes (i.e. s'écartant de plus de 3 e.t. par rapport à la moyenne) ont été exclues. Les variables ne suivant pas une loi normale ont été transformées en appliquant une transformation carrée ou racine-carrée. Des analyses factorielles confirmatoires et des modèles d'équations structurales ont été réalisés à l'aide du package de R Lavaan pour modéliser les relations entre les habiletés rythmiques et le langage écrit. Après avoir comparé différents modèles, le modèle s'ajustant le mieux aux données a été retenu afin de tester les effets directs et indirects des habiletés rythmiques sur le langage écrit et de confirmer les possibles médiations.

3. RESULTATS

3.1. ANALYSES DESCRIPTIVES

Les analyses descriptives sont reportées dans le tableau ci-dessous (Tableau 9).

Tableau 9: Statistiques descriptives (moyenne, écart-types, minimum et maximum) des mesures de langage écrit, des habiletés rythmiques, des fonctions exécutives et des habiletés phonologiques de l'étude 2.1.

	Moyenne	Ecart-type	Min.	Max.
Langage écrit				
Lecture de mots réguliers (score /20)	17,73	1,90	12	20
Lecture de mots irréguliers (score /20)	10,31	4,07	2	20
Lecture de pseudo-mots (score /20)	15,60	2,46	8	20
Orthographe de mots réguliers (score /10)	7,17	2,09	1	10
Orthographe de mots irréguliers (score /10)	3,77	2,12	0	10
Orthographe de pseudo-mots (score /10)	7,55	1,71	2	10
Compréhension écrite (score /12)	9,12	2,18	3	12
Rédaction (score /10)	5,42	1,09	2.5	8
Habiletés rythmiques				
Précision de la synchronisation (différence entre l'IIT moyen et l'IIS en ms.)	34,51	19,36	2,23	109,74
Variabilité de la synchronisation (e.t. des IITs)	68,58	30,26	30,20	189,86
Compétences phonologiques				
Conscience phonologique (score /20)	13,53	4,14	3	20
Dénomination rapide (temps en s.)	24,13	5,24	15	43
Fonctions exécutives				
Mémoire de travail visuo-spatiale (score /32)	12,00	2,64	5	18
Mémoire de travail verbale (score /30)	14,62	3,56	4	20
Inhibition (a) (différence des temps entre les conditions en s.)	9,67	6,02	-8	30
Inhibition (b) (différence des temps entre les conditions en s.)	33,83	10,69	3	68
Flexibilité (a) : TMT (différence des temps entre les conditions en s.)	92,42	42,89	6	233
Flexibilité (b) : TeaCh (score/temps)	5,52	1,35	2,43	10
Planification (score /46)	19,14	6,66	3	37

Les résultats des corrélations indiquent que la précision[10] comme la variabilité de la synchronisation sont négativement corrélées à différentes mesures de langage écrit (Tableau 10). Plus spécifiquement, plusieurs corrélations significatives sont retrouvées entre les mesures de lecture et d'orthographe et les habiletés rythmiques. Concernant les compétences de haut niveau, seul la qualité de la rédaction est corrélée significativement à la précision de la synchronisation (r = -.18 ; p = .006), bien que des résultats tendent à montrer un lien entre la variabilité de la synchronisation et la compréhension écrite (r = -.12 ; p = .08). Les relations entre les habiletés rythmiques et les différents médiateurs (fonctions exécutives et habiletés phonologiques) peuvent être retrouvées en annexe (voir Annexe 2, p.252).

Tableau 10: Corrélations entre les habiletés rythmiques et de langage écrit

	Précision de la synchronisation	Variabilité de la synchronisation
Lecture de mots réguliers (score /20)	**-.16***	**-.16***
Lecture de mots irréguliers (score /20)	-.06	**-16***
Lecture de pseudo-mots (score /20)	-.07	-.06
Orthographe de mots réguliers (score /10)	**-.16***	-.10
Orthographe de mots irréguliers (score /10)	-.12#	**-.13***
Orthographe de pseudo-mots (score /10)	**-.18****	**-.15***
Compréhension écrite (score /12)	-.11	-.12#
Rédaction (score /10)	**-.18****	-.13#

** p < .01 ; * p < .05 ; # p < .10.

3.2. ANALYSES FACTORIELLES CONFIRMATOIRES

Avant de modéliser les liens entre les habiletés rythmiques et le niveau de langage écrit, une analyse factorielle confirmatoire (AFC) a été menée afin de confirmer que chacune de ces variables latentes prédisait significativement les différentes variables observées qui leur étaient associées.

[10] La variable précision renvoie en réalité à une mesure d'imprécision (i.e. écart par rapport au stimulus). Un score de 0 indique que le participant est donc parfaitement synchronisé sur le métronome (i.e. clic du participant exactement en même temps que le stimulus). A l'inverse, un score élevé indique un écart important entre la réponse du participant et le stimulus.

En accord avec les hypothèses formulées, sept variables latentes ont été distinguées dans l'AFC :

- Habiletés rythmiques : précision et variabilité de la synchronisation
- Fonctions exécutives : mémoire de travail verbale[11], mémoire de travail visuo-spatiale, inhibition (a), inhibition (b), flexibilité (a), flexibilité (b) et planification
- Habiletés phonologiques : conscience phonologique et dénomination rapide
- Lecture de mots : lecture de mots réguliers, irréguliers et pseudo-mots
- Orthographe de mots: orthographe de mots réguliers, irréguliers et pseudo-mots
- Compréhension : compréhension écrite
- Rédaction : qualité de la rédaction

L'examen de la solution reportant un cas de Heywood[12], la variable latente regroupant les habiletés phonologiques a été dissociée en deux variables (dénomination rapide et conscience phonologique). Une seconde AFC distinguant cinq variables latentes (e.g. habiletés rythmiques, fonctions exécutives, conscience phonologique, dénomination rapide et les quatre dimensions du langage écrit) a donc été menée. Les indices d'ajustement du modèle indiquent un bon ajustement aux données, $\chi^2(128) = 175{,}27$, $p = .004$, CFI = .91, RMSEA = .05, SRMR = .06. L'analyse des indices locaux révèle que toutes les variables observées sont significativement associées à leur variable latente respective.

3.3. COMPARAISON DE MODELES

Différents modèles de médiation modélisant les différentes hypothèses explicatives du lien entre les habiletés rythmiques et le langage écrit proposées dans la littérature ont été testés (Figure 8). Afin de confronter ces différentes hypothèses explicatives, les modèles ont été comparés en ajoutant ou retirant une à une des relations entre le prédicteur (habiletés rythmiques) et les médiateurs potentiels (habiletés phonologiques et fonctions exécutives). Les indices d'ajustement des différents modèles sont reportés dans le Tableau 11.

[11] Notons que la mémoire de travail verbale peut renvoyer à la fois aux habiletés phonologiques et aux fonctions exécutives (voir Chapitre 1). Cependant, en accord avec les analyses de l'étude précédente, nous avons choisi de la maintenir dans la variable latente « Fonctions exécutives » (voir Etude 1.1., p.71). Des corrélations entre la mémoire de travail phonologique et les habiletés phonologiques (conscience phonologique et dénomination rapide) sont toutefois intégrées dans l'ensemble des modèles de cette étude afin de tenir compte de la relation entre cette variable et les habiletés phonologiques.

[12] Les cas de Heywood désignent un ensemble de cas où la convergence du modèle amène à des solutions non acceptables (e.g. variances négatives, corrélations entre les variables supérieures à 1, estimations standardisées supérieures à 1).

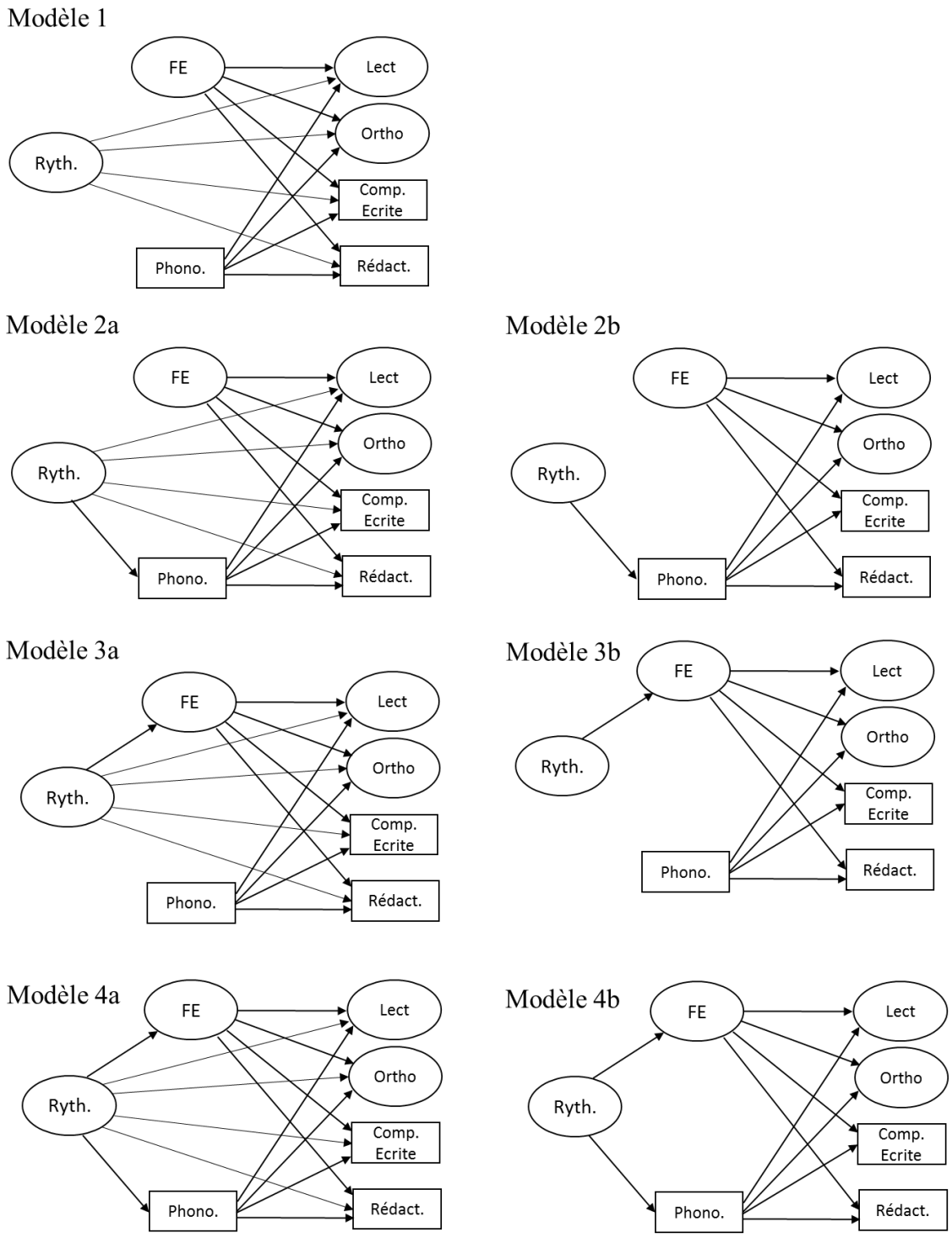

Figure 8 : Présentation des différents modèles de médiations testés pour expliquer la relation entre habiletés rythmiques et langage écrit : (1) Effet direct sans médiation, (2) Médiation par les habiletés phonologiques, (3) Médiation par les fonctions exécutives et (4) Double médiation. Les modèles présentés à gauche intègrent les effets directs du rythme sur le langage écrit (1, 2a, 3a et 4a). Les modèles présentés à droite intègrent les modèles sans les effets directs du rythme sur le langage écrit (2b, 3b et 4b).

Note. Ryth. : Habiletés rythmiques ; FE : fonctions exécutives ; Phono. : Habiletés phonologiques ; Lect : lecture de mots ; Ortho : orthographe de mots ; Comp. : compréhension ; Rédact : rédaction.

Tableau 11 : Indicateurs d'ajustement des différents modèles de médiations testés pour expliquer la relation entre habiletés rythmiques et le langage écrit. Les modèles représentant correctement les données (i.e. CFI ≥.90, RMSEA ≤.06, SRMR ≤ .09) sont indiqués en gras.

	CFI	RMSEA	SRMR	AIC
Modèle 1 *Effet direct*	**-**	-	-	-
Modèle 2a *Effet direct + indirect via la conscience phonologique*	**.90**	**.05** (.03-.06)	**.07**	8620,87
Modèle 2b *Effet indirect via la conscience phonologique*	**.89**	**.05** (.03-.06)	**.07**	8618,64
Modèle 3a *Effet direct + indirect via les fonctions exécutives*	**.91**	**.05** (.03-.06)	**.07**	8615,40
Modèle 3b *Effet indirect via les fonctions exécutives*	**.90**	**.05** (.03-.06)	**.07**	8614,12
Modèle 4a *Effet direct + effet indirect via les fonctions exécutives + effet indirect via la conscience phonologique*	**.90**	**.05** (.03-.06)	**.07**	8614,12
Modèle 4b *Effet indirect via les fonctions exécutives + la conscience phonologique*	**.91**	**.05** (.03-.06)	**.07**	8617,27

L'examen des indicateurs d'ajustement des différents modèles[13] suggère que les meilleurs modèles sont le modèle 2a représentant un effet direct des habiletés rythmiques sur le langage écrit et un effet indirect au travers des fonctions exécutives, et le modèle 4b qui comprend une double médiation.

Afin de tester statistiquement quel modèle représente le mieux les données, une méthode de comparaison de modèles a été utilisé. Dans un premier temps, les modèles 2a et 4a ont été comparés : la différence significative entre les modèles indique que l'ajout d'une relation entre les fonctions exécutives et les habiletés rythmiques améliore significativement le modèle (Satorra–

[13] Notons que le modèle 1 rapportant uniquement les effets directs des habiletés rythmiques sur le langage écrit ne s'ajuste pas aux données (cas de Heywood). Il n'est donc pas intégré dans les comparaisons de modèles par la suite.

Bentler $\Delta\chi^2 = 5{,}59$, $\Delta df = 1$, $p = .02$). A l'inverse, le test de Satorra-Bentler indique que le retrait de la relation entre habiletés phonologiques et habiletés rythmiques ne détériore pas significativement le modèle (Satorra–Bentler $\Delta\chi^2 = 2{,}12$, $\Delta df = 2$, $p = .35$). Le modèle 3a, plus parcimonieux que le modèle 4a, a donc été retenu. Pour finir, afin de tester l'hypothèse d'une médiation complète, les effets directs des habiletés rythmiques sur le langage écrit ont été retirés (modèle 3b). Le retrait de ces relations ne détériore pas significativement la qualité du modèle (Satorra–Bentler $\Delta\chi^2 = 6{,}72$, $\Delta df = 4$, $p = .15$). Le modèle 3b proposant uniquement un effet indirect au travers des fonctions exécutives a donc été conservé pour modéliser les relations entre les différentes variables latentes.

3.4. ANALYSE DE MEDIATION.

Pour finir, les effets directs et indirects des habiletés rythmiques sur le langage écrit ont été modélisés sur la base du modèle 3b, (Figure 9). Les indices d'ajustement sont corrects, $\chi^2(135) = 185{,}07$; $p = .003$, CFI = .90 ; RMSEA = .05 ; SRMR = .07. Les résultats montrent un effet significatif des habiletés rythmiques sur les fonctions exécutives ($\beta = -.37$, $p = .02$). Les fonctions exécutives sont également significativement reliées aux différentes dimensions du langage écrit (identification de mots : $\gamma = .44$, $p = .005$; orthographe de mots : $\gamma = .46$, $p = .003$; compréhension écrite : $\gamma = .39$, $p = .004$; rédaction : $\gamma = .26$, $p = .03$). L'effet indirect des habiletés rythmiques au travers des fonctions exécutives est significatif pour l'identification de mots ($\beta = -.16$, $p = .03$), l'orthographe de mots ($\beta = -.17$, $p = .02$) et la compréhension écrite ($\beta = -.14$, $p = .03$) et proche de la significativité pour la rédaction ($\beta = -.09$, $p = .06$).

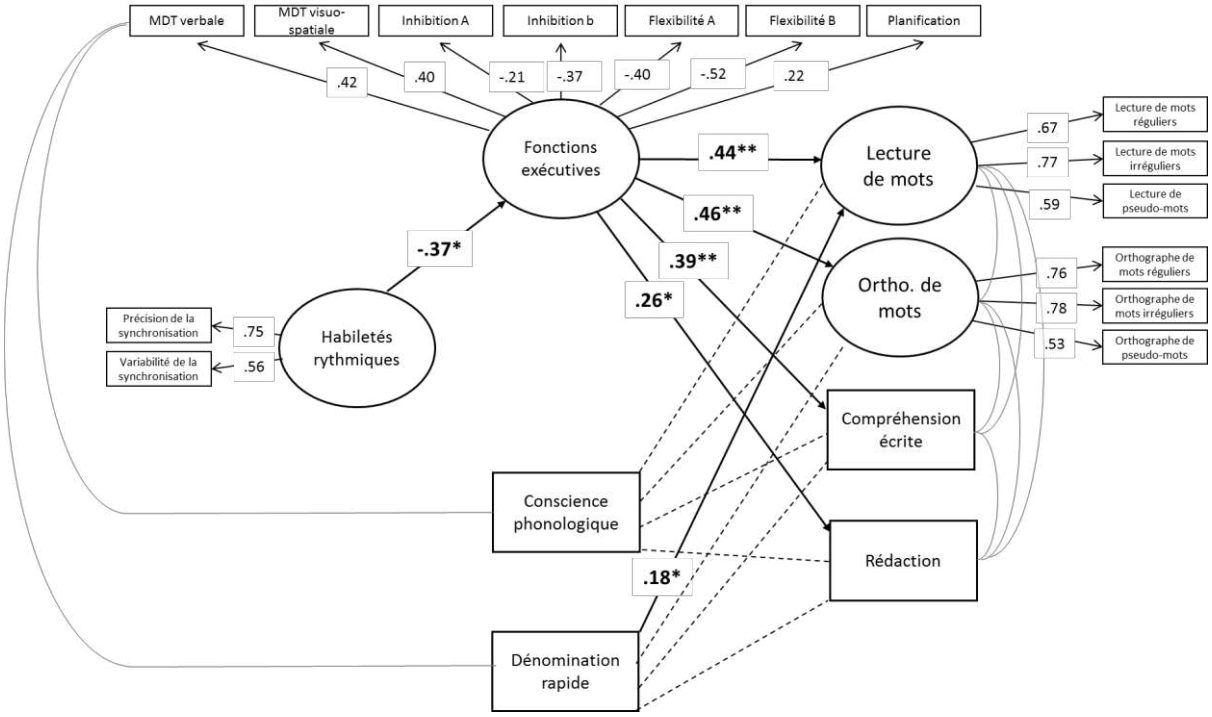

Figure 9 : Modèle de médiation final avec les habiletés rythmiques comme prédicteur, les fonctions exécutives comme médiateur et les différentes composantes du langage écrit (décodage, orthographe, compréhension de la lecture et composition) comme variable prédite. Les relations significatives entre les variables sont représentées par les traits pleins et les relations non significatives testées dans le modèle sont représentées par les traits discontinus.

Note. *p <.05 ; ** p < .01 ; *** p < .001

4. DISCUSSION

Dans cette étude la relation entre les habiletés rythmiques et l'apprentissage du langage écrit, et les facteurs explicatifs de ce lien, ont été examinés chez les élèves de CE2. Nos résultats confirment tout d'abord l'existence d'une relation entre les habiletés rythmiques et l'apprentissage du langage écrit chez les élèves de CE2 : plus les enfants parviennent à se synchroniser à un métronome régulier (i.e. peu de variabilité et peu d'écart par rapport au métronome), plus leur niveau de lecture et d'écriture est élevé. Les résultats de l'étude sont en accord avec ceux d'études antérieures qui rapportent des corrélations positives entre le niveau de lecture et la perception ou la production de rythme chez des élèves sans difficultés dans différentes tranches d'âge (David et al., 2007; Tierney & Kraus, 2014; Zhang et al., 2017). De plus, nos résultats confirment que les habiletés rythmiques sont en lien avec le niveau d'orthographe et confirment des études antérieurs qui rapportent des résultats similaires chez des élèves de CP (Lundetræ & Thomson, 2018) et de CM1 (Douglas & Willatts, 1994). Enfin, notre étude rapporte,

pour la première fois à notre connaissance, un lien entre les habiletés rythmiques et les compétences de haut niveau (i.e. qualité de la rédaction) chez des élèves sans troubles du langage.

L'objectif principal de l'étude était d'étudier les facteurs qui sous-tendent le lien entre habiletés rythmiques et langage écrit. Pour cela deux hypothèses de médiation ont été testées et confrontées au travers d'analyses de modélisations par équation structurales : l'hypothèse d'une médiation via les compétences phonologiques et l'hypothèse d'une médiation via les fonctions exécutives. L'examen des différents modèles suggère que l'effet du rythme sur le langage écrit est totalement médiatisé par les fonctions exécutives. Les implications de ces résultats sur les différentes hypothèses explicatives du lien entre rythme et langage écrit seront discutées par la suite.

4.1. MEDIATION PHONOLOGIQUE

Sur la base des modèles théoriques suggérant une implication des habiletés rythmiques dans le traitement phonologique (Goswami, 2011; Tierney & Kraus, 2014), nous avons tout d'abord testé l'hypothèse d'une médiation par la phonologie. Néanmoins, nos résultats ne soutiennent pas l'existence de cette médiation chez des élèves de CE2 sans trouble des apprentissages. En effet, la comparaison de différents modèles indique que l'ajout d'une médiation phonologique n'améliore pas significativement le modèle. Ce résultat est en désaccord avec une précédente étude menée chez des élèves de grande section de maternelle qui rapporte que l'effet des habiletés rythmiques sur la conversion grapho-phonémique est partiellement médiatisé par la conscience phonologique (Ozernov-Palchik et al., 2018). Ces résultats divergents peuvent être expliqués par différents facteurs. Tout d'abord, les tâches utilisées sont différentes : dans notre étude, les habiletés rythmiques sont évaluées par une tâche de synchronisation à un métronome, alors qu'une tâche de discrimination de rythmes irréguliers est utilisée dans l'étude d'Ozernov-Palchik et al. (2018). Il est possible que le traitement de la phonologie soit plus en lien avec le traitement perceptif de structures rythmiques complexes, comme évalué dans la tâche d'Ozernov-Palchik et al. (2018). Cependant, cet argument semble invalidé par les résultats d'autres études qui rapportent que la production rythmique (e.g. capacité à se synchroniser à un métronome régulier) est corrélée à la conscience phonologique (David et al., 2007). Une explication alternative pourrait provenir de différences dans la population étudiée : alors que notre étude porte sur des élèves de CE2, celle d'Ozernov-Palchik et al. (2018) a été menée chez des élèves de maternelle. Or les élèves en début d'apprentissage du langage écrit ont un plus faible niveau de conscience phonologique. Bien que les habiletés rythmiques puissent être impliquées dans le découpage du langage en syllabes et/ou phonèmes, elles pourraient ne plus jouer de rôle déterminant une fois que la conscience phonologique est initiée. Cette explication est concordante avec les études antérieures rapportant un effet des habiletés rythmiques sur le niveau de conscience

phonologique en maternelle (David et al., 2007; Moritz et al., 2013) ou dans les troubles du langage (Bhide et al., 2013; Huss et al., 2011). L'étude des liens entre habiletés rythmiques et phonologiques au fil du développement pourrait permettre de confirmer cette hypothèse.

4.2. MEDIATION VIA LES FONCTIONS EXECUTIVES

La deuxième hypothèse que nous avons testée dans cette étude était celle d'une médiation au travers des fonctions exécutives (Tierney & Kraus, 2014). En effet, ces fonctions sont à la fois en lien avec les habiletés rythmiques (Bailey & Penhune, 2010; Hansen et al., 2013; Tierney & Kraus, 2014) et l'apprentissage du langage écrit (Altemeier et al., 2008; Christopher et al., 2012; Potocki et al., 2015). Nos résultats confirment cette hypothèse et indiquent que les fonctions exécutives médiatisent totalement le lien entre habiletés rythmiques et les différentes dimensions du langage écrit évaluées. L'effet indirect des habiletés rythmiques au travers des fonctions exécutives est significatif pour l'identification et l'orthographe de mots et pour la compréhension écrite. De plus, il est proche de la significativité pour la rédaction de texte. Une analyse plus fine de la solution du modèle permet de détailler une à une les relations entre le prédicteur et le médiateur puis entre le médiateur et le langage écrit.

Tout d'abord, le modèle rapporte un effet significatif des habiletés rythmiques sur les fonctions exécutives. Ce résultat est concordant avec les résultats d'études corrélationnelles qui reportent un lien entre les habiletés rythmiques et différentes fonctions exécutives comme la mémoire de travail phonologique chez les élèves de cette tranche d'âge (González-Trujillo et al., 2014; Monier & Droit-Volet, 2019). Bien que notre étude ne permette pas de confirmer le lien causal entre ces deux compétences, elle s'inscrit dans la continuité d'études interventionnelles qui suggèrent une influence des activités rythmiques et musicales sur le développement des fonctions exécutives. Ainsi, le bénéfice des entraînements musicaux sur les fonctions exécutives – et notamment sur l'inhibition (Frischen et al., 2019; Jaschke et al., 2018; Moreno et al., 2011) et la mémoire de travail (Sala & Gobet, 2017b) a déjà été rapporté à la fois chez les enfants ou chez les adultes.

Par ailleurs, en accord avec les résultats rapportés dans l'étude 1.1. (voir p.85), l'analyse du modèle rapporte un effet significatif des fonctions exécutives sur différentes dimensions du langage écrit évaluées. Cet effet se retrouve à la fois sur les fonctions de bas niveau (identification et orthographe de mots) et sur les compétences de haut niveau (compréhension et rédaction de texte). Notons que contrairement au modèle présenté dans l'étude précédente, nous retrouvons ici un effet des fonctions exécutives sur la qualité de la rédaction. Des différences dans les facteurs contrôlés dans chacun des modèles peuvent expliquer ces variations. Ainsi, le modèle présenté dans l'étude 1.1. qui ne montre pas de lien significatif entre les fonctions exécutives et la rédaction

alors qu'il s'agit des mêmes participants intègre une mesure de l'écriture manuscrite. Ce facteur explique peut-être une large part de la mesure de la rédaction et il est possible que son intégration dans le modèle diminue le poids des fonctions exécutives sur la qualité de la rédaction.

5. CONCLUSION

Les résultats de cette étude suggèrent que les habiletés rythmiques influent sur l'apprentissage de la lecture et l'écriture par une médiation des fonctions exécutives. Cependant, contrairement aux résultats d'études antérieures menées chez des élèves plus jeunes (Ozernov-Palchik et al., 2018), la médiation par la conscience phonologique n'est pas retrouvée. Examiner l'évolution de la relation entre les habiletés rythmiques et l'apprentissage du langage écrit au fil du développement pourrait permettre de confirmer que la phonologie est un facteur important pour expliquer cette relation au début de l'apprentissage mais que d'autres facteurs sous-tendent ce lien plus tard dans le développement. Par ailleurs, il est important de souligner que la méthode utilisée dans l'étude ne permet pas de conclure à l'existence d'une relation causale entre le rythme et le langage écrit : des études interventionnelles doivent être réalisées pour confirmer l'influence des habiletés rythmiques non langagières à la fois sur les fonctions exécutives et sur l'apprentissage de la lecture et de l'écriture. Enfin notons que seule la production de rythme régulier a été évaluée dans cette étude. Il est toutefois possible que la perception soit reliée de façon différente à l'apprentissage du langage écrit et il est nécessaire d'évaluer différentes habiletés rythmiques au sein d'une même étude.

ETUDE 2.2. EFFET DISTINCT DES DIFFERENTES HABILETES RYTHMIQUES SUR L'APPRENTISSAGE DE LA LECTURE ET DE L'ECRITURE

1. INTRODUCTION

Plusieurs études antérieures rapportent que les habiletés rythmiques sont reliées à l'apprentissage du langage écrit (David et al., 2007; González-Trujillo et al., 2014; Ozernov-Palchik et al., 2018). L'étude précédente confirme également ce lien chez des élèves de CE2 et révèle qu'il est sous-tendu par les fonctions exécutives. Cependant, seule une tâche de production rythmique, évaluant plus spécifiquement le traitement de la régularité, a été utilisée dans cette étude (synchronisation sensori-motrice à un rythme régulier). Or, il est nécessaire d'étudier plus largement quelles habiletés rythmiques sont en lien avec l'apprentissage du langage écrit chez les élèves de cette tranche d'âge.

Premièrement, comme présenté dans le cadre théorique, il semble que le traitement de séquences rythmiques implique deux processus distincts : la perception de la durée et la perception de la pulsation (i.e. régularité sous-jacente) (Grahn, 2012). Or, beaucoup d'études ont évalué les habiletés rythmiques au travers de tâches de perception ou de production de rythmes complexes composés d'intervalles courts et longs, alors que ce type de tâche implique ces deux types de traitement temporels (i.e. perception de la durée et de la régularité) et ne permettent donc pas de distinguer leur implication (González-Trujillo et al., 2014; Holliman et al., 2010; Ozernov-Palchik et al., 2018). Pourtant, dans la dyslexie, ces deux processus ont été mis en lien avec les difficultés de lecture. Par exemple, Nicolson et al. (2005) ont montré que les élèves présentant une dyslexie avaient des difficultés à estimer la durée d'un intervalle. De la même façon, le traitement de la régularité – évaluée avec des tâches de perception de la métrique ou de synchronisation à un métronome, est altéré dans les troubles du langage (Goswami, 2011). Enfin, certaines études rapportent que ces deux types de difficultés prédisent le niveau de langage écrit de façon indépendante chez les élèves dyslexiques (Thomson et al., 2006). Malgré ces résultats, aucune étude n'a étudié plus précisément l'influence potentiellement distincte du traitement de la durée et du traitement de la régularité sur l'apprentissage de l'écrit dans le développement typique.

Deuxièmement, bien que le terme « habiletés rythmiques » renvoient à la fois à la perception et à la production de rythme, les relations entre ces différentes habiletés ne sont pas claires. Certains travaux suggèrent qu'elles sont étroitement liées. Par exemple, la synchronisation sensori-motrice facilite la perception de rythmes réguliers (Manning & Schutz, 2013). De plus, la

perception et la production de rythmes recrutent des réseaux cérébraux similaires (Kung et al., 2013). Pourtant, certains travaux reportent que ces deux habiletés ne sont pas significativement corrélées entre elles (Fujii & Schlaug, 2013; Holliman et al., 2010; Sowiński & Dalla Bella, 2013). Or, notre précédente étude n'a utilisé qu'une tâche de production rythmique. De façon similaire, la majorité des travaux a utilisé de façon indifférenciée des tâches de perception ou de production pour évaluer les habiletés rythmiques mais peu d'entre eux ont distingué l'influence de la perception et de la production rythmique sur l'apprentissage du langage écrit. A notre connaissance, seule l'étude de (Holliman et al., 2010) menée chez des élèves de 5 à 7 ans a distingué le versant perceptif et productif dans le traitement du rythme non-langagier. Les résultats montrent d'une part que ces deux habiletés sont dissociées, et d'autre part que seule la perception de rythme prédit significativement la maîtrise de la lecture. Les auteurs proposent donc que les effets des habiletés rythmiques sur l'apprentissage de l'écrit dépendent du versant évalué (perception vs production). Inversement, l'étude de la dyslexie montre que la perception comme la production sont toutes deux corrélées au niveau de langage écrit et que, quand ces variables sont intégrées dans un même modèle de régression, seule la production rythmique prédise significativement le niveau de lecture et d'orthographe (Thomson & Goswami, 2008) : ceci suggère une altération globale des habiletés rythmiques dans la dyslexie (i.e. touchant à la fois le versant perceptif et productif) et un effet conjoint de la production et de la perception de rythme sur l'apprentissage du langage écrit. Ces résultats contradictoires soulignent la nécessité d'étudier plus précisément les relations entre perception et production de rythme, et d'examiner leurs contributions distinctes sur l'apprentissage du langage écrit dans le développement typique.

L'objectif de la présente étude est de préciser les relations entre différentes habiletés rythmiques et l'apprentissage du langage écrit dans le développement typique. Pour cela, différentes habiletés rythmiques (perception de la durée, perception de rythme régulier et production de rythme régulier) et différentes dimensions du langage écrit (lecture, orthographe et compréhension écrite) ont été évaluées chez des élèves de CM1. En accord avec les résultats d'études antérieures (David et al., 2007; Holliman et al., 2010; Ozernov-Palchik et al., 2018; Tierney & Kraus, 2014; Zhang et al., 2017), nous nous attendons à retrouver des corrélations significatives entre les différentes mesures des habiletés rythmiques évaluées et l'apprentissage du langage écrit chez des élèves de CM1. De plus, l'hypothèse d'une contribution distincte des différentes habiletés rythmiques sera testée à l'aide de régressions. Plus précisément, deux hypothèses de dissociations sont proposées dans cette étude : une première dissociation sur les deux processus impliqués dans le traitement rythmique : le traitement de la durée et le traitement de la régularité (Figure 10a) et une deuxième dissociation basée sur la perception/production de

rythmes réguliers (Figure 10b). En accord avec des résultats antérieurs nous nous attendons à retrouver un effet distinct des différentes habiletés rythmiques testées sur l'apprentissage du langage écrit (Holliman et al., 2010; Thomson et al., 2006).

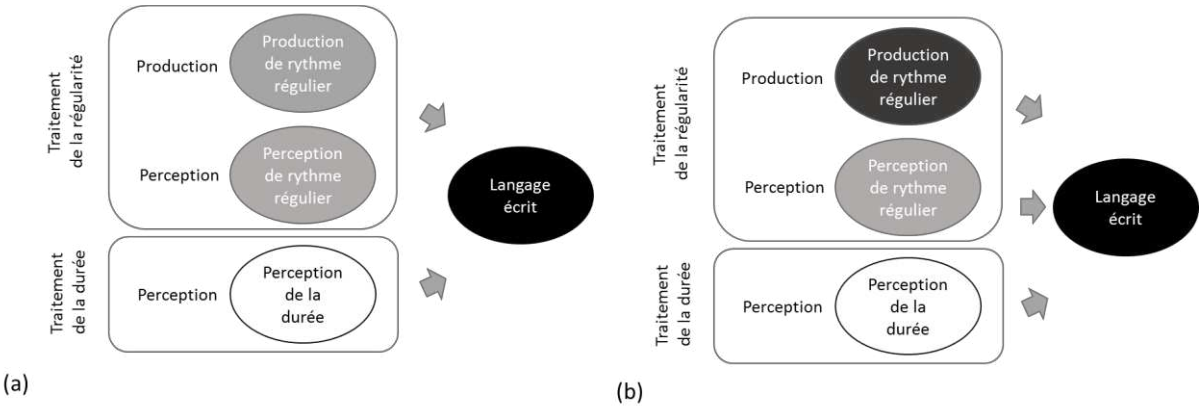

Figure 10 : Différentes hypothèses dissociant les différentes habiletés temporelles. (a) Dans une première hypothèse, le traitement de la régularité et le traitement de la durée sont distinguées et influencent distinctement l'apprentissage du langage écrit; (b) Dans une deuxième hypothèse, le versants productif et perceptif sont également dissociés et ces différentes habiletés influencent distinctement l'apprentissage du langage écrit.

2. METHODE

2.1. PARTICIPANTS

Cinquante et un élèves de CM1 ont été recrutés dans le cadre de cette étude (âge moyen = 9 ans et 6 mois ; écart-type = 6 mois ; 25 filles). Les participants étaient scolarisés dans deux écoles de la région Pays de la Loire. Tous les élèves inclus étaient francophones et n'avaient pas de difficultés d'apprentissages rapportées par les enseignants. Chaque participant avait obtenu une autorisation parentale pour participer à l'étude.

2.2. MATERIEL

2.2.1. Evaluation des habiletés rythmiques

Perception de durée (« Duration Estimation Task »). Afin d'évaluer la perception de durée, un test d'estimation de durée développé par Nicolson et al., (1995) a été utilisé. Au cours de cette tâche, l'enfant devait comparer un son cible de 1200 ms à un autre son plus court (1180 à 400 ms) ou plus long (1220 à 2000 ms). Les deux sons ont été présentés successivement et l'enfant devait indiquer si le deuxième son était plus court ou plus long que le premier. Au total,

24 sons (12 plus longs et 12 plus courts) ont été comparés deux fois au son cible pour un total de 48 essais. Le nombre de bonnes réponses (/48) était utilisé comme variable.

Perception de tempo (« Beat Interval Test »). La perception de la pulsation a été évaluée avec la tâche du Beat Interval Test issue d'une batterie évaluant les habiletés rythmiques, la Harvard-Beat Assessement Test (Fujii & Schlaug, 2013). Au cours de ce test, le participant devait évaluer le changement de tempo d'une séquence rythmique qui pouvait accélérer (diminution progressive des intervalles inter-stimuli) ou ralentir (augmentation progressive des intervalles inter-stimuli). Trente-deux essais ont été proposés. Le nombre de bonnes réponses (/32) a été utilisé comme variable.

Synchronisation et poursuite de rythme (« Beat Synchronization »). La tâche de synchronisation et de poursuite de rythme isochrone est la procédure utilisée dans l'étude de Wolff (2002), qui a été présentée dans l'étude précédente (Etude 2.1., p.114). Des mesures de la précision et de la variabilité de la synchronisation ont été extraites et utilisées comme variables.

2.2.2. Evaluation du langage écrit

Différentes dimensions du langage écrit ont été évaluées : la lecture et l'orthographe ont été testées au travers des tests issus de la BALE (Jacquier-Roux, 2009) et la compréhension écrite a été testée avec l'épreuve développée par Potocki et al. (2014). Les tâches utilisées pour évaluer le langage écrit sont présentées plus en détail dans les études précédentes (voir Etude 1.1., p.75).

2.3. PROCEDURE

Les élèves ont réalisé les différentes tâches réalisées au cours d'une session collective (orthographe de mots et compréhension écrite) et d'une session individuelle (évaluation des habiletés rythmiques et lecture de mots).

2.4. ANALYSES STATISTIQUES

Avant de procéder aux analyses statistiques, les valeurs aberrantes correspondant à une déviation de 3 e.t. par rapport à la moyenne pour chaque score ont été exclues des analyses. Les données étaient également normalisées quand nécessaire (Daumas, 1982). Une transformation carrée a été utilisée pour la lecture, l'orthographe de mots et la compréhension écrite. Une transformation racine-carrée a été utilisée pour les variables de précision et variabilité de la synchronisation. Des corrélations de Pearson ont ensuite été réalisées entre les différentes habiletés rythmiques et les mesures du langage écrit. Pour finir, des régressions hiérarchiques ont été effectuées afin d'explorer les contributions distinctes des différentes habiletés rythmiques sur le langage écrit, quand plusieurs corrélations significatives étaient retrouvées.

3. RESULTATS

3.1. ANALYSE DESCRIPTIVES

Les statistiques descriptives des mesures sont reportées dans le Tableau 12 présenté ci-dessous.

Tableau 12: Statistiques descriptives (moyenne, écart-types, minimum et maximum) des mesures des habiletés rythmiques et du langage écrit de l'étude 2.2

	Moyenne	**Ecart-type**	**Minimum**	**Maximum**
Habiletés rythmiques				
Estimation de la durée (/48)	33,74	4,95	23	42
Discrimination de tempo (/32)	20,00	3,25	13	27
Précision de la synchronisation (écart au stimulus en ms)	30,26	17,58	4,77	80,44
Variabilité de la synchronisation (e.t. de l'écart au stimulus en ms)	56,41	18,24	29,01	129,17
Langage écrit				
Lecture de mots et PM (/60)	42,25	6,87	25	53
Orthographe de mots et PM (/30)	21,30	4,27	10	28
Compréhension écrite (/12)	9,88	2,04	5	12

3.2. CORRELATIONS ENTRE LES MESURES RYTHMIQUES ET LES MESURES DU NIVEAU DE LANGAGE ECRIT

Tout d'abord, des corrélations entre les différentes habiletés temporelles ont été réalisées. Les analyses indiquent que la perception de la durée est significativement corrélée à la synchronisation à un rythme isochrone (précision : r = -.37, p = .008 ; variabilité : r = -.31, p = .03) (Tableau 13). Aucune autre corrélation n'est retrouvée entre les différentes mesures des habiletés temporelles.

Des corrélations entre les différentes variables évaluant le traitement temporel et le langage écrit ont également été réalisées. Elles apparaissent dans le tableau Tableau 12 présenté ci-dessous. Les résultats indiquent tout d'abord que la perception de la durée est positivement corrélée à différentes mesures du langage écrit (orthographe de mots : r = .33, p = .02 ; compréhension écrite : r = .31, p = .03) : les élèves obtenant un meilleur score sur la tâche de perception de la durée sont également ceux qui présentent des compétences orthographiques et de compréhension écrite plus élevées. Concernant le traitement de la régularité, seule la précision

de la synchronisation[14] à un rythme isochrone est corrélée au langage écrit (lecture de mots : r = -.32, p = .02) : une plus grande précision lors de la tâche de synchronisation est associée à de meilleures performances sur la tâche de lecture. La perception de tempo et la variabilité de la synchronisation ne sont pas significativement corrélées au différentes mesures du langage écrit. Du fait du peu de corrélations significatives retrouvées, les analyses de régression hiérarchiques n'ont pas pu être réalisées.

Tableau 13: Corrélations entre les différentes habiletés rythmiques et les mesures du langage écrit

	Estimation Durée	Perception Tempo	Précision Synchronisation	Variabilité Synchronisation
Habiletés rythmiques				
Estimation de durée (/48)	-			
Perception de tempo (/32)	.07	-		
Précision de la synchronisation (écart au stimulus en ms)	**-.37****	-.24	-	
Variabilité de la synchronisation (e.t. de l'écart au stimulus en ms)	**-.31***	.08	.19	-
Langage écrit				
Lecture de mots et PM (/60)	.25$^{\#}$	-.07	**-.30***	-.02
Orthographe de mots et PM (/30)	**.33***	.02	-.14	-.04
Compréhension écrite (/12)	**.28***	-.02	-.01	-.02

** p < .01 ; * p < .05 ; $^{\#}$ p < .10.

4. DISCUSSION

L'objectif de cette étude était d'évaluer les relations entre différentes habiletés temporelles – la perception de la durée, la perception de la régularité de rythmes réguliers et la production d'un rythme régulier – et différentes dimensions du langage écrit. En effet, bien que nous ayons rapporté dans une précédente étude l'existence de relations entre la synchronisation sensori-motrice et différentes dimensions du langage écrit (voir Etude 2.1., p.116), il reste à déterminer si d'autres habiletés rythmiques sont en lien avec l'apprentissage du langage écrit. Une première distinction entre les différentes habiletés temporelles est celle qui oppose le traitement de la durée et le traitement de la régularité (Grahn, 2012; Teki et al., 2012). L'étude des élèves

[14] La variable précision renvoie en réalité à une mesure d'imprécision (i.e. écart par rapport au stimulus cible). Un score de 0 indique que le participant est donc parfaitement synchronisé sur le métronome (i.e. clic du participant exactement en même temps que le stimulus cible). A l'inverse, un score plus élevé indique un écart important entre la réponse du participant et le stimulus.

dyslexiques a montré que ces derniers présentent un déficit de ces deux habiletés temporelles (Goswami, 2011; Nicolson & Fawcett, 2011). De plus, la perception de la durée d'un intervalle et la capacité à se synchroniser sur un métronome prédisent indépendamment le niveau de lecture, d'orthographe et de conscience phonologique chez des élèves dyslexiques (Thomson et al., 2006), ce qui suggère une influence distincte de ces deux compétences sur le langage écrit. Une seconde distinction est celle qui oppose la perception et la production de rythmes, qui selon Holliman et al., (2010) prédisent de façon différente la maîtrise de la lecture. Il est en effet possible que la perception de rythmes soit en lien avec le développement de la phonologie. Par exemple, alors que nous n'avons pas retrouvé de relation significatives entre la production de rythme et les habiletés phonologiques dans notre précédente étude, des relations entre la perception rythmique prédit le niveau de conscience phonologique chez les élèves de maternelle (Ozernov-Palchik et al., 2018) et de CE2 (Zhang et al., 2017). Notons toutefois que la distinction entre la perception et la production de rythme n'est pas consensuelle et certains auteurs suggèrent que le traitement de rythmes réguliers est plus généralement relié au langage écrit – qu'il s'agisse de la production ou de la perception (Thomson & Goswami, 2008).

L'effet distinct de ces différentes habiletés rythmiques sur l'apprentissage du langage écrit dans le développement typique n'ayant pas encore été étudié, l'objectif de la présente étude était donc d'évaluer, d'une part les relations entre les différentes habiletés rythmiques, et, d'autre part, leurs relations avec le niveau de lecture de mots, d'orthographe de mots et de compréhension écrite chez des élèves tout venants de CM1.

4.1. RELATIONS ENTRE LES DIFFERENTES HABILETES RYTHMIQUES

En premier lieu, les relations entre les différentes habiletés rythmiques ont été évaluées. Nous nous attendions à retrouver des corrélations entre les différentes compétences évaluées ici – et plus spécifiquement entre les mesures évaluant le traitement de la régularité (i.e. perception de tempo, précision de la synchronisation et variabilité de la synchronisation). Cependant, nos analyses ne confirment pas ces hypothèses : aucune corrélation significative n'est retrouvée entre la perception et la production de rythmes réguliers. De tels résultats avaient déjà été pointés par les auteurs de différentes batteries d'évaluation des habiletés temporelles et rythmiques telles que la BAASTA (Dalla Bella et al., 2017) ou la H-BAT (Fujii & Schlaug, 2013), qui ne retrouvent pas de corrélations significatives entre certaines mesures de la perception et de la production du rythme et qui suggèrent qu'il existe une dissociation entre la perception et la production de rythmes réguliers. Les analyses de corrélations révèlent par contre que la tâche d'estimation d'intervalle est corrélée à la précision et la variabilité de la synchronisation, mais pas à la perception de rythme. Plus généralement, ces résultats soulignent la nécessité d'utiliser plusieurs mesures des habiletés rythmiques qui peuvent impliquer différents processus.

4.2. RELATIONS ENTRE LES HABILETES RYTHMIQUES ET LE LANGAGE ECRIT

Au-delà de l'étude des relations entre les différentes habiletés rythmiques, nous avons cherché à évaluer les relations entre ces compétences et l'apprentissage du langage écrit. Nous nous attendions à ce que le traitement de la durée et le traitement de la régularité soient indépendamment reliés aux différentes dimensions du langage écrit, comme retrouvé chez les élèves dyslexiques (Thomson & Goswami, 2008). De plus, nous nous attendions à retrouver une contribution distincte de la perception et de la production de rythmes réguliers, en accord avec les résultats de Holliman et al. (2010).

En premier lieu, nos résultats rapportent une relation entre la capacité à estimer la durée et différentes mesures du langage écrit de bas niveau, comme l'orthographe de mots, et de haut niveau, comme la compréhension. La relation entre l'estimation de la durée et la lecture est également proche de la significativité. Ces résultats font échos à des études antérieures qui avaient montré des relations entre la capacité à discriminer les intervalles et les troubles du langage écrit (Nicolson et al., 1995; Tallal, 1980).

Concernant le traitement de la régularité, plusieurs études ont rapporté que la capacité à percevoir une pulsation ou la métrique dans des séquences musicales (Zhang et al., 2017) ou à se synchroniser sur un métronome (David et al., 2007; Tierney & Kraus, 2014) étaient corrélées à la précision de la lecture de mots. Dans notre étude, le traitement de la régularité a été évalué au travers d'une tâche de perception (i.e. détecter si un tempo accélère ou décélère) et d'une tâche de production (synchronisation à un métronome régulier). En accord avec ces études antérieures, nous nous attendions à ce que les performances dans ces deux tâches soient corrélées aux mesures du langage écrit – et notamment à la lecture de mots. Néanmoins, l'examen des corrélations révèle que seule la tâche de production de rythme – et non la tâche de perception, est corrélée significativement au langage écrit. Nos résultats sont donc partiellement en accord avec la littérature. Ils confirment que la capacité à se synchroniser à un rythme régulier est corrélée à la maîtrise de la lecture, comme rapporté chez des élèves de maternelle (David et al., 2007) et chez des adolescents (Tierney & Kraus, 2014). Cependant, contrairement à l'étude précédente (voir Etude 2.1., p.116), aucune relation significative n'est retrouvée entre la synchronisation à un métronome régulier et le niveau d'orthographe de mots – alors même que les critères d'inclusion et la tâche utilisée sont les mêmes. Ces résultats divergents peuvent provenir du manque de puissance due à la plus petite taille de l'échantillon dans la présente étude. Par ailleurs, aucune corrélation significative n'a été retrouvée avec la tâche de perception de rythme régulier. Ces résultats sont en contradiction avec ceux d'études antérieures qui avaient rapporté des corrélations entre des tâches de perception de rythme et la lecture de mots chez les élèves dyslexiques (Huss et al., 2011) ou chez des élèves sans difficulté de CE2 (Ozernov-Palchik et al.,

2018; Zhang et al., 2017). Outre la faible puissance de l'étude, il est possible que l'absence de relations significatives retrouvée ici provienne de la nature de la tâche de perception que nous avons employée. En effet, d'autres tâches évaluant spécifiquement la perception de la régularité ont déjà été mises en relation avec l'apprentissage du langage écrit à la fois dans le développement typique et dans la dyslexie. Par exemple, des mesures en EEG lors de l'écoute de rythmes réguliers ont montré des réponses cérébrales atypiques lors de la perception de la pulsation chez les enfants dyslexiques (Chiang et al., 2020; Colling et al., 2017). Les performances obtenues sur des tâches de perception la métrique (i.e. perception des structures hiérarchiques d'un rythme) ont également été mises en relation avec le niveau de lecture dans la dyslexie (Huss et al., 2011) et dans le développement typique (Zhang et al., 2017). L'utilisation d'autres tâches de perception rythmique doit donc être privilégiée pour déterminer s'il existe une influence distincte entre la perception et la production rythmique sur l'apprentissage du langage écrit.

Nos résultats confirment que les traitements de la durée et de la régularité sont tous les deux en lien avec l'apprentissage du langage écrit. Toutefois, les analyses de régressions n'ont pas pu être effectuées compte tenu du peu de corrélations significatives retrouvées. L'influence distincte de ces deux habiletés sur le langage écrit n'a donc pas pu être testée et d'autres travaux évaluant les différentes habiletés rythmiques et le langage écrit dans une plus grande cohorte sont nécessaires pour confirmer que les différentes compétences constituent des prédicteurs distincts ou confondus du langage écrit.

5. CONCLUSION

Les résultats de cette étude révèlent que différentes habiletés rythmiques – l'estimation de la durée et la production de rythme régulier, sont corrélées au niveau de langage écrit. Ces relations sont non seulement retrouvées avec des compétences de bas niveau comme la lecture de mots, mais également avec des compétences de haut niveau comme la compréhension. Néanmoins, nos résultats ne permettent pas de conclure à un effet distinct de ces différentes habiletés et d'autres travaux sont nécessaires pour confirmer cette hypothèse dans le développement typique.

CONCLUSION DU CHAPITRE 7

Dans ce chapitre, nous avons cherché à étudier les relations entre les habiletés rythmiques et l'apprentissage du langage écrit chez les élèves de CE2-CM1.

Dans une première étude, différentes hypothèses de médiations ont été testées afin de mieux comprendre les mécanismes explicatifs des relations entre la production de rythme et l'apprentissage du langage écrit. Les résultats rapportent un effet des habiletés rythmiques sur l'ensemble des dimensions du langage écrit évaluées (lecture et orthographe de mots, compréhension et rédaction). De plus, cet effet semble totalement expliqué par une médiation via les fonctions exécutives. Contrairement aux résultats retrouvés chez des élèves plus jeunes ou présentant une dyslexie, l'effet indirect via les habiletés phonologiques n'est pas significatif.

Dans une seconde étude, différentes habiletés rythmiques ont été dissociées afin d'étudier leur effet distinct ou conjoint. Les résultats révèlent que la perception de la durée d'un intervalle et la production rythmique sont toutes deux reliées à l'apprentissage du langage écrit. Cependant, l'étude ne permet pas de tester leurs éventuelles influences distinctes sur les différentes mesures du langage écrit évaluées : d'autres études sont nécessaires afin d'étudier l'effet de ces différentes habiletés sur l'apprentissage du langage écrit.

Comme pour le chapitre précédent – traitant des liens entre motricité et langage écrit, il est important de souligner que ces deux études apportent des informations complémentaires à la compréhension des relations entre habiletés rythmiques et apprentissage de la lecture et de l'écriture. La première étude permet de modéliser les relations entre différents prédicteurs et de tester des hypothèses explicatives formulées dans la littérature. Cependant, elle ne permet pas d'étudier finement l'influence des différentes habiletés rythmiques (i.e. traitement de la durée ou de la régularité, perception ou production rythmique), comme dans la seconde étude, car elle n'intègre qu'une mesure de synchronisation à un rythme régulier.

Pour conclure sur cette partie, les résultats présentés soutiennent l'existence d'un lien entre habiletés rythmiques et apprentissage du langage écrit. Cependant, d'autres études sont nécessaires afin d'identifier plus finement quelles sont les habiletés rythmiques en lien avec la lecture et l'écriture dans le développement typique. La nature corrélationnelle des deux études doit également être soulignée car elle ne permet pas de confirmer les liens de causalité proposés dans les modèles théoriques. Pour finir, bien que nous ayons jusqu'à présent considéré les habiletés motrices et rythmiques comme des habiletés distinctes, plusieurs travaux suggèrent que ces compétences sont étroitement reliées (Monier & Droit-Volet, 2019). De plus, il est intéressant

de noter que l'effet des habiletés motrices et rythmiques semblent sous-tendu par un même facteur – à savoir les fonctions exécutives. Dans le prochain chapitre, les deux prédicteurs seront intégrés dans un même modèle afin d'étudier plus avant leur effet distinct ou conjoint sur ce médiateur et sur le langage écrit.

CHAPITRE 8 : INFLUENCES INDEPENDANTES OU CONJOINTES DES HABILETES MOTRICES ET RYTHMIQUES SUR LE LANGAGE ECRIT DANS LE DEVELOPPEMENT TYPIQUE

1. INTRODUCTION

Au cours des deux précédentes parties, nous avons mis en évidence un effet des compétences motrices et rythmiques sur différentes dimensions du langage écrit (identification de mots, orthographe de mots, compréhension et rédaction de texte). Les résultats issus des études 1.1. et 2.1. (voir p.79 et p.116) indiquent que les effets des habiletés rythmiques et des habiletés motrices sont tous deux sous-tendus par les fonctions exécutives. De plus, au cours des deux précédents chapitres, les deux prédicteurs ont été étudiés indépendamment. Ce choix s'explique en partie par les limites méthodologiques des modèles d'équations structurales : en effet, les indices d'ajustement des modèles dépendent de sa complexité (i.e. nombre de paramètres intégrés dans le modèle) (Gana & Broc, 2018; Kline, 2015) et les modèles causaux trop complexes ont été critiqués par Saylors et Trafimow (2020), qui recommandent de tester des théories plus simples. De ce fait, nous avons choisi de ne pas intégrer toutes les variables de l'étude dans un même modèle mais de tester les hypothèses de médiation expliquant les relations entre l'apprentissage du langage écrit et les deux prédicteurs potentiels dans deux études distinctes. Cependant, de nombreux travaux ont montré que les habiletés motrices et rythmiques sont reliées (Chen et al., 2008; Grahn & Brett, 2007 ; Monier & Droit-Volet, 2019). En effet, l'évaluation des habiletés rythmiques se fait fréquemment au travers de tâches de production de rythme qui impliquent la motricité, comme la tâche de synchronisation sensori-motrice utilisée dans les études 1.2. et 2.2. Or, le niveau de motricité fine influe sur les capacités de synchronisation à un métronome (Monier & Droit-Volet, 2019). En outre, des études en neuro-imagerie ont montré que la production comme la perception de séquences rythmiques activaient des régions cérébrales impliquées dans le contrôle moteur comme le cortex prémoteur, l'aire motrice supplémentaire, le cervelet et les ganglions de la base (Chen et al., 2008; Grahn & Brett, 2007). L'ensemble de ces arguments souligne la nécessité de considérer les habiletés motrices et rythmiques dans un même modèle pour examiner si leur effet sur le langage écrit est indépendant ou relié. De plus, nos résultats antérieurs indiquent que leurs effets sont sous-tendus par un même médiateur : les fonctions exécutives. Nous proposons donc de tester ici l'effet indépendant ou conjoint de ces deux prédicteurs à la fois sur ce médiateur et sur l'apprentissage du langage écrit. Pour cela, des modèles d'équations structurales intégrant motricité fine, habiletés rythmiques, fonctions exécutives et langage écrit ont été réalisés.

2. METHODE

Cette étude s'inscrit dans la continuité des études 1.2. et 2.2. Les participants sont les mêmes que ceux présentés dans ces deux études : 239 élèves de CE2 sans retard intellectuel (QI non verbal < 70) ni trouble du langage écrit (âge moyen = 8 ans 6 mois ; écart-type = 4 mois ; 137 filles). L'ensemble des tâches utilisées pour évaluer la motricité fine, les habiletés rythmiques, les fonctions exécutives et le langage écrit est détaillé dans les études précédentes (voir Etudes 1.1., p.75, Etude 2.1, p.114 et Annexe 1, p.249). Le traitement des données est similaire à celui présenté précédemment.

3. RESULTATS

3.1. CORRELATIONS

Les résultats des corrélations indiquent que les deux mesures des habiletés rythmiques précision et variabilité de la synchronisation) sont positivement corrélées aux mesures de dextérité manuelle (Tableau 14). Cependant, les habiletés rythmiques ne sont pas corrélées avec la mesure de contrôle visuo-moteur (précision : $r = .10$; $p = .14$; variabilité : $r = .08$; $p = .24$).

Tableau 14: Corrélations entre les habiletés motrices et rythmiques

	Précision de la synchronisation (ms)	Variabilité de la synchronisation (ms)
Dextérité de la main dominante (s.)	**.19***	**.19***
Dextérité de la main non dominante (s.)	**.28*****	**.22****
Coordination bimanuelle (s.)	.07	**.14***
Contrôle visuo-moteur (nombre d'erreurs)	.10	.08

**** $p < .001$; ** $p < .01$; * $p < .05$.

3.2. ANALYSE FACTORIELLE CONFIRMATOIRE

Une AFC a été réalisée en distinguant quatre variables latentes : les habiletés rythmiques (précision et variabilité de la synchronisation), la motricité fine (dextérité manuelle de la main dominante, dextérité manuelle de la main non dominante, coordination bimanuelle et contrôle visuo-moteur), les fonctions exécutives (mémoire de travail verbale et visuo-spatiale, inhibition, flexibilité et planification) et le langage écrit (lecture et orthographe de mots, compréhension écrite et rédaction). Les indices d'ajustement du modèle indiquent un bon ajustement aux données, $\chi^2(183) = 232.85$, $p = .007$, CFI = .91, RMSEA = .04, SRMR = .07. L'analyse des indices locaux révèle que toutes les variables observées – hormis le contrôle visuo-moteur et la planification, sont significativement associées à leur variable latente respective. Compte tenu de la qualité des indices globaux, ces deux variables ont été conservées.

3.3. COMPARAISON DE MODELES

Comme pour les précédentes études, différents modèles ont été comparés. En accord avec les résultats des études 2 et 4, ils intégraient la motricité et les habiletés rythmiques comme prédicteurs, les fonctions exécutives comme médiateur et le langage écrit comme variable prédite. Dans le premier modèle, les deux prédicteurs étaient considérés comme indépendants (Figure 11, modèle 1a). Dans le deuxième modèle, une relation a été ajoutée entre la motricité et les habiletés rythmiques (Figure 11, modèle 2a). Comme précédemment, le meilleur modèle était comparé à un modèle n'intégrant pas les effets directs de la motricité et des habiletés rythmiques sur le langage écrit pour tester l'hypothèse d'une médiation partielle (Figure 11, modèles 1b et 2b). Les indices d'ajustement des différents modèles peuvent être retrouvés dans le Tableau 15 : Indicateurs d'ajustement des différents modèles de l'étude 3. Les modèles représentant correctement les données (i.e. CFI ≥.90, RMSEA ≤.06, SRMR ≤ .09) sont indiqués en gras.. Les modèles représentant correctement les données (i.e. CFI > .90, RMSEA < .06, SRMR < .09) sont indiqués en gras.

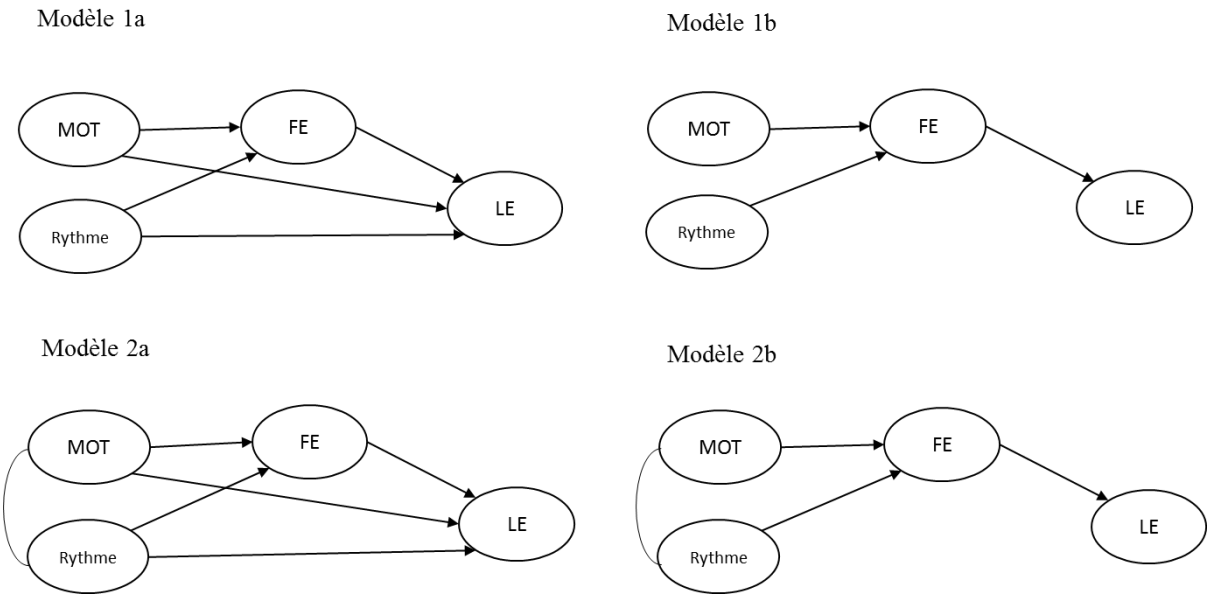

Figure 11 : Différents modèles de médiation testés intégrant les habiletés motrices et rythmiques comme prédicteur, les fonctions exécutives comme médiateur et le langage écrit comme variable prédite. Les modèles 1b et 2b correspondent aux modèles sans les effets directs (i.e. médiation totale)

Note. MOT : habiletés motrices ; FE : fonctions exécutives ; LE : langage écrit

Tableau 15 : Indicateurs d'ajustement des différents modèles de l'étude 3. Les modèles représentant correctement les données (i.e. CFI ≥.90, RMSEA ≤.06, SRMR ≤ .09) sont indiqués en gras.

	CFI	RMSEA	SRMR	AIC
Modèle 1a *Effet indépendant des habiletés motrices et rythmiques*	.88	**.05** (.03-.06)	**.08**	8825.84
Modèle 1b *Effet indépendant des habiletés motrices et rythmiques sans les effets directs*	.88	**.05** (.03-.06)	**.08**	8823.95
Modèle 2a *Lien entre les habiletés motrices et rythmiques*	**.91**	**.04** (.02-.06)	**.07**	8814.26
Modèle 2b *Lien entre les habiletés motrices et rythmiques sans les effets directs*	**.91**	**.04** (.02-.06)	**.07**	8812.69

La comparaison de modèles indique que l'ajout d'une relation entre les habiletés motrices et rythmiques améliore le modèle (Satorra–Bentler $\Delta\chi^2$ = 13.58, Δdf = 1, p < .001). De plus, le retrait des effets directs des habiletés motrices et rythmiques sur le langage écrit ne détériore pas la qualité du modèle (Satorra–Bentler $\Delta\chi^2$ = 2.43, Δdf = 2, p = .30). Le modèle le plus parcimonieux (i.e. le modèle 2b) a été conservé pour modéliser les relations entre les différentes variables. Il est présenté dans la Figure 12. Les résultats confirment l'effet significatif des fonctions exécutives sur le langage écrit (γ = .52, p = .003). De plus, l'analyse des effets indirects des deux prédicteurs sur le langage écrit indique que les fonctions exécutives médiatisent le lien entre motricité et langage écrit (β = -.22, p = .02) mais pas le lien entre les habiletés rythmiques et le langage écrit (β = -.10, p = .25). En effet, la relation entre les habiletés rythmiques et les fonctions exécutives n'est plus significative quand la motricité fine est intégrée dans le modèle (β = -.19, p = .25) alors que la relation entre les habiletés motrices et les fonctions exécutives perdure (β = -.42, p = .02)

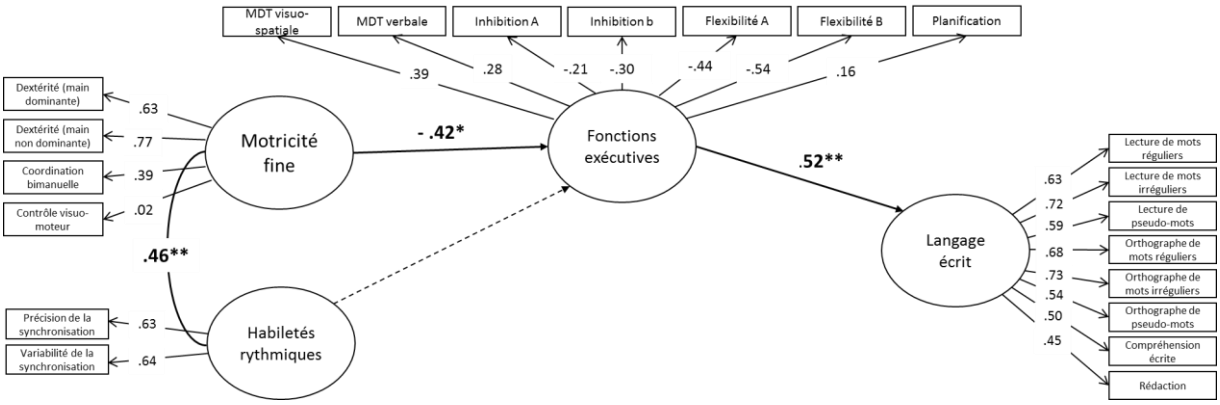

Figure 12: Modèle intégrant les habiletés rythmiques et motrices comme prédicteur, les fonctions exécutives comme médiateur et le langage écrit comme variable prédite

4. DISCUSSION

L'objectif de cette analyse était d'évaluer la contribution distincte des habiletés motrices et rythmiques sur les fonctions exécutives et le langage écrit. Pour cela, un modèle d'équation structural intégrant ces différentes compétences a été testé.

Les résultats confirment en premier lieu la relation entre les habiletés motrices et rythmiques. Ce résultat est concordant avec les études antérieures qui ont montré que la motricité fine prédit la capacité à se synchroniser et à poursuivre un rythme en l'absence de stimulus chez les élèves de 5 à 7 ans (Monier & Droit-Volet, 2019). De plus, les difficultés motrices – comme dans

le trouble développemental de la coordination, affectent la production de rythmes : les enfants avec un TDC sont plus variables dans leur synchronisation que les enfants sans difficulté (De Castelnau et al., 2007; Roche et al., 2016; Whitall et al., 2008). Plus généralement, des difficultés rythmiques sont rapportés dans les troubles moteurs d'origine neurologique comme chez les patients atteints de la maladie de Parkinson ou chez les patients post-AVC. Les bénéfices des entraînements rythmiques sur les symptômes moteurs dans ces populations ont déjà été montrés (Dalla Bella et al., 2017; Janzen et al., 2019 ; Schaefer, 2014). Néanmoins, il est important de souligner que toutes ces études s'intéressent à la production et non à la perception de rythmes. Bien que plusieurs études en neuro-imagerie suggèrent que la perception du rythme sollicite des régions cérébrales impliquées dans la motricité (e.g. cortex prémoteur, AMS, cervelet, ganglion de la base), la relation entre la perception rythmique et les habiletés motrices doit être poursuivie.

Les études présentées précédemment dans la thèse ont montré un effet indirect des habiletés rythmiques et motrices sur le langage écrit au travers des fonctions exécutives (voir Etudes 1.1. et 2.1., p.73 et p.112). Le principal objectif de cette analyse était donc de confirmer une influence distincte de la motricité et des habiletés rythmiques sur un médiateur potentiel – les fonctions exécutives – et sur le langage écrit.

Des études antérieures rapportent des relations entre les habiletés motrices et rythmiques et les fonctions exécutives. D'une part, les bénéfices d'un entraînement musical et rythmique ont été montrés sur l'inhibition (Frischen et al., 2019; Jaschke et al., 2018) et sur la mémoire de travail verbal (Moreno et al., 2011; Sala & Gobet, 2017b). D'autres part, des études corrélationnelles ont rapporté des corrélations entre les habiletés motrices et différentes fonctions exécutives telles que la mémoire de travail visuo-spatiale, l'inhibition ou la flexibilité mentale (Becker et al., 2014b; Roebers & Kauer, 2009). Toutefois, les résultats de notre analyse ne rapportent pas d'effet distinct de ces deux facteurs sur les fonctions exécutives : suite à l'intégration conjointe des deux prédicteurs dans le modèle, seul l'effet de la motricité fine sur les fonctions exécutives est significatif. Ceci suggère que les habiletés motrices sous-tendent la relation entre les habiletés rythmiques et les fonctions exécutives. Ce résultat n'est pas en contradiction avec les études précédentes qui se sont intéressées au lien entre rythme et fonctions exécutives. En effet, les tâches de production de rythme sont fréquemment utilisées pour évaluer les habiletés rythmiques (e.g. González-Trujillo et al., 2014). De plus, les entraînements rythmiques et musicaux utilisent souvent des exercices impliquant la motricité (e.g. battre la mesure en tapant des mains, danse, pratique d'instrument de musique). Il est donc difficile de dissocier l'influence de la motricité de celle des habiletés rythmiques dans ce type d'intervention.

Concernant l'effet des deux prédicteurs sur le langage écrit, la comparaison de modèles indique que celui qui s'ajuste le mieux aux données est celui proposant une médiation totale par

les fonctions exécutives. Les effets directs n'ont donc pas été modélisés. L'analyse des effets indirects révèle que quand les habiletés motrices et rythmiques et les fonctions exécutives sont intégrées simultanément dans un même modèle, seules les habiletés motrices influencent le langage écrit au travers des fonctions exécutives. Comme développé au cours du paragraphe précédent, il semble donc que l'effet de la production rythmique soit expliqué par la motricité dont l'influence sur les fonctions exécutives affecterait indirectement l'apprentissage du langage écrit (Altemeier et al., 2008; Christopher et al., 2012; Potocki et al., 2015).

5. CONCLUSION

Dans cette étude, nous avons cherché à évaluer les relations entre les habiletés motrices et rythmiques sur l'apprentissage du langage écrit. L'objectif était de déterminer si les effets des deux prédicteurs étaient conjoints ou distincts chez les élèves sans troubles des apprentissages. Dans les études précédentes, nous avions montré que l'effet de la motricité et des habiletés rythmiques sur différentes dimensions du langage écrit sont sous-tendu par les fonctions exécutives. La présente étude permet de préciser les résultats antérieurs en montrant que la motricité semble expliquer l'influence des habiletés rythmiques sur les fonctions exécutives.

CONCLUSION DU CHAPITRE 8

Au cours des trois chapitres précédents, nous avons cherché à étudier les relations entre deux prédicteurs non langagiers – les habiletés motrices et les habiletés rythmiques – et l'apprentissage du langage écrit chez des élèves de CE2-CM1 sans troubles des apprentissages. Les résultats rapportent des relations significatives entre ces différentes habiletés et confortent des résultats d'études antérieures qui ont montré que ces compétences prédisent le niveau ultérieur de lecture et d'écriture chez des élèves plus jeunes (e.g. Cameron et al., 2012; David et al., 2007). Plus précisément, les résultats de deux études, utilisant une méthode de modélisation par équations structurales, menées sur une large cohorte d'élèves de CE2, permettent de confirmer certaines hypothèses explicatives avancées dans la littérature (Cameron et al., 2016; Suggate et al., 2016; Tierney & Kraus, 2013) : l'effet de la motricité sur différentes dimensions du langage écrit est sous-tendu à la fois par l'automatisation de l'écriture manuscrite et par les fonctions exécutives (Etude 1.1, p.73) alors que l'effet des habiletés rythmiques semblent sous-tendu par les fonctions exécutives – mais pas par les habiletés phonologiques (voir Etude 2.1, p.112). Par ailleurs, deux études corrélationnelles de moindre envergure menées chez des élèves de CM1-CM2 tendent à montrer que les habiletés motrices et rythmiques sont des termes génériques qui renvoient en réalité à un ensemble d'habiletés distinctes pourtant rarement dissociées dans les études s'intéressant aux relations entre ces prédicteurs et l'apprentissage du langage écrit (voir Etude 1.1. et 2.1., p.73 et p.112). D'autres études impliquant un plus grand nombre de participants sont nécessaires pour identifier quelles sont les différentes habiletés rythmiques et motrices en lien avec l'apprentissage du langage écrit. Enfin, dans une dernière analyse, nous avons cherché à montrer une influence distincte des habiletés motrices et rythmiques sur les fonctions exécutives et l'apprentissage du langage écrit. Cependant, nos résultats ne soutiennent pas une telle hypothèse puisque le modèle révèle que seules les habiletés motrices influencent significativement le langage écrit au travers des fonctions exécutives. Il semble donc que les relations entre les habiletés motrices et la production rythmique et l'apprentissage du langage écrit partagent les mêmes mécanismes explicatifs chez des élèves sans difficultés de CE2.

L'ensemble de ces résultats permet d'apporter de nouveaux éléments sur les relations entre les habiletés motrices et rythmiques et l'apprentissage du langage écrit chez les élèves au développement typique de fin de cycle 2 et cycle 3. Toutefois, plusieurs questions perdurent. En premier lieu, nous nous sommes focalisé sur l'apprentissage dans le développement typique cependant il reste à déterminer le rôle de ces compétences chez les élèves présentant un trouble du langage écrit. Plus spécifiquement, les résultats des précédentes études laissent supposer que

les difficultés motrices et/ou rythmiques joue un rôle dans le trouble de l'apprentissage du langage écrit et aggravent les difficultés de lecture et d'écriture. En second lieu, les approches corrélationnelles utilisées dans les chapitres précédents empêchent de conclure à l'existence de liens causaux. Bien que ces analyses soient guidées par des hypothèses théoriques, ces dernières s'appuient principalement sur des études corrélationnelles et il est nécessaire de confirmer les liens causaux entre les habiletés motrices et/ou rythmiques, les médiateurs potentiels (fonctions exécutives et écriture manuscrite) en utilisant des approches interventionnelles. Ces deux problématiques seront abordées dans les deux chapitres suivants.

CHAPITRE 9 : INFLUENCES DES HABILETES MOTRICES ET RYTHMIQUES SUR LE LANGAGE ECRIT CHEZ LES ELEVES PRESENTANT UN TROUBLE DE L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT

1. INTRODUCTION

Au cours des précédents chapitres nous nous sommes intéressés aux liens entre deux compétences – les habiletés motrices et les habiletés rythmiques – et l'apprentissage du langage écrit dans le développement typique. Le présent chapitre a pour but d'étudier ces mêmes liens spécifiquement chez les élèves présentant un trouble de l'apprentissage de la lecture et de l'écriture. Deux questions seront soulevées dans cette étude.

En premier lieu, des travaux antérieurs ont montré que les habiletés rythmiques et motrices étaient altérées chez les élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit, comme la dyslexie (Flaugnacco et al., 2014; Huss et al., 2011; Nicolson & Fawcett, 2011). Par exemple, certaines études rapportent une altération la motricité fine chez les élèves dyslexiques (Nicolson & Fawcett, 1994; Stoodley et al., 2006). De même, de nombreuses études ont montré que les troubles du langage écrit étaient associées à une altération de la perception (Huss et al., 2011) et de la production de structures rythmiques (Flaugnacco et al., 2014; Thomson et al., 2013). Ces constats ont amené certains auteurs ont proposé l'existence d'un déficit sensorimoteur (Nicolson et al., 2001) ou d'un déficit du traitement rythmique (Goswami, 2011) comme à l'origine du trouble phonologique retrouvée dans la dyslexie. Cependant, ces propositions ont été critiquées par plusieurs auteurs car tous les élèves dyslexiques ne semblent pas présenter ce type de difficultés. Concernant les habiletés motrices, une revue de littérature a par exemple rapporté que 9,7 à 70%[15] des élèves dyslexiques ont des difficultés motrices associées : ces difficultés, bien que plus fréquentes que dans la population générale ne sont donc pas systémiques (Jover et al., 2013). Par ailleurs, alors que plusieurs modèles proposent que le déficit du traitement rythmique soit au cœur des troubles du langage (Goswami, 2011; Ladányi et al., 2020), l'existence de difficultés rythmiques chez tous les élèves dyslexiques n'a pas été démontrée. En effet, les études s'étant intéressées à cette question ont pointé un déficit du traitement rythmique à l'échelle du groupe mais pas au niveau individuel. Il est donc nécessaire de confirmer que des difficultés rythmiques sont systématiquement associées aux troubles du langage écrit.

[15] Les résultats varient fortement d'une étude à l'autre en fonction des critères d'inclusion

En second lieu, il a été proposé que la présence de difficultés motrices et rythmiques dans les troubles du langage écrit soient associée à une symptomatologie plus sévère (Huss et al., 2011; Kaplan et al., 2001). Tout d'abord, il semble que les enfants présentant à la fois un trouble dyslexique et un trouble développemental de la coordination (TDC) présentent une altération des fonctions exécutives et de l'apprentissage comparativement aux élèves avec un trouble isolé (Cignetti et al., 2018; Puyjarinet, 2018), qui pourraient majorer les difficultés de lecture et d'écriture. L'étude de Di Brina et al. (2018) s'est quant à elle focalisé sur les conséquences de l'association entre un TDC et un trouble dyslexique sur le langage écrit et suggère que les élèves présentant une comorbidité présentent des spécificité dans l'expression de leur trouble – avec des difficultés touchant majoritairement le traitement orthographique. Par ailleurs, l'altération des habiletés rythmiques est corrélée aux déficits phonologiques et langagiers chez les élèves dyslexiques (Flaugnacco et al., 2014; Huss et al., 2011). L'ensemble de ces travaux laisse donc supposer qu'au sein même du groupe d'élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit, les difficultés motrices et/rythmiques impactent négativement le niveau de lecture et d'écriture. Or, les précédentes études menées chez des élèves avec un développement typique proposent d'expliquer l'influence de ces deux habiletés non-langagières sur l'apprentissage du langage écrit avec plusieurs hypothèses de médiation : (1) l'effet des habiletés motrices sur le langage écrit serait expliqué par une médiation par les fonctions exécutives et l'écriture manuscrite et (2) l'effet des habiletés rythmiques serait expliqué par une médiation par les fonctions exécutives et par les habiletés phonologiques. Ces différentes hypothèses explicatives doivent donc être testées chez les élèves présentant des difficultés de lectures et d'écriture afin de mieux comprendre comment les difficultés motrices et/ou rythmiques peuvent majorer le trouble de l'apprentissage du langage écrit.

Pour répondre à ces différentes questions, la présente étude avait pour but d'examiner les difficultés motrices et rythmiques d'élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit. Le premier objectif était de répliquer des résultats antérieurs en confirmant l'existence d'une altération des habiletés motrices et rythmiques chez les élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit comparativement à un groupe contrôle apparié en âge. De plus, les performances individuelles de chaque élève du groupe « Trouble des apprentissages » ont été comparées à la moyenne du groupe contrôle afin d'examiner si l'ensemble de ces élèves présentait de faibles habiletés motrices et rythmiques. Le second objectif était d'étudier plus finement les habiletés motrices et rythmiques au sein du groupe d'élèves présentant un trouble des apprentissages de tester l'hypothèse d'une influence du niveau de motricité/rythme sur l'apprentissage du langage écrit dans cette population. Pour cela, différents sous-groupes constitués sur la base du niveau de motricité/rythme ont été comparés. L'hypothèse défendue était qu'au sein même du groupe d'élèves présentant un trouble des apprentissages,

l'altération de ces habiletés soit associée à un trouble du langage écrit plus important. Conformément aux hypothèses de médiation formulées chez les élèves sans difficultés (Etudes 1.1. et 2.1., p.73 et p.112), nous nous attendions également à retrouver des difficultés sur les tâches mesurant les fonctions exécutives et l'écriture manuscrite dans le groupe présentant de faibles habiletés motrices, comparativement au groupe avec des habiletés motrices préservées. De même, les élèves avec de faibles habiletés rythmiques devaient présenter de plus faibles habiletés phonologiques et fonctions exécutives comparativement aux élèves sans difficultés rythmiques. Pour finir, nous avons cherché à examiner les liens entre les difficultés motrices et rythmiques chez les élèves présentant un trouble des apprentissages. Nous nous attendions à retrouver des relations entre ces deux habiletés dans cette population, comme cela a été montré chez les élèves sans troubles des apprentissages (Etude 3, p.138).

2. METHODE

2.1. PARTICIPANTS

Trente-deux élèves présentant un trouble des apprentissages et 32 élèves sans difficultés ont été retenus pour l'étude. Trente et un participants issus de la cohorte de 278 élèves présentée dans les études 1.1. et 2.1. et 3 (p.75, p.114 et p.138) ont été retenus car ils présentaient un trouble du langage écrit (i.e. scores obtenus aux épreuves de lecture et d'orthographe de mots de la BALE inférieurs à -1.5 e.t.)[16]. Par ailleurs, 17 enfants ont également été recrutés dans des associations ont également été inclus dans le groupe d'élèves présentant des troubles des apprentissages[17]. Néanmoins, seul un d'entre eux appartenait à la tranche d'âge permettant un appariement[18]. Le groupe contrôle était constitué de 32 participants issus de la cohorte de 239 élèves sans difficultés d'apprentissage présentée dans les études précédentes. Ils présentaient des performances en lecture de mots et orthographe de mots dans la norme (i.e. supérieur à -1 e.t.) et étaient appariés sur le genre, l'âge et le quotient intellectuel non verbal avec les enfants du groupe « trouble des apprentissages ». Les caractéristiques des deux groupes peuvent être retrouvés dans le Tableau 16 (p.153).

[16] Les 32 élèves retenus dans cette étude avaient été retirés des analyses pour les études 1.1., 2.1. et 3.

[17] L'ensemble des élèves recrutés dans les associations ont réalisé les mêmes tâches et les participants inclus dans le groupe « trouble des apprentissage » présentaient tous des difficultés de lecture et d'orthographe comparativement aux élèves du même niveau scolaire.

[18] Afin de pouvoir intégrer ces participants plus âgés à l'étude, il était prévu de recruter des élèves sans troubles du langage écrit appariés en genre, âge et quotient intellectuel en mars-juin 2020. Du fait de la crise sanitaire, ces élèves n'ont pas pu être inclus au moment de la rédaction de la thèse.

Dans un second temps, le groupe « troubles des apprentissages » a été divisé en deux sous-groupes sur la base du niveau des habiletés motrices (élevées vs faibles). Afin de constituer ces sous-groupes, les scores z des différentes épreuves du M-ABC ont été calculés en utilisant la moyenne et l'écart-type du groupe contrôle apparié[19]. Un score z moyen a ensuite été calculé afin d'obtenir une mesure globale du niveau de motricité fine. Les élèves présentant un score z inférieur à 0 étaient considérés comme ayant de faibles compétences motrices tandis que les autres étaient considérés comme ayant de compétences motrices élevées.

Deux sous-groupes ont été constitués de la même façon afin de distinguer les élèves présentant de faibles habiletés rythmiques des élèves présentant des habiletés rythmiques élevées. Pour cela, les scores z des variables de précision et de variabilité de la précision ont été calculés. Un score z moyen a ensuite été calculé pour obtenir une mesure des habiletés rythmiques. Les élèves avec un score inférieur à 0 étaient considérés comme ayant de faibles habiletés rythmiques et les autres étaient considérés comme ayant des habiletés rythmiques élevées. Les caractéristiques des différents sous-groupes peuvent être retrouvées dans les Tableau 17 et Tableau 18 (p.155 et p.157).

2.2. MATERIEL ET PROCEDURE

Différentes mesures du langage écrit (lecture et orthographe de mots, compréhension et rédaction de texte), de la motricité fine (dextérité unimanuelle, coordination bimanuelle et contrôle visuo-moteur), des habiletés rythmiques, de l'écriture manuscrite (tâche de l'alphabet), des fonctions exécutives (mémoire de travail, inhibition, flexibilité mentale et planification) et des habiletés phonologiques (conscience phonologique et dénomination rapide) ont été réalisées dans le cadre de l'étude. La procédure et les tâches utilisées sont décrites dans les études 1.1. et 2.1 (voir p.75 et p.114).

Afin d'identifier plus finement les différences de traitement rythmique entre les deux groupes, des mesures absentes des précédentes études ont été intégrées dans la présente étude bien que la tâche utilisée soit identique. Comme présenté précédemment, les habiletés rythmiques ont été évaluées avec une tâche de synchronisation et de poursuite de rythme régulier (Wolff, 2002). Au cours de la phase de synchronisation, le participant devait se synchroniser à des stimuli rythmiques présentés à différentes fréquences : 1.5 Hz (soit un intervalle inter stimulus de 666 ms), 2 Hz (soit un ISI de 500 ms) et 2.5 Hz (soit un ISI de 400 ms). Pendant la phase de poursuite de rythme, le stimulus était retiré et le participant devait continuer à produire le rythme. La précision, la variabilité et l'anticipation ont été mesurées pour les différentes tâches

[19] Notons que l'utilisation de la moyenne et de l'écart type des 239 élèves sans difficultés de la cohorte présentée dans les études précédentes ne change pas la constitution des groupes.

(synchronisation et poursuite de rythme) et pour chaque fréquence (1.5 Hz, 2 Hz et 2.5 Hz) (Thomson & Goswami, 2008). La *précision* de la synchronisation correspond à l'écart par rapport au stimulus, c'est à dire à la différence absolue entre l'IIT (intervalle entre deux réponses du participant) et l'intervalle inter-stimulus. La mesure de la précision est donc toujours positive – une valeur proche de 0 indiquant une précision importante. La *variabilité* de la synchronisation correspondait à l'écart type des IITs au sein d'un bloc. Un score proche de 0 indique donc une faible variabilité. Enfin, *l'anticipation* correspond à la différence non absolue entre l'IIT et l'intervalle inter-stimulus : cette mesure permet de déterminer si le sujet a tendance à répondre en anticipation ou en réaction au stimulus. La mesure d'anticipation varie autour de 0, un score négatif indiquant une anticipation et un score positif indiquant une réponse en réaction au stimulus. Pour chacune de ces mesures, un score moyen a été calculé (i.e. moyenne des deux conditions : synchronisation et poursuite de rythme à différentes fréquences : 1.5 Hz, 2 Hz et 2.5 Hz). Ainsi, trois mesures du rythme ont été utilisées dans l'étude : la précision de la synchronisation, la variabilité de la synchronisation et l'anticipation du stimulus.

2.3. ANALYSES STATISTIQUES

Différentes analyses ont été effectuées. Tout d'abord, les habiletés motrices et rythmiques des groupes d'élèves avec et sans troubles des apprentissages ont été comparées à l'aide de t-test, ou de tests de Mann-Whitney quand les données ne suivaient pas une loi normale.

Puis, des comparaisons entre les différents sous-groupes d'élèves présentant un trouble des apprentissages ont été réalisées pour étudier (1) l'impact du niveau de motricité sur le langage écrit, les fonctions exécutives et l'écriture manuscrite et (2) l'impact du niveau d'habiletés rythmiques sur le langage écrit, les fonctions exécutives et les habiletés phonologiques. Du fait de la petite taille des groupes, des tests non paramétriques de Mann-Whitney ont été réalisés pour comparer les élèves présentant un trouble du langage écrit avec des habiletés motrices faibles et élevées, puis les élèves des habiletés rythmiques faibles et élevées. Enfin, les relations entre les habiletés motrices et rythmiques ont été évaluées au sein du groupe d'élèves présentant un trouble du langage écrit. Pour cela, des tests de Mann-Whitney ont été effectués pour comparer les habiletés motrices et rythmiques dans les différents sous-groupes.

3. RESULTATS

3.1. COMPARAISON AVEC DES ELEVES AVEC ET SANS TROUBLES DES APPRENTISSAGES

Les caractéristiques des différents groupes sont reportées dans le tableau ci-dessous (Tableau 16). Les deux groupes ayant été constitués sur la base des résultats en lecture et en

orthographe de mots, une différence significative est retrouvée pour ces deux variables. De plus, les deux groupes diffèrent sur les deux autres mesures du langage écrit : la compréhension écrite, $t(62) = 5{,}49$; $p < .001$, et la rédaction de texte $t(62) = 4{,}52$, $p < .001$. Le groupe « trouble des apprentissages » obtient également des scores moins élevés sur différentes mesures phonologiques comme la conscience phonologique, $t(62) = 2{,}81$, $p = .007$, et la mémoire de travail verbal, $t(62) = 3{,}25$, $p = .002$, ainsi que sur la mesure d'écriture manuscrite, $t(62) = 3{,}80$, $p < .001$. Par contre, aucune différence significative entre les groupes n'est retrouvée pour la dénomination rapide et pour les différentes mesures des fonctions exécutives non-verbales. Le détail des caractéristiques des groupes sur les habiletés phonologiques et les fonctions exécutives peuvent être retrouvées en annexes (voir Annexe 3, p.255).

Les analyses ne rapportent aucune différence significative entre les groupes pour les différentes mesures de la motricité : dextérité manuelle de la main dominante : $t(62) = -0{,}61$, $p = .55$; dextérité manuelle de la main non dominante : $U = 486.50$, $p = .73$; coordination bimanuelle : $U = 464{,}50$, $p = .67$; contrôle visuo-moteur : $U = 361{,}00$, $p = .13$. Par ailleurs, l'analyse des performances individuelles des élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit révèle que 18 élèves (soit 60%) obtiennent des performances inférieures à la moyenne du groupe contrôle (voir Tableau 17, p.155).

Concernant les habiletés rythmiques, la comparaison des deux groupes révèle une différence significative pour la précision de la synchronisation indiquant que les élèves avec un trouble des apprentissages sont moins précis que les élèves du groupe contrôle, $U = 281{,}00$, $p = .008$ et qu'ils anticipent plus le stimulus, $U = 269{,}00$, $p = .005$. Les deux groupes ne diffèrent pas pour la mesure de la variabilité de la synchronisation, $U = 421{,}00$, $p = .54$. Par ailleurs, l'examen des performances individuelles des élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit révèle que la majorité d'entre eux obtient des performances inférieures à la moyenne du groupe contrôle (69%) mais que tous ces élèves ne présentent pas de faibles habiletés rythmiques (voir Tableau 18, p.157).

Tableau 16: Caractéristiques des deux groupes d'élèves avec un trouble des apprentissages ou sans trouble (i.e. groupe contrôle apparié)

	Contrôle	**Trouble des apprentissages**	***t***	***U***	***p*-value**
N	32	32			
Sex Ratio (F/G)[1]	17/15	17/15			
Âge moyen[1]	8 ans 5 mois (4 mois)	8 ans 5 mois (3 mois)			
QI non verbal[1]	98,81 (10,71)	98,22 (10,66)			
Langage écrit					
Score z lecture de mots [2]	-0,03 (0,47)	-2,20 (1,15)		32,00	<.001***
Score z orthographe de mots[2]	-0,21 (0,55)	-2,70 (0,80)		0,00	<.001***
Compréhension écrite /12	9,34 (2,01)	6,17 (2,53)	5,49		<.001***
Rédaction	5,42 (1,14)	4,18 (1,02)	3,52		<.001***
Motricité fine					
Dextérité de la main dominante (s.)	23,94 (3,56)	24,53 (4,25)	-0,61		.55
Dextérité de la main non dominante (s.)	26,59 (4,30)	26,88 (3,99)	-0,27		.79
Coordination bimanuelle (s.)	31,23 (10,79)	30,72 (10,21)		454,50	.67
Contrôle visuo-moteur (erreurs)	2,35 (2,23)	3,03 (1,92)		361,00	.13
Habiletés rythmiques					
Précision moyenne de la synchronisation (ms)	35,20 (16,80)	62,98 (40,40)		281,00	.008**
Variabilité moyenne de la synchronisation (ms)	73,32 (32,74)	85,00 (46,20)		421,00	.54
Anticipation moyenne du stimulus (ms)	-5,68 (30,95)	-40,28 (51,07)		269,00	.005**

*** p <.001 ; ** p <.01 ; * p <.05 ; # p <.10

[1] Variables sur lesquelles les groupes ont été appariés

[2] Variables sur lesquels les groupes ont été constitués

3.2. INFLUENCE DU NIVEAU DE MOTRICITE ET/OU RYTHMIQUE CHEZ LES ELEVES PRESENTANT DES TROUBLES DES APPRENTISSAGES

3.2.1. Influence de la présence de difficultés motrices associées

Afin d'étudier plus précisément l'influence du niveau de motricité chez les élèves présentant un trouble du langage écrit, ceux-ci ont été divisés en deux sous-groupes[20]. Leurs caractéristiques sont reportées dans le tableau ci-dessous (Tableau 17). Comme attendu, le sous-groupe d'élèves présentant de faibles habiletés motrices obtient des performances significativement inférieures à l'autre groupe sur les tâches de dextérité unimanuelle, de coordination bimanuelle et de contrôle visuomoteur. Par ailleurs, le quotient intellectuel non verbal et l'âge des deux groupes ne diffèrent pas significativement. Enfin, soulignons qu'aucune différence significative n'est rapportée pour la habiletés phonologiques.

Concernant le langage écrit, le groupe présentant des difficultés motrices obtient des scores significativement plus faibles sur les tâches d'orthographe de mots irréguliers $U = 54{,}00$, $p = .01$. De plus, des différences proches de la significativité sont retrouvées sur les tâches d'orthographe de mots régulier, $U = 69{,}00$, $p = .09$, et de compréhension écrite, $U = 52{,}5$, $p = .06$. Enfin, aucune différence significative n'est retrouvée entre les groupes pour la tâche de l'alphabet ou pour les fonctions exécutives.

[20] Les graphiques présentant les performances des différents groupes obtenues sur les différentes variables peuvent être retrouvés en Annexe (voir Annexe 4, p.263)

Tableau 17: Caractéristiques des élèves avec un trouble des apprentissages divisant en deux sous-groupes sur la base de leurs habiletés motrices

	Habiletés motrices faibles	**Habiletés motrices élevées**	***U***	***p*-value**
N	18	12		
Sex Ratio (F/G)	8/10	8/4		
Âge moyen	8 ans 4 mois (3 mois)	8 ans 4 mois (2 mois)	98,0	.69
QI non verbal	97,17 (10,72)	99,08 (11,52)	92,5	.53
Motricité fine				
Dextérité de la main dominante (s.) [1]	26,61 (3,65)	21,42 (4,28)	28,5	<.001***
Dextérité de la main non dominante (s.) [1]	28,67 (4,19)	23,92 (3,49)	29,0	<.001***
Coordination bimanuelle (s.) [1]	34,78 (11,52)	25,00 (4,41)	49,0	.01*
Contrôle visuo-moteur (erreurs) [1]	4,00 (1,38)	1,58 (1,38)	27,5	<.001***
Langage écrit				
Lecture MR /20	10,38 (5,52)	12,42 (2,78)	92,0	.51
Lecture MI /20	3,83 (2,83)	4,50 (2,50)	89,5	.44
Lecture PM /20	8,33 (4,39)	10,92 (2,71)	73,0	.14
Orthographe MR /10	1,78 (1,52)	3,17 (2,89)	69,0	.10#
Orthographe MI /10	0,61 (1,04)	1,58 (0,90)	54,5	.01*
Orthographe PM /10	4,67 (3,09)	4,33 (2,23)	102,0	.81
Compréhension /12	5,54 (2,50)	7,45 (2,25)	52,5	.06#
Rédaction /10	4,12 (1,24)	4,25 (0,75)	87,5	.53
Fonctions exécutives				
Mémoire de travail VS /32	10,94 (2,26)	11,83 (2,95)	86,5	.37
Mémoire de travail verbale /30	11,44 (4,15)	11,42 (4,34)	107,0	.98
Inhibition (a) (diff. de temps en s.)	10,59 (7,35)	9,67 (4,68)	98,0	.88
Inhibition (b) (diff. de temps en s.)	36,19 (9,32)	37,55 (9,95)	80,0	.71
Flexibilité (a) : TMT (diff. de temps en s.)	92,00 (44,86)	92,36 (31,17)	72,0	.81
Flexibilité (b) : TeaCh (temps/nombre changement)	6,79 (1,58)	5,70 (1,69)	44,0	.18
Planification /46	20,11 (6,32)	20,67 (7,35)	100,0	.75
Ecriture manuscrite				
Tâche de l'alphabet (nombre de lettres produites)	9,13 (2,10)	10,16 (2,66)	82,5	.29

Note. MR : mots réguliers ; MI : mots irréguliers ; PM : pseudo-mots ; VS : visuo-spatiale

*** p <.001 ; ** p <.01 ; * p <.05 ; # p <.10

[1] Variables sur lesquels les groupes ont été constitués

3.2.2. Influence de la présence de difficultés rythmiques associées

Afin d'étudier les conséquences du niveau d'habiletés rythmiques, les élèves du groupe « troubles des apprentissages » ont été répartis en deux sous-groupes[21] (Tableau 18). Comme attendu, les deux groupes sont significativement différents pour les mesures de précision et de variabilité de la synchronisation. Aucune différence significative n'est retrouvée entre les groupes pour l'âge et le quotient intellectuel non verbal, bien que les élèves présentant des difficultés rythmiques tendent à être plus jeunes, $U = 49{,}5$; $p = .06$.

Les deux groupes obtiennent des résultats significativement différents en orthographe de mots réguliers, $U = 41{,}0$, $p = .02$. De plus, les élèves présentant des habiletés rythmiques plus élevées tendent à mieux orthographier les mots irréguliers, $U = 52{,}5$, $p = .06$.

Concernant les fonctions exécutives, les deux groupes diffèrent significativement pour la tâche de flexibilité mentale de la TEA-Ch, $U = 33{,}5$, $p = .03$. Soulignons toutefois que l'examen des performances individuelles des élèves (voir Annexe 4, p.257) indique qu'un des élèves présente de très faibles performances par rapport aux autres et les résultats peuvent être dus à la présence de cet outlier. Un résultat proche de la significativité est également retrouvé pour la tâche de planification, $U = 51{,}5$, $p = .07$: néanmoins, contrairement à ce qui est attendu, les élèves avec de faibles habiletés rythmiques tendent à obtenir de meilleurs résultats sur cette tâche.

Aucune autre différence significative entre les groupes n'a été retrouvée – que ce soit pour les autres mesures du langage écrit, des fonctions exécutives ou pour les habiletés phonologiques.

[21] Les graphiques présentant les performances des différents groupes obtenues sur les différentes variables peuvent être retrouvés en Annexe (voir Annexe 4, p.263)

Tableau 18: Caractéristiques des élèves avec un trouble des apprentissages divisant en deux sous-groupes sur la base de leurs habiletés rythmiques

	Habiletés rythmiques faibles	**Habiletés rythmiques élevées**	***U***	***p*-value**
N	20	9		
Sex Ratio (F/G)	10/10	5/4		
Âge moyen	8 ans 3 mois (2 mois)	8 ans 5 mois (3 mois)	49,5	.06#
QI non verbal	96,90 (11,00)	97,67 (9,38)	83,0	.76
Habiletés rythmiques				
Précision moyenne de la synchronisation (ms) [1]	79,31 (38,42)	26,69 (7,76)	8,0	<.001***
Variabilité moyenne de la synchronisation (ms) [1]	101,49 (48,36)	50,70 (11,81)	24,0	.001***
Langage écrit				
Lecture MR /20	10,45 (4,76)	11,89 (2,76)	75,0	.49
Lecture MI /20	3,65 (2,78)	4,44 (1,67)	66,5	.27
Lecture PM /20	8,95 (4,14)	10,22 (2,17)	76,5	.54
Orthographe MR /10	1,70 (1,60)	3,78 (2,00)	41,0	.02*
Orthographe MI /10	0,85 (1,14)	1,67 (0,87)	52,5	.06#
Orthographe PM /10	4,30 (3,05)	4,44 (1,81)	80,0	.65
Compréhension /12	6,28 (2,63)	5,89 (2,71)	75,0	.78
Rédaction /10	4,03 (1,14)	4,22 (0,36)	75,5	.63
Fonctions exécutives				
Mémoire de travail VS /32	11,25 (2,43)	10,89 (3,37)	86,0	.87
Mémoire de travail verbale /30	11,15 (4,08)	11,44 (2,96)	86,0	.87
Inhibition (a) (diff. de temps en s.)	9,95 (6,95)	10,00 (5,72)	81,0	.84
Inhibition (b) (diff. de temps en s.)	35,78 (8,68)	37,33 (12,37)	76,5	.84
Flexibilité (a) : TMT (diff. de temps en s.)	96,00 (44,03)	88,86 (15,13)	47,0	.35
Flexibilité (b) : TeaCh (temps/nombre changement)	6,96 (1,70)	5,55 (1,54)	42,5	.03*
Planification /46	21,30 (6,33)	16,78 (5,97)	51,5	.07#
Habiletés phonologiques				
Conscience phonologique /20	10,70 (5,12)	8,44 (3,24)	66,0	.54
Dénomination rapide (s.)	30,40 (7,44)	27,67 (5,12)	76,5	.89

Note. MR : mots réguliers ; MI : mots irréguliers ; PM : pseudo-mots ; VS : visuo-spatiale

*** p <.001 ; ** p <.01 ; * p <.05 ; # p <.10

[1] Variables sur lesquels les groupes ont été constitués

3.2.3. Cooccurrence les difficultés motrices et rythmiques au sein du groupe d'élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit

Pour finir, des analyses ont été effectuées afin d'étudier les relations entre les habiletés motrices et rythmiques au sein du groupe d'élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit. Les résultats indiquent que les élèves présentant de faible performances motrices ne sont pas significativement moins précis pour se synchroniser à un métronome, $U = 74{,}00$; $p = .51$, ni plus variables, $U = 64{,}00$; $p = .25$. A l'inverse, les élèves présentant les plus faibles habiletés rythmiques obtiennent des résultats significativement inférieurs sur l'une des tâches motrices évaluant le contrôle visuo-moteur, $U = 28{,}50$; $p = .02$. Cependant, aucune autre différence significative n'est retrouvée entre les sous-groupes pour les autres tâches motrices. Comme représenté dans la figure ci-dessous (Figure 13), près de la moitié des élèves présentent à la fois de faibles habiletés motrices et de faibles habiletés rythmiques (52%). Toutefois, ces difficultés ne sont pas toujours associées : 11% des élèves ont de faibles habiletés motrices mais des habiletés rythmiques préservées et 22% des élèves ont des habiletés motrices élevées mais présentent de faibles habiletés rythmiques.

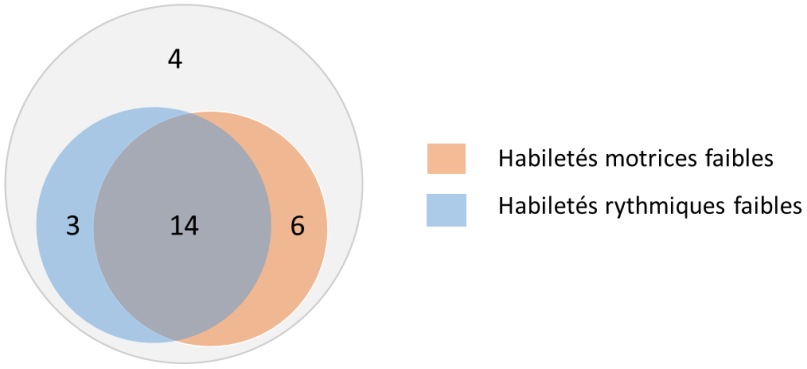

Figure 13: Nombre de participants présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit (gris) associé ou non à des difficultés motrices et/ou rythmiques.

4. DISCUSSION

L'objectif de cette étude était d'étudier les habiletés motrices et rythmiques chez des élèves présentant un trouble des apprentissages. Dans un premier temps, nous avons cherché à confirmer l'altération des habiletés motrices/rythmiques dans cette population en comparant leurs performances à celles d'un groupe contrôle apparié en âge. Dans un second temps, l'influence de ces habiletés sur les difficultés de lecture et d'écriture a été testée en comparant différents sous-groupes d'élèves avec un trouble de l'apprentissage du langage écrit. En accord avec les résultats des études menées chez les élèves sans difficultés (voir Etude 1.2 et 2.2., p.73 et p.112), nous nous attendions à ce qu'un faible niveau de motricité et/ou d'habiletés rythmiques associées impacte négativement l'apprentissage du langage écrit dans cette population. Enfin, les relations entre les difficultés motrices et rythmiques chez les élèves présentant un trouble du langage écrit ont été évalué en comparant les différents sous-groupes.

4.1. HABILETES MOTRICES DES ELEVES PRESENTANT DES TROUBLES DES APPRENTISSAGES.

4.1.1. Comparaison avec le groupe contrôle

En ce qui concerne les habiletés motrices, nos résultats ne reportent pas de différences significatives entre les groupes d'enfants avec ou sans trouble des apprentissages. Les études antérieures avaient déjà pointé des résultats divergents : par exemple, certaines reportent une altération de l'équilibre dans la dyslexie (Brookes et al., 2010; Jongmans et al., 2003) tandis que d'autres ne retrouvent pas de différences sur ces mesures avec le groupe contrôle (Stoodley et al., 2006). Ces différences peuvent être expliquées par la présence de sous-types d'élèves dyslexiques – présentant des troubles moteurs associés ou non. En effet, bien que cette association soit fréquente, les troubles du langage écrit ne sont pas systématiquement associés à des difficultés motrices (Jover et al., 2013; Ramus, 2003). De ce fait, le pourcentage d'élèves dyslexiques présentant un trouble de la motricité associé varie fortement en fonction des études : 9,7% à 70% (Jover et al., 2013) et la comparaison de groupes d'élèves dyslexiques à un groupe contrôle ne permet montre pas toujours de différences significatives entre les groupes (Ramus, 2003). Par ailleurs, la variabilité des résultats peut aussi s'expliquer par des différences dans les critères d'inclusion utilisés. Alors que certaines études n'intègrent que des élèves avec un diagnostic de dyslexie, d'autres – comme dans notre étude – intègrent plus généralement les mauvais lecteurs. Il est probable que l'absence de diagnostic de dyslexie rajoute encore plus d'hétérogénéité au sein de notre groupe d'élèves avec un trouble de l'apprentissage du langage écrit. En résumé, les résultats de cette étude ne permettent pas de conclure à une plus grande altération des habiletés motrices chez les élèves présentant un trouble du langage écrit. Ces résultats soulignent la nécessité de plutôt distinguer différents sous-groupes (avec ou sans difficultés motrices) plutôt

que de comparer les élèves présentant des troubles des apprentissages du langage écrit à un groupe contrôle.

4.1.2. Distinction des sous-groupes

Afin de mieux caractériser les implications de difficultés motrices associées au trouble du langage écrit, deux sous-groupes ont été constitués en distinguant les élèves avec de faibles habiletés motrices des élèves avec des habiletés motrices élevées. En accord avec les modèles réalisés dans les études précédentes, l'objectif était de confirmer une aggravation du trouble du langage écrit chez les élèves présentant de faibles habiletés motrices. Ces difficultés plus importantes seraient la conséquence d'une altération des fonctions exécutives et de l'écriture manuscrite découlant du déficit moteur, qui viendrait s'ajouter au trouble phonologique classiquement rapporté dans cette population (Gooch et al., 2011; Snowling, 1995).

Les résultats révèlent en premier lieu que de faibles habiletés motrices sont associées à une altération de l'apprentissage de l'orthographe des mots. Les élèves avec de faibles compétences motrices ont plus de difficultés à orthographier des mots irréguliers et tendent à moins bien orthographier les mots réguliers. Par contre, aucune différence significative entre les groupes n'est retrouvée pour la tâche d'écriture des pseudo-mots, qui repose principalement sur les habiletés phonologiques (correspondance grapho-phonémique) (Rapp, 2015), ni sur les autres mesures du langage écrit évaluées – que ce soit pour la lecture de mots, la compréhension écrite ou la rédaction. Nos résultats semblent donc indiquer que les difficultés motrices sont associées à une plus grande altération du traitement orthographique, mais pas du traitement phonologique, chez les élèves présentant un trouble du langage écrit. Ces résultats peuvent être rapprochés de ceux de Di Brina et al. (2018) qui ont montré que les élèves dyslexiques avec des difficultés motrices associées présentent des difficultés de lecture moins marquées que les élèves sans trouble associé, malgré la présence d'un trouble orthographique. Les auteurs proposent qu'un déficit phonologique est à l'origine des difficultés des élèves avec une dyslexie isolée, alors que l'on retrouve un trouble du traitement orthographique, consécutif aux difficultés d'écriture manuscrite, chez les élèves avec une comorbidité. En accord avec cette hypothèse, plusieurs travaux ont montré l'implication de la pratique motrice sur l'apprentissage de l'orthographe de nouveaux mots dans le développement typique (Bosse et al., 2014; Suggate et al., 2018) et suggèrent un effet délétère des difficultés motrices sur la construction des représentations orthographiques du mot.

Afin de mieux comprendre comment le niveau de motricité influe sur le trouble du langage écrit, nous avons comparé les sous-groupes sur deux médiateurs potentiels de cette relation : les fonctions exécutives et l'écriture manuscrite (voir Etude 1.1, p.73).

Aucune différence significative n'a été rapportée entre les groupes pour les fonctions exécutives. Plusieurs travaux antérieurs s'étant intéressés aux conséquences de l'association entre un trouble dyslexique et un trouble moteur sur les fonctions exécutives avaient déjà pointé des résultats divergents. Ainsi, certaines ont rapporté que la comorbidité se traduisait par une aggravation des difficultés attentionnelles et d'inhibition par rapport aux élèves avec un trouble isolé (Puyjarinet et al., 2017), d'autres ont montré une association de difficultés propre à la dyslexie et au TDC, sans aggravation par rapport à un trouble isolé (Maziero et al., 2020). Enfin, certaines études ne rapportent pas de différences significatives entre les groupes d'élèves dyslexiques avec ou sans troubles moteurs associés alors que le groupe présentant un TDC isolé présente des difficultés visuo-spatiales qui lui sont propres (Biotteaux et al., 2017). Ces résultats divergents soulignent encore une fois l'hétérogénéité au sein des troubles neuro-développementaux.

La présente étude ne rapporte pas non plus de différences significatives entre les sous-groupes pour la mesure de l'écriture manuscrite. Pourtant, plusieurs études ont montré des relations entre les habiletés motrices et l'automatisation de l'écriture manuscrite, que ce soit dans le développement typique (Berninger & Fuller, 1992; Kaiser et al., 2009; Volman et al., 2006) ou chez les élèves présentant un trouble de la motricité (Huau et al., 2015; Prunty et al., 2013; Rosenblum & Livneh-Zirinski, 2008). Notons que l'écriture manuscrite est également altérée dans la dyslexie développementale (Sumner et al., 2013) mais que ces difficultés d'écriture manuscrite ont des origines différentes dans chaque trouble. Nous nous attendions donc à retrouver un geste d'écriture plus altéré chez les enfants présentant à la fois un trouble du langage écrit et de faibles habiletés motrices – qui sont confrontés à ces deux types de difficultés. Bien que nos résultats ne permettent pas de prouver que l'addition de ces deux types de difficultés impacte l'écriture manuscrite, soulignons que la tâche de l'alphabet que nous avons utilisé ici ne permet pas une analyse fine des caractéristiques – notamment kinesthésiques – de l'écriture manuscrite. Or, l'étude des pauses et des pics d'accélération dans l'écriture à l'aide d'enregistrement sur tablette digitalisée a permis de mettre en évidence des profils à priori distincts (Afonso et al., 2019). Une étude plus approfondie de la cinétique de l'écriture chez des enfants présentant à la fois des difficultés motrices et langagières est nécessaire afin de mieux comprendre quels sont les processus d'écriture impactés dans cette population. Par ailleurs, l'étude de Di Brina et al. (2018) comparant deux sous-groupes d'élèves dyslexiques avec ou sans trouble moteur associé a rapporté des différences de qualité de l'écriture – mais pas dans la vitesse d'écriture. La mise en évidence de difficultés d'écriture spécifiques en présence de difficultés motrices doit donc être poursuivie et pourrait permettre d'expliquer les différences retrouvées dans notre étude entre les deux sous-groupes sur les tâches orthographiques.

En conclusion, les résultats de notre étude ne permettent pas de confirmer totalement notre hypothèse. Des différences significatives sur certaines mesures du langage écrit (dictée de mots irréguliers) suggèrent une influence délétère des difficultés motrices associées à un trouble de l'apprentissage du langage écrit. Cependant, l'absence de résultats significatifs sur d'autres variables langagières et sur les médiateurs potentiels de ces relations (e.g. écriture manuscrite) invitent à se montrer prudent dans nos interprétations. D'autres travaux sont nécessaires pour confirmer le potentiel impact négatif de difficultés motrices dans les troubles de l'apprentissage du langage écrit.

4.2. HABILETES RYTHMIQUES DES ELEVES PRESENTANT DES TROUBLES DES APPRENTISSAGES.

4.2.1. Comparaison avec le groupe contrôle

Concernant les habiletés rythmiques, nos résultats indiquent que la précision de la synchronisation à un métronome est altérée chez les élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit par rapport aux élèves sans difficultés. Ces résultats sont concordants avec de précédentes études qui rapportent un déficit de la perception et de la production de rythmes dans les troubles du langage (Huss et al., 2011; Thomson & Goswami, 2008). Une analyse plus fine des différentes mesures rythmiques confirme les résultats antérieurs et montre que les élèves dyslexiques anticipent plus l'apparition du stimulus lors d'une tâche de synchronisation (Thomson & Goswami, 2008; Wolff, 2002). Cependant, alors que plusieurs théories ont proposé qu'un déficit du traitement des stimuli rythmiques soit à l'origine des troubles du langage (Goswami, 2011; Ladányi et al., 2020), l'examen des performances individuelles des élèves montre que ce déficit rythmique n'est pas retrouvé chez tous les élèves présentant des difficultés de lecture et d'écriture. En effet, 9 d'entre eux (soit 30% des élèves inclus dans le groupe « trouble des apprentissages ») obtiennent des performances sur la tâche rythmique supérieures à la moyenne des élèves du groupe contrôle.

Bien que nos résultats confirment l'existence de difficultés rythmiques dans le trouble de l'apprentissage du langage écrit, déjà décrites dans la littérature, ils montrent également que le déficit du traitement rythmique n'est pas systématique. Ceci souligne la nécessité d'évaluer l'influence du niveau d'habiletés rythmiques au sein même du groupe d'élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit afin d'étudier l'influence de ces difficultés rythmiques sur la symptomatologie.

4.2.2. Distinction des sous-groupes

Dans un second temps, nous avons cherché à déterminer si de faibles habiletés rythmiques étaient associées à un trouble plus marqué du langage écrit. Pour cela, deux sous-groupes ont été distingués au sein du groupe « trouble des apprentissages ». Notons que ces deux sous-groupes

étaient très déséquilibrés, la majorité des élèves présentant de faibles habiletés rythmiques (N = 20) pour peu d'élèves avec des habiletés rythmiques élevés (N = 9). Les résultats montrent une différence dans le traitement orthographique : les élèves avec de faibles habiletés motrices présentant significativement plus de difficultés pour l'écriture de mots réguliers. Des différences proches de la significativité sont également retrouvées pour l'orthographe de mots irréguliers. Cependant, aucune autre différence significative n'est retrouvée entre les groupes.

En accord avec les hypothèses de médiation formulées pour les élèves sans difficultés (Etude 2.1., p.112), nous nous attendions à ce que les élèves avec de faibles habiletés rythmiques présentent plus de difficultés lors de tâches évaluant les fonctions exécutives et les habiletés phonologiques. Ceci majorerait en conséquence le trouble de l'apprentissage du langage écrit. La comparaison des deux sous-groupes pour les mesures des fonctions exécutives indique que de faibles habiletés rythmiques sont significativement associées à une détérioration de la flexibilité mentale, mesurée par une tâche de la TEA-Ch. Ce résultat conforte ceux retrouvés dans le développement typique – qui reportent un effet des habiletés rythmiques sur le langage écrit médiatisé par les fonctions exécutives. Notons toutefois que la présence d'outlier sur cette mesure limite l'interprétation (voir Annexe 4, p.257). De plus aucune autre différence significative n'est retrouvée entre les groupes, que ce soit pour l'autre mesure de la flexibilité ou pour les autres fonctions exécutives (mémoire de travail, inhibition et planification). Les évidences d'un effet délétère de faibles habiletés rythmiques sur les fonctions exécutives dans cette population sont donc fragiles et doivent être répliquées.

Pour ce qui est des habiletés phonologiques, aucune différence significative n'a été retrouvée entre les deux sous-groupes. Pourtant, il avait été proposé que le trouble du traitement rythmique soit à l'origine du déficit phonologique dans la dyslexie (Goswami, 2011) et plusieurs études ont montré des corrélations entre les difficultés rythmiques et phonologiques dans cette population (Flaugnacco et al., 2014; Huss et al., 2011). Ces résultats divergents peuvent provenir de la mesure de la conscience phonologique utilisée : en effet, dans l'étude de Huss et al. (2011), les auteurs utilisent une tâche de jugement de rimes. Or, Goswami (2011) a proposé que les difficultés rythmiques dans la dyslexie altèrent la perception d'unités phonologiques plus larges que le phonème (e.g. rimes et syllabes) mais pas le traitement phonémique. Néanmoins, cette hypothèse n'est pas concordante avec l'étude de Flaugnacco et al. (2014) qui rapporte également une corrélation entre les performances à une tâche de segmentation phonémique et de production de rythme chez des élèves dyslexiques de 8 à 11 ans. Une différence de méthodologie doit également être soulignée : nous avons utilisé une comparaison de groupes alors que des analyses corrélationnelles ont été utilisées dans les autres études. Or, il est possible que ce type d'approche soit plus pertinente dans la mesure où la majorité des élèves avec un trouble de l'apprentissage

du langage écrit présente également des difficultés du traitement rythmique. Les relations entre les habiletés rythmiques et phonologiques dans cette population doivent encore être clarifiées.

Pour conclure, de plus faibles compétences orthographiques sont retrouvées chez les élèves avec de faibles habiletés rythmiques – comme nous l'avions également retrouvé chez les élèves avec de faibles habiletés motrices. Toutefois, l'examen de deux médiateurs potentiels (fonctions exécutives et habiletés phonologiques) ne permet pas d'expliquer ce résultat et d'autres études sont nécessaires pour comprendre l'influence des troubles du rythme sur le langage écrit.

4.3. COOCCURRENCE ENTRE LES DIFFICULTES RYTHMIQUES ET MOTRICES

Au-delà de l'étude de l'influence de faibles habiletés motrices et rythmiques sur le trouble du langage écrit, nous avons cherché ici à mettre en lien ces deux habiletés non-langagières dans cette population. En effet, nos résultats indiquent que les difficultés motrices et rythmiques sont toutes les deux reliées à une altération du traitement orthographique chez les élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit. Par ailleurs, l'étude du développement typique et des troubles moteurs montre que les habiletés motrices et rythmiques sont étroitement reliées (Monier & Droit-Volet, 2019; Whitall et al., 2008). Pourtant, contrairement aux résultats d'une précédente étude menée chez des élèves sans difficultés d'apprentissage (voir Etude 3, p.138), nos résultats montrent ici que les élèves avec de faibles habiletés motrices ne sont pas moins précis ou moins variables que les autres sur une tâche de synchronisation à un rythme. Inversement, la présence de difficultés rythmiques n'est pas associée à de plus faibles performances sur des tâches de motricité. Ce résultat fait écho à des études antérieures qui rapportent que la capacité à se synchroniser sur un rythme prédit le niveau de lecture chez des élèves dyslexiques indépendamment de la présence de difficultés motrices (Thomson et al., 2006; Thomson & Goswami, 2008). Nos résultats suggèrent donc que, dans le trouble de l'apprentissage du langage écrit, les habiletés motrices et rythmiques sont indépendantes.

4.4. LIMITES DE L'ETUDE

Bien que la présente étude permette d'étudier spécifiquement plusieurs habiletés chez des élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit, il est important de souligner plusieurs limites méthodologiques.

Tout d'abord, les critères d'inclusion utilisés ici ne permettent pas de confirmer le diagnostic de dyslexie. En effet, malgré l'utilisation de tests étalonnés, plusieurs critères nécessaires au diagnostic, comme par exemple l'impact sur la vie quotidienne et la scolarité n'ont pas été utilisés. L'absence de diagnostic pluridisciplinaire, permettant d'écarter les diagnostics

différentiels, empêche de généraliser nos résultats aux élèves présentant une dyslexie développementale. Soulignons également que les sous-groupes ont été constitués en séparant les élèves ayant obtenu des résultats inférieurs et supérieurs à la moyenne obtenue par le groupe contrôle. Cette méthode permet de distinguer les élèves avec de faibles habiletés motrices et/ou rythmiques mais pas de confirmer la présence de déficits moteurs ou rythmiques (i.e. scores z inférieurs à -1,5 e.t.). En conséquence, le groupe présentant de faibles habiletés motrices ne peut être assimilé à la présence d'un TDC étant donné qu'il ne s'agit pas d'élèves présentant un réel déficit moteur et qu'ils n'ont pas fait l'objet d'un diagnostic.

Par ailleurs, bien que le QI ait été contrôlé, nos critères d'inclusion ne permettent pas d'identifier précisément d'autres troubles neuro-développementaux comme le TDA-H ou un trouble spécifique du langage oral. Or, il est probable que certains enfants inclus présentent ces troubles dont les symptômes peuvent partiellement expliquer certaines différences retrouvées. Par exemple, des difficultés du traitement rythmique et temporel ont été rapportées dans les troubles de l'attention (Ladányi et al., 2020; Puyjarinet et al., 2017). Il est donc possible que dans notre étude, la différence entre le groupe « trouble des apprentissage » et le groupe contrôle soit due à la présence de troubles de l'attention associés. De même, l'inclusion d'élèves présentant un TDAH associé dans les sous-groupes d'élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit peut aussi influer sur les résultats – notamment sur les fonctions exécutives qui sont altérées dans ce trouble (Barkley, 1997; Gooch et al., 2011).

Une autre limite réside dans la taille limitée de l'échantillon : seuls 32 élèves ont été intégrés dans l'étude et il est nécessaire de répliquer ce résultat dans de plus grands groupes. Enfin, il est important de souligner que notre étude ne permet aucunement de confirmer ce lien causal. Des études interventionnelles sont nécessaires afin de confirmer de possibles liens de cause à effet.

5. CONCLUSION

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés aux habiletés motrices et rythmiques chez les élèves présentant un trouble des apprentissages. Les résultats ne reportent pas de difficultés motrices chez ces élèves comparativement à un groupe contrôle apparié. A l'inverse, ils confirment l'altération des habiletés rythmiques déjà rapportée par plusieurs auteurs. Par ailleurs, notre étude suggère un effet délétère de faibles habiletés motrices et/ou rythmiques sur l'orthographe de mots au sein du groupe d'élèves présentant un trouble des apprentissages. Il est toutefois nécessaire de répliquer ces résultats et de d'étudier plus avant les mécanismes qui sous-tendent l'aggravation du déficit orthographique en présence des difficultés motrices et/ou

rythmiques, afin de mieux comprendre comment interagissent ces difficultés. Enfin, contrairement aux résultats retrouvés dans le développement typique, nos résultats ne confirment pas la relation entre les difficultés rythmiques et motrices dans cette étude : il semble donc que les difficultés rythmiques retrouvées dans les troubles du langage soient indépendantes de difficultés motrices.

CHAPITRE 10 : UN JEU VIDEO ENTRAINANT LES HABILETES MOTRICES : QUELS BENEFICES SUR LA MOTRICITE ET L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT CHEZ LES ELEVES AVEC OU SANS DIFFICULTES ?

1. INTRODUCTION

Le projet DysApp dans lequel s'intègre cette thèse a pour but de concevoir un jeu vidéo sur tablette permettant de solliciter différentes habiletés non-langagières : la motricité fine, les habiletés rythmiques et la planification visuo-spatiale. L'un des objectifs du projet est de confirmer l'efficacité de l'outil pour améliorer à la fois les compétences ciblées par les activités (e.g. la motricité fine) mais également le langage écrit des élèves avec ou sans troubles des apprentissages. Toutefois, l'efficacité du jeu pour entraîner chacune des habiletés non-langagières ciblées n'a pas pu être évaluée dans le cadre de la thèse. Du fait de contraintes temporelles et techniques, l'une des habiletés non langagières a dû être sélectionnée afin de pouvoir développer et tester en priorité les activités du jeu entraînant cette compétence. Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi de nous focaliser sur les activités sollicitant la motricité et de tester spécifiquement les bénéfices de cette partie du jeu sur les habiletés motrices et sur le langage écrit.

La présente étude comporte deux principaux objectifs. Le premier consiste à valider l'efficacité de l'utilisation du jeu vidéo conçu dans le cadre du projet pour améliorer les habiletés motrices. Actuellement, un nombre croissant de jeux éducatifs sont développés pour soutenir les apprentissages et venir en aide aux élèves présentant des troubles neuro-développementaux, mais peu de ces jeux ont fait l'objet d'une validation scientifique. Bien que l'utilisation de jeux vidéo pour entraîner les habiletés motrices ait déjà fait l'objet de plusieurs études, que ce soit chez des élèves présentant un trouble développemental de la coordination (TDC) (Wilson et al., 2016) ou chez les élèves sans difficultés (McGlashan et al., 2017), la plupart d'entre elles présentent des limites méthodologiques. Par exemple, la majorité de ces études implique trop peu de participants (i.e. groupes inférieurs à 10 participants) et ne comportent pas de groupe contrôle actif. Les bénéfices de ces interventions restent encore débattus du fait de ces limites méthodologiques et des divergences retrouvées d'une étude à l'autre (Wilson et al., 2016). L'ambition de la présente étude est donc de démontrer l'intérêt des outils numériques – et notamment des jeux sur tablette tactile, pour améliorer la motricité fine d'élèves de CM1 en testant les bénéfices de l'intervention sur une large cohorte et en évaluant son effet en fonction du profil des élèves (avec ou sans difficultés d'apprentissage). Le second objectif de l'étude est de confirmer le lien causal entre la motricité fine et l'apprentissage du langage écrit chez les élèves au développement typique et chez

les élèves présentant des difficultés d'apprentissage. Au cours des précédentes études, nous avons testé l'hypothèse d'une influence des habiletés motrices sur le langage écrit chez des élèves de CE2 et CM1 avec ou sans troubles des apprentissages. Les résultats indiquent que les habiletés motrices sont en lien avec différentes dimensions du langage écrit chez les élèves sans difficultés et confortent notre hypothèse. Néanmoins, la relation causale entre ces compétences doit être confirmée car les études corrélationnelles ne permettent pas de conclure à l'existence d'un lien de causalité entre les différentes habiletés. Une méthode permettant de montrer plus directement l'influence d'une compétence sur une autre consiste en la mise en place d'une intervention entraînant cette compétence et d'en évaluer le bénéfice. Ici, l'effet d'une intervention visant à améliorer les habiletés motrices sur l'apprentissage du langage écrit doit être examiné. Par ailleurs, les études précédentes suggèrent que ce lien est expliqué d'une part par un effet de la motricité sur le développement des fonctions exécutives et d'autre part par un effet de la motricité sur l'automatisation de l'écriture manuscrite qui influencent en retour l'apprentissage du langage écrit (voir Etude 1.1., p.73). Ces hypothèses de médiation doivent également être confirmées par une étude interventionnelle en montrant les bénéfices d'une intervention motrice sur ces deux médiateurs potentiels.

Pour répondre à ces différentes questions, nous avons testé ici l'efficacité d'un entraînement moteur sur tablette chez des élèves de CM1 avec et sans troubles des apprentissages. L'entraînement est basé sur les activités du jeu développé dans le cadre du projet. Nous nous attendons à ce que la pratique du jeu améliore à la fois les habiletés motrices mais également le langage écrit des (Cameron et al., 2016; Schmidt et al., 2017; Suggate et al., 2018). Plus précisément, nous nous attendons à ce que les bénéfices retrouvés sur le langage écrit soient en lien avec une amélioration de la motricité, mais également avec une amélioration des deux facteurs médiateurs de cette relation : les fonctions exécutives et l'écriture manuscrite.

2. METHODE

2.1. PARTICIPANTS

Au total, 17 classes de CM1 réparties dans 11 écoles élémentaires de la région Nouvelle Aquitaine ont accepté de participer au projet. En amont des pré-tests, les classes ont été réparties aléatoirement dans le groupe contrôle (8 classes, soit 124 élèves) ou le groupe expérimental (5 classes, soit 124 élèves). L'une des écoles du groupe contrôle a quitté l'étude au cours de l'expérimentation. De plus, plusieurs élèves absents au cours des pré-tests ou des post-tests et trois élèves non francophones ont été retirés avant les analyses statistiques. Au final, seuls 200 élèves de CM1 ayant participé à l'ensemble du protocole ont été inclus (groupe contrôle : 89 ;

groupe expérimental : 111). Tous les participants disposaient d'une autorisation parentale et l'étude a été validée par le comité d'éthique des universités de Tours et de Poitiers.

Avant de procéder aux analyses statistiques, les élèves ont été répartis en différents groupes sur la base de la présence de difficultés de langage écrit – définie par la présence d'un score déficitaire sur les tâches de lecture et d'orthographe de mots de la BALE (voir Etude 1.1., p.75). Cinquante-trois élèves ont été inclus dans le groupe d'élèves avec un trouble des apprentissages[22] (groupe contrôle : 33 ; groupe expérimental : 20) et 147 élèves ont été inclus dans le groupe d'élèves sans difficultés (groupe contrôle : 56 ; groupe expérimental : 91). Les caractéristiques de chaque groupe sont rapportées dans le tableau ci-dessous (Tableau 19).

Tableau 19: Caractéristiques des différents groupes de l'étude interventionnelle

	Elèves avec un trouble des apprentissages		**Elèves sans difficultés d'apprentissage**	
	Contrôle	Expérimental	Contrôle	Expérimental
N	33	20	56	91
Sex ratio (F/G)	17/16	10/10	32/24	49/42
Âge (année)	9 ans 11 mois (6 mois)	9 ans 11 mois (3,7 mois)	9 ans 6 mois (2,8 mois)	9 ans 10 mois (2,4 mois)

2.2. MATERIEL

2.2.1. Pré-tests et post-tests

2.2.1.1. Motricité

Dextérité manuelle. La dextérité manuelle a été évaluée au travers de différentes tâches issues de deux batteries de tests étalonnées. Deux subtests du M-ABC ont été administrés (Henderson & Sugden, 1992). Au cours de la tâche de dextérité unimanuelle, l'enfant devait déplacer 12 chevilles sur une planche avec la main dominante puis avec la main non dominante. Deux essais ont été réalisés et les meilleurs temps pour la main dominante et la main non dominante ont été additionnés afin d'obtenir une variable unique. Lors de la tâche de coordination bimanuelle, il était demandé de visser un boulon sur un écrou. Deux essais ont été proposés et le meilleur temps a été conservé. Le subtest « Tapping » de la NEPSY – 2 a également été utilisé pour évaluer la dextérité unimanuelle (Korkman et al., 2012). Au cours de cette épreuve, il était

[22] Le pourcentage d'élèves présentant un trouble des apprentissages est de 28,16%. Cette forte proportion doit être soulignée et peut être attribuée à l'implication de classes spécialisées dans la prise en charge de ces élèves.

demandé de taper l'index contre le pouce 20 fois le plus vite possible (items Répétition), puis de taper le pouce contre chacun des autres doigts le plus vite possible (items Séquence). Les deux exercices ont été réalisés avec la main dominante puis la main non dominante. Un temps total de réalisation des différents exercices a été retenu. Au total, trois variables de dextérité manuelle ont donc été utilisées : le temps total de déplacement des chevilles (dextérité unimanuelle), le temps total de réalisation des exercices de la NEPSY (dextérité unimanuelle) et le temps mis pour visser un boulon (coordination bimanuelle).

Compétences graphomotrices : Les compétences graphomotrices ont été évaluées avec une tâche de copie de symboles, sur la base du test proposé par Suggate et al., (2016). Vingt runes scandinaves ont été présentées aux enfants (voir Annexe 5, p.259). La consigne était de recopier le plus de symboles possible en trente secondes. Le nombre de runes correctement recopiées a été ensuite comptabilisé et utilisé dans les analyses.

2.2.1.2. Langage écrit

Différentes tâches ont été utilisées pour évaluer le langage écrit (identification de mots, orthographe de mots isolés, orthographe lexicale et grammaticale et compréhension de la lecture). Elles sont décrites dans les études précédentes.

Identification de mots : La lecture de mots et pseudo-mots a été évaluée au travers de l'épreuve de lecture de la BALE (Jacquier-Roux et al., 2010) (voir Etude 1.1., p.75). Le temps total de lecture des trois listes ainsi qu'un score total sur 60, calculé à partir du nombre de mots et pseudo-mots correctement lus, ont été utilisés comme variable dépendante.

Orthographe lexical et grammaticale : Deux tâches ont été utilisées pour évaluer l'orthographe des élèves. Tout d'abord, la dictée de mots et pseudo-mots de la BALE a été administrée (Jacquier-Roux et al., 2010) (voir Etude 1.1., p.75). Le nombre total de mots et pseudo-mots correctement orthographiés a été utilisé comme variable (score total sur 30). De plus, la dictée de texte « le corbeau » issue de la batterie L2MA (Chevrie-Muller et al., 1997) a été proposée (voir. Etude 1.1., p.75). Deux scores ont été calculés afin d'évaluer l'orthographe lexicale (score sur 30) et l'orthographe grammaticale (score sur 23).

Compréhension de la lecture : L'épreuve de compréhension développée par Potocki et al., (2014) a été utilisée pour évaluer la compréhension écrite (voir Etude 1.1., p.75). Le score total sur 12 a été utilisé dans les analyses.

2.2.1.3. Fonctions exécutives

Inhibition : Le contrôle inhibiteur a été mesuré avec une tâche de Flanker adaptée pour les enfants (Eriksen & Eriksen, 1974; McDermott et al., 2007). Au cours de cet exercice, le

participant devait indiquer le plus rapidement possible dans quelle direction était orienté le poisson situé au milieu d'une ligne de cinq poissons sans tenir compte des distracteurs. Quinze essais congruents et 15 essais incongruents ont été administrés dans un ordre aléatoire. Le pourcentage de réussite ainsi que le temps de réaction moyen ont été extraits pour les essais congruents et incongruents afin de calculer deux scores d'interférence, correspondant à la différence entre les deux conditions.

Flexibilité mentale : Deux tâches ont été utilisées pour évaluer la flexibilité mentale. Le premier test était une variante non langagière du Trail Making Test (Reitan, 1971) : le Color Trail Test (D'Elia et al., 1996). Dans cet exercice, il est tout d'abord demandé de relier des chiffres dans l'ordre le plus vite possible dans la Condition A puis de relier des chiffres en alternant entre deux couleurs dans la Condition B. La différence de temps entre les deux conditions a été utilisée comme indicateur de flexibilité. La seconde épreuve de flexibilité était le subtest des « Petits Hommes Verts » de la TEA-Ch (Manly et al., 2006) utilisé dans l'étude précédente (voir Etude 1.1., p.76). Comme précédemment, une note correspondant au temps divisé par le score a été utilisée comme variable dépendante.

2.2.1.4. Ecriture manuscrite

La tâche d'écriture manuscrite proposée était la tâche de l'alphabet (Berninger & Fuller, 1992) présentée précédemment (voir Etude 1.1., p.77). Dans le cadre de cette étude, les élèves ont réalisé l'exercice deux fois d'affilée et le meilleur score (i.e. nombre de lettres produites en 15 secondes) a été utilisé comme variable dépendante.

2.2.2. Jeux vidéo

2.2.2.1. Jeu de motricité

Présentation du jeu

Dans le cadre du projet DysApp, un jeu vidéo sur tablette[23] spécialement conçu pour solliciter différentes habiletés non-langagières (motricité fine, habiletés rythmiques et planification visuo-spatiale) a été développé par la société Tralalère en collaboration avec le Centre de Recherches sur la Cognition et l'Apprentissage (CeRCA, UMR 7295, Université de Poitiers, CNRS) et le Centre d'Etude et de Recherche en Informatique et Communication (CEDRIC, EA 4629, Conservatoire National des Arts et Métiers).

Le jeu vidéo était constitué de différentes activités ciblant chacune les habiletés motrices (e.g. suivre une cible avec son doigt le plus précisément possible), les habiletés rythmiques (e.g. se synchroniser sur un rythme) ou la planification visuo-spatiale (e.g. planifier la trajectoire d'une flèche) (voir Figure 14). L'ensemble de ces activités était développé en collaboration étroite avec le CeRCA afin de concevoir des tâches qui entraîneraient au mieux les compétences ciblées. En amont de l'étude d'entraînement, plusieurs sessions de test du jeu en école ont été réalisées avec des intervenants de l'université de Poitiers pour évaluer la qualité des exercices proposés.

Les activités développées comportaient différents niveaux et à la fin de chacun d'entre eux, un retour était fourni à l'enfant pour le renseigner sur sa réussite ou son échec avant de passer au niveau suivant. L'outil était muni d'un système adaptatif permettant d'ajuster le niveau des activités proposées et la vitesse de progression aux éventuelles difficultés des joueurs. A la fin de chaque session de jeu, les données étaient envoyées sur un serveur pour permettre l'enregistrement et le suivi de la progression des élèves.

En accord avec les travaux rapportant les bénéfices de la ludification sur la motivation des élèves (e.g. Buckley & Doyle, 2016), l'ensemble des activités était intégrées dans un univers attrayant et scénarisé (voir Figure 14b et Figure 15). Des renforcements (e.g. cinématiques, apparition de nouveaux éléments suite à une réussite) étaient apportés tout au long du jeu afin de maintenir la motivation des élèves (Figure 14).

[23] Plus d'informations sur l'outil peuvent être retrouvées sur le site internet du jeu : https://www.brume-le-jeu.fr/

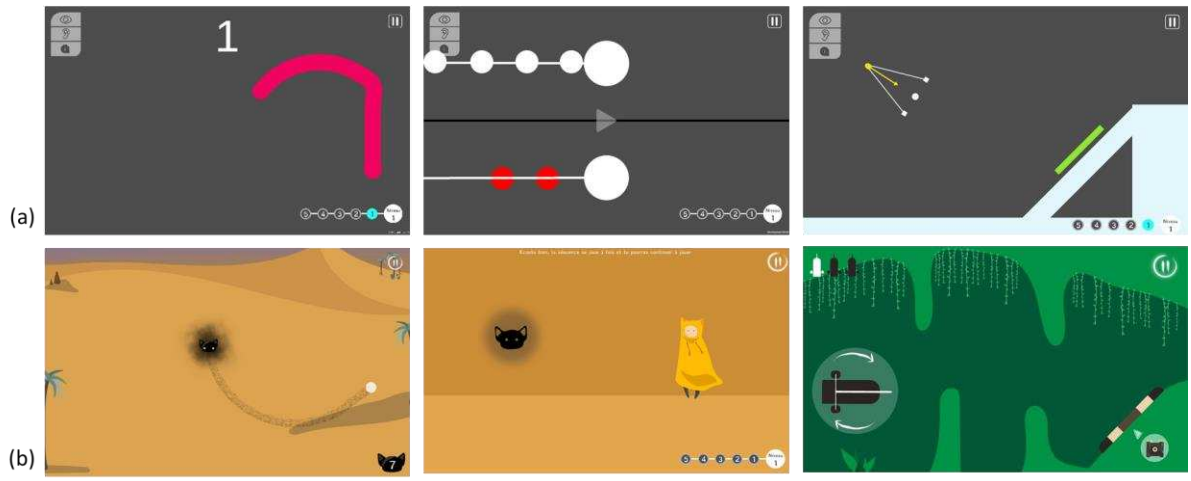

Figure 14 : (a) Capture d'écran des premières versions des activités du jeu avant l'habillage (de gauche à droite : activités de motricité, de rythme et de planification visuo-spatiale). (b) Capture d'écran des mêmes activités après habillage (de gauche à droite : activités de motricité, de rythme et de planification visuo-spatiale).

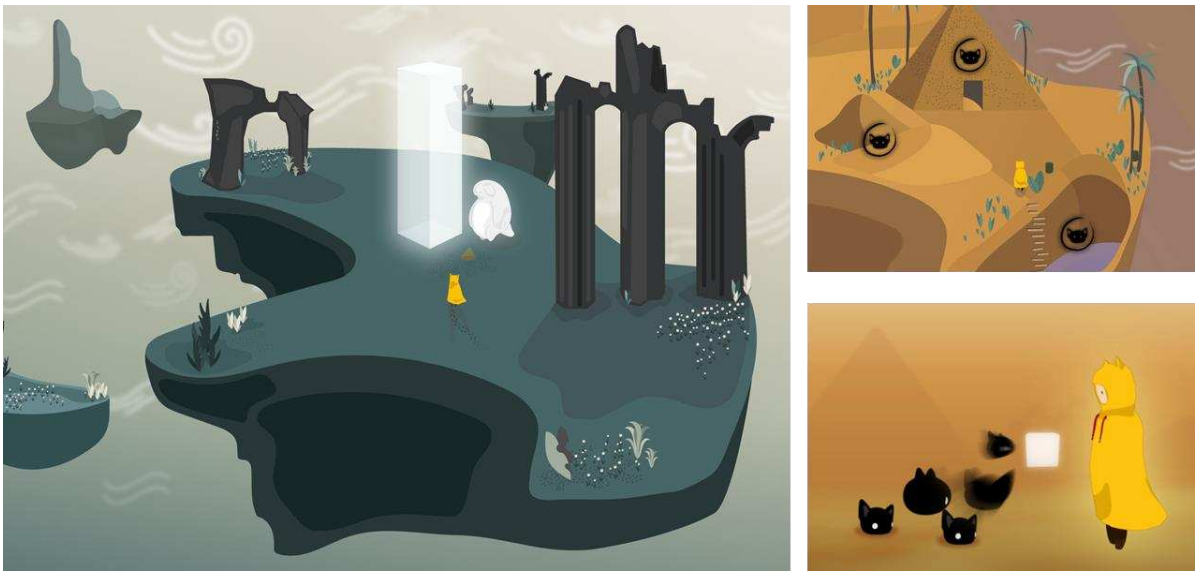

Figure 15: Capture d'écran du jeu : le joueur évolue dans un univers scénarisé et ludique. De nouvelles parties sont débloquées au fur et à mesure de la progression dans le jeu (en haut à droite) et des cinématiques indiquent à l'enfant quand il a fini l'exercice (en bas à droite).

Présentation des activités motrices utilisées dans le cadre de l'entraînement.

Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé une version simplifiée du jeu permettant de cibler spécifiquement l'entraînement des habiletés motrices au travers de trois activités différentes. Celles-ci ont été programmées pour durer 5 minutes afin de proposer un temps de jeu d'une vingtaine de minutes par séance. Les trois activités sont présentées ci-dessous.

River (Figure 16) : Dans cette activité de dextérité manuelle, l'objectif est d'attraper des cibles avec la pince pouce-index en évitant des obstacles. La main dominante et la main non dominante sont toutes les deux entraînées dans ce jeu. La vitesse d'apparition des obstacles et des cibles détermine la difficulté. Un nombre de vie est déterminé au début du niveau : à chaque obstacle touché une vie est perdue et un échec est enregistré quand toutes les vies sont perdues.

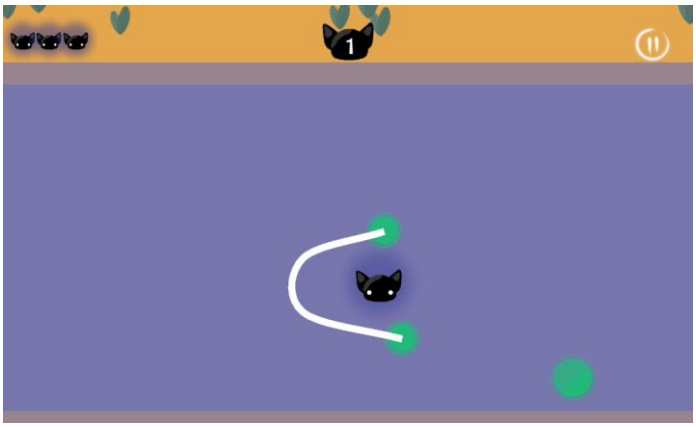

Figure 16: Capture d'écran de l'activité "River"

Twister (Figure 17) : Une activité de pianotage a été développée pour travailler le déliement digital. Dans ce jeu, l'enfant doit toucher ou déplacer différentes cibles avec chaque doigt le plus vite possible. Dans les niveaux les plus complexes, plusieurs cibles doivent être touchées en même temps ou successivement afin de contraindre le mouvement des différents doigts. Si la mauvaise cible est touchée ou déplacée (e.g. cible de l'index au lieu de la cible du majeur), un échec est enregistré.

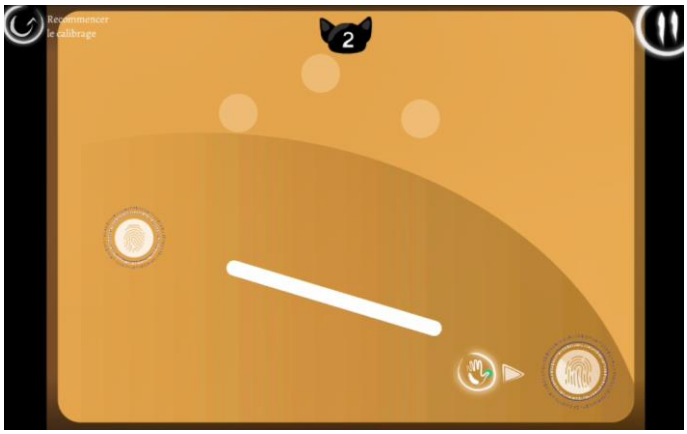

Figure 17: Capture d'écran de l'activité "Twister"

Trace (Figure 18) : Au cours de cette activité qui sollicite le contrôle visuo-moteur, l'enfant doit suivre la trajectoire d'une cible avec son doigt le plus rapidement et le plus précisément possible. La difficulté du tracé varie avec le nombre et la taille des angles et des boucles, la vitesse de déplacement de la cible et la longueur de la trajectoire. Un échec est enregistré s'il s'arrête au cours du tracé ou dévie de la trajectoire de la cible.

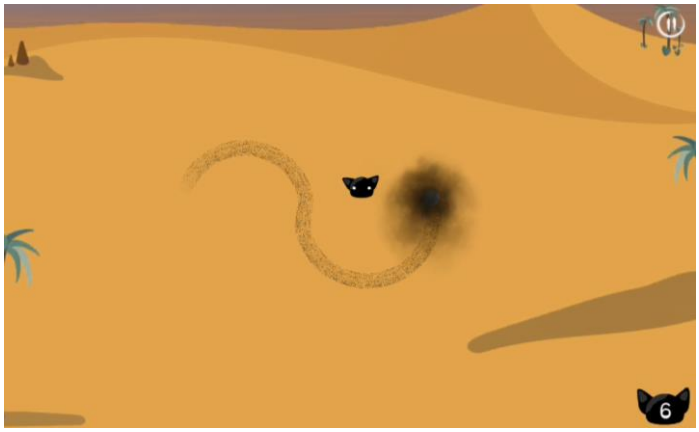

Figure 18 : Capture d'écran de l'activité "Trace"

2.2.2.2. Jeux contrôles

Afin de pouvoir tester les bénéfices de l'intervention basée sur la pratique du jeu, les performances des élèves entraînés au jeu de motricité ont été comparées à celles d'élèves ayant utilisé un autre type de jeu. Différents jeux sur tablette tactile ont été sélectionnés. Ils devaient répondre aux critères suivants :

- Proposer un contenu éducatif pour pouvoir être utilisés en classe.
- Ne pas solliciter les compétences langagières.
- Solliciter le moins possible les habiletés motrices : les jeux sollicitant des mouvements avec plusieurs doigts (e.g. attraper un item avec une pince pouce-index, taper sur un clavier tactile) ou des mouvements de tracé (de figures, lettres ou chiffres) ont donc été écartés.

Afin de répondre à ces différents critères, deux jeux vidéo de mathématiques ont été retenus. Le jeu d'initiation aux équations DragonBox Algebra (https://dragonbox.com) a été proposé au cours des six premières séances. Puis des jeux de calcul mental issus du logiciel calcul@TICE développés par l'académie de Lille (https://calculatice.ac-lille.fr) ont été utilisés au cours des six dernières séances.

2.3. PROCEDURE

En amont de l'étude, les différentes écoles ont été réparties aléatoirement en deux groupes : un groupe contrôle (N=89) et un groupe expérimental (N=111). Tous les élèves ont réalisé l'ensemble des pré-tests en février et mars 2019. Au cours de la phase d'entraînement (mars 2019-mai 2019), les deux groupes ont joué à un jeu sur tablette (mathématiques ou motricité en fonction du groupe). L'entraînement a duré 6 semaines à raison de 2 sessions de 20 minutes par semaine de la fin du mois de mars au début du mois de mai 2019. Notons que cette phase a été entrecoupée par une période de 15 jours de vacances au cours de laquelle les enfants n'ont pas joué. Les sessions d'entraînement ont été encadrées par un intervenant de l'université de Poitiers, sur la totalité des sessions pour les classes du groupe expérimental, et une session sur deux pour les classes du groupe contrôle. A l'issu des six semaines d'entraînement, la motricité, le langage écrit et les fonctions exécutives ont été réévaluées dans les deux groupes (post-tests en mai et juin 2019).

2.4. ANALYSES STATISTIQUES

En premier lieu, des t-tests ont été réalisés afin de confirmer que le groupe expérimental et le groupe contrôle présentaient des résultats similaires lors du pré-test. Puis, des modèles linéaires à effets mixtes ont été utilisés afin de tester les bénéfices de l'entraînement moteur sur les différentes variables d'intérêt (motricité, langage écrit et médiateurs potentiels : les fonctions exécutives et l'écriture manuscrite). Les modèles testés comportaient deux effets fixes (condition d'entraînement : moteur vs contrôle ; session : pré-test vs post-test) et deux effets aléatoires imbriqués (participant et école). Nous nous attendions à ce que (1) les performances des élèves s'améliorent dans les deux groupes entre le pré-test et le post-test et (2) l'effet de l'entraînement soit plus important dans le groupe ayant bénéficié du jeu de motricité par rapport au groupe ayant joué aux jeux contrôles. Autrement dit, l'hypothèse formulée était que l'effet d'interaction entre la condition d'entraînement (jeu moteur vs jeu contrôle) et la session (pré-test vs post-test) soit significatif pour chacune des variables dépendantes évaluant la motricité, le langage écrit et les deux médiateurs potentiels (fonctions exécutives et écriture manuscrite).

3. RESULTATS

3.1. ANALYSES DESCRIPTIVES

Les caractéristiques des différents groupes lors du pré-test peuvent être retrouvées dans le tableau ci-dessous (Tableau 20). Il est important de relever que les groupes contrôle et expérimental diffèrent sur certaines mesures en pré-test. En effet, dans le cas des élèves présentant un trouble des apprentissages, le groupe contrôle présente des performances significativement inférieures en orthographe grammaticale, $t(50) = -2.10$, $p = .04$, en compréhension écrite, $t(49) = -3.35$, $p = .002$ et en flexibilité mentale sur la tâche du CTT, $t(50) = 2.87$, $p = .006$. Les élèves sans troubles des apprentissages diffèrent également lors du pré-test : le groupe contrôle présente des résultats significativement supérieurs en dextérité manuelle sur la tâche de la NEPSY, $t(145) = -3.31$, $p < .001$, et en orthographe de mot sur l'épreuve de la BALE, $t(145) = 1.96$, $p = .05$.

Tableau 20 : Scores en pré-tests des différents groupes de l'étude interventionnelle

	Elèves avec un trouble des apprentissages				**Elèves sans difficultés d'apprentissage**			
	Contrôle	Exp.	*t*	*p*	Contrôle	Exp.	*t*	*p*
Motricité fine								
Dextérité unimanuelle Chevilles M-ABC (s.)	34,56 (8,37)	34,50 (5,32)	0,03	.97	32,16 (4,24)	31,44 (3,93)	1,05	.29
Dextérité unimanuelle Tapping NEPSY (s.)	37,57 (7,47)	38,05 (6,77)	-0,23	.82	34,11 (8,48)	39,90 (11,3)	-3,31	.001***
Coordination bimanuelle Ecrou M-ABC (s.)	16,94 (5,92)	16,42 (4,00)	0,34	.74	15,80 (5,78)	15,44 (5,06)	0,39	.69
Copie de runes (nombre de symboles)	5,85 (1,75)	6,45 (1,00)	-1,40	.17	7,52 (2,41)	7,22 (1,99)	0,81	.42
Langage écrit								
BALE : Lecture de mots – précision (/60)	30,61 (9,42)	34,65 (7,26)	-1,64	.11	49,0 (5,85)	48,1 (5,77)	0,91	.37
BALE : Lecture de mots – vitesse (.s)	146,52 (50,61)	145,55 (74,70)	0,06	.96	80,3 (30,3)	87,1 (32,1)	-1,28	.20
BALE : Orthographe de mots (/30)	12,79 (4,08)	14,35 (4,49)	-1,30	.20	24,2 (3,49)	22,9 (3,81)	1,96	.05*
L2MA : Orthographe lexicale (/30)	6,09 (3,20)	7,95 (4,26)	-1,79	.08	15,8 (3,48)	14,6 (4,04)	1,83	.07
L2MA : Orthographe grammaticale (/23)	2,91 (1,69)	4,00 (2,03)	-2,10	.04*	7,02 (2,54)	6,90 (2,33)	0,29	.76
Compréhension écrite (/12)	5,81 (2,85)	8,60 (2,85)	-3,35	.002**	9,43 (2,09)	10,1 (1,75)	-1,98	.05
Fonctions exécutives								
Inhibition (diff. de pourcentage)	-9,77 (17,56)	-4,35 (9,22)	1,26	.21	-2,47 (8,06)	-4,65 (15,8)	-0,96	.33
Inhibition (diff. de temps en ms)	33,03 (77,11)	37,15 (59,31)	0,20	.84	45,16 (50,8)	43,84 (74,5)	0,12	.91
Flexibilité : CTT (diff. de temps en s.)	84,03 (49,37)	50,05 (23,65)	2,87	.006**	54,31 (29,2)	52,32 (26,9)	-,64	.52
Flexibilité : TeaCh temps/nombre changement)	4,81 (1,70)	4,84 (1,11)	-0,08	.94	4,14 (1,13)	4,37 (1,38)	-1,01	.31
Ecriture manuscrite								
Tâche de l'alphabet (nombre de lettres)	11,06 (3,91)	12,60 (2,74)	-0,54	.13	13,54 (3,23)	13,91 (2,87)	-0,74	.46

3.2. EFFETS DE L'INTERVENTION SUR LES ELEVES SANS DIFFICULTES D'APPRENTISSAGE

3.2.1. Résultats sur les habiletés motrices

Les résultats indiquent que les deux groupes d'élèves sans difficultés d'apprentissage ont amélioré leur dextérité unimanuelle du pré-test au post-test, que ce soit pour la tâche de déplacement de cheville du M-ABC, $F(1, 140.00) = 14.59$, $p < .001$, ou pour la tâche de séquences digitales de la NEPSY, $F(1, 144.70) = 34.41$, $p < .001$. De plus, un effet du groupe, $F(1, 11.75) = 6.62$, $p = .02$, et un effet d'interaction, $F(1, 144.70) = 10.75$, $p = .001$, sont retrouvés pour la tâche de motricité de la NEPSY. Les tests de Tukey réalisés en post-hoc révèlent que seul le groupe expérimental s'améliore significativement d'une session à l'autre sur cette tâche de dextérité manuelle (Figure 19). Concernant la tâche de coordination bimanuelle, aucun effet du groupe, de la session ou d'interaction n'a été mis en évidence. Enfin, bien que les compétences graphomotrices des élèves s'améliorent au fil du temps, $F(1, 145.00) = 68.17$, $p < .001$, ni l'effet du groupe ni l'effet d'interaction n'est significatif pour la tâche de copie de runes.

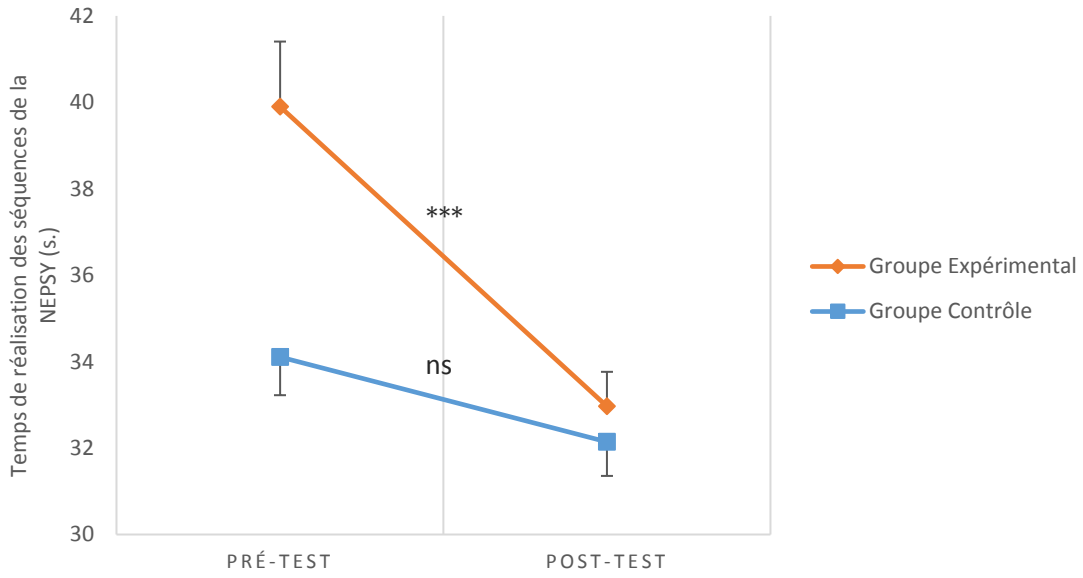

Figure 19 : Effet de l'entraînement sur le temps d'exécution des séquences motrices de la NEPSY chez les élèves sans difficultés d'apprentissage. Les barres d'erreurs correspondent aux erreurs type.

3.2.2. Résultats sur le langage écrit

Les analyses indiquent que les élèves améliorent significativement leurs performances du pré-test au post-test pour l'ensemble des mesures du langage écrit évaluées – exceptée la compréhension écrite. De plus, un effet d'interaction est retrouvé pour la tâche d'orthographe de mots de la BALE, $F(1, 145.00) = 4.31$, $p = .04$ (Figure 20). Les tests de Tukey réalisés en post-hoc rapportent une amélioration significative des scores pour le groupe expérimental ($p < .001$), mais pas pour le groupe contrôle ($p = .70$). Aucun autre effet de groupe ou d'interaction n'est retrouvé pour les variables de langage écrit.

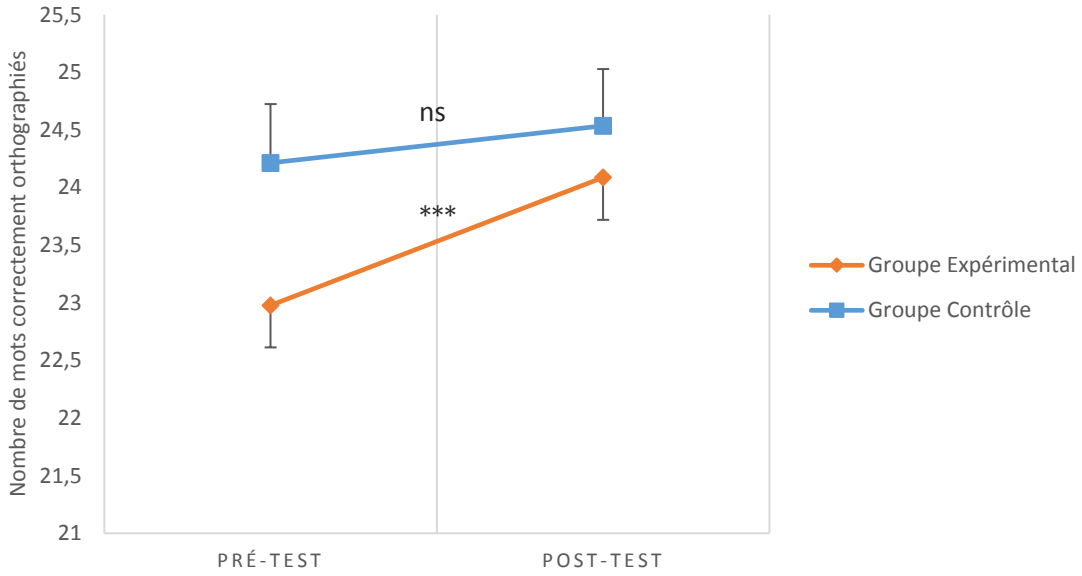

Figure 20 : Effet de l'entraînement sur le niveau d'orthographe chez les élèves sans difficultés d'apprentissage. Les barres d'erreurs correspondent aux erreurs type.

3.2.3. Résultats sur les deux médiateurs potentiels

3.2.3.1. Fonctions exécutives

Les résultats montrent une amélioration significative du pré-test au post-test pour la tâche de flexibilité de la TEACh, $F(1, 141.92) = 27.90$, $p < .001$. Les analyses ne révèlent aucun autre effet significatif pour les deux tâches de flexibilité mentale ainsi que pour la tâche d'inhibition.

3.2.3.2. Ecriture manuscrite

Les analyses indiquent que le nombre de lettres produites au cours de l'exercice augmente du pré-test au post-test, $F(1, 146.00) = 27.78$, $p < .001$. Cependant, ni l'effet du groupe ni l'effet d'interaction n'est significatif.

3.3. EFFETS DE L'INTERVENTION SUR LES ELEVES PRESENTANT DES TROUBLES DES APPRENTISSAGES

3.3.1. Résultats sur les habiletés motrices

Pour les élèves avec un trouble de l'apprentissage du langage écrit, les analyses révèlent une amélioration significative de la dextérité unimanuelle évaluée avec la tâche des chevilles du M-ABC, $F(1, 49.62) = 16.21$, $p < .001$. Une amélioration significative des compétences graphomotrices est également retrouvée du pré-test au post-test, $F(1, 50.34) = 26.76$, $p < .001$. Cependant, aucun effet du groupe ni aucun effet d'interaction n'est reporté.

3.3.2. Résultats sur le langage écrit

Une amélioration significative des performances est également retrouvée pour l'orthographe de mots de la BALE, $F(1, 51.00) = 17.57$, $p < .001$, l'orthographe lexicale du L2MA, $F(1, 50.28) = 14.60$, $p < .001$, et la vitesse de lecture de la BALE, $F(1, 51.00) = 7.42$, $p = .009$. De plus, le groupe contrôle obtient des scores moins élevés que le groupe expérimental en orthographe grammaticale, $F(1, 72.23) = 4.58$, $p = .04$, et en compréhension de la lecture, $F(1, 10.97) = 7.85$, $p = .02$. Aucun effet d'interaction n'est retrouvé.

3.3.3. Résultats sur les deux médiateurs potentiels

3.3.3.1. Fonctions exécutives

Les analyses révèlent une différence de groupe pour la tâche de flexibilité mentale du CTT : les élèves du groupe contrôle obtiennent des résultats inférieurs à ceux du groupe expérimental, $F(1, 86.61) = 9.58$, $p = .002$. Aucun autre effet n'est retrouvé que ce soit pour la deuxième tâche de flexibilité mentale (petits hommes verts de la TEA-Ch) ou pour la tâche d'inhibition (tâche de Flanker).

3.3.3.2. Ecriture manuscrite

Les résultats indiquent que les élèves produisent plus de lettres lors du post-test, $F(1, 51.00) = 7.44$, $p = .008$. Cependant, aucun effet de groupe ni d'interaction n'est retrouvé.

3.4. ANALYSES EXPLORATOIRES

Les analyses précédentes reportent un effet significatif de la pratique du jeu de motricité sur la dextérité manuelle (tâche de la NEPSY) et sur l'orthographe de mots (dictée de mots de la BALE) chez les élèves sans difficultés d'apprentissage du langage écrit. Afin de mieux comprendre les bénéfices de l'entraînement moteur sur l'orthographe, des analyses exploratoires ont été menées afin d'identifier les facteurs qui modulent l'amélioration en orthographe au sein du groupe d'élèves ayant bénéficié du jeu de motricité. Pour cela, une mesure de l'évolution du pré-test au post-test (i.e. différence entre les résultats du pré-test et du post-test) a été calculée pour la tâche d'orthographe de mots de la BALE et pour les différentes variables motrices. Des analyses de corrélation ont ensuite été réalisées pour mettre en relation les améliorations retrouvées sur la tâche d'orthographe de mot et le niveau initial/les améliorations sur les tâches motrices.

Les résultats indiquent qu'au sein du groupe expérimental, les élèves qui ont le plus amélioré leur orthographe sont également ceux qui ont le plus amélioré leur dextérité manuelle (M-ABC – Chevilles : r = -.22, p = .04) (Tableau 21). De plus, l'amélioration en orthographe est corrélée au niveau initial de dextérité manuelle et de graphomotricité (M-ABC – Chevilles : r = -.20, p = .05 ; Copie de rune : r = -.25, p = .02) : es enfants présentant de plus faibles compétences motrices lors du pré-test sont ceux qui améliorent le plus leur orthographe suite à la pratique du jeu. Néanmoins, la tâche de dextérité manuelle de la NEPSY [24] et la tâche de coordination bimanuelle ne sont pas significativement corrélées à l'amélioration en orthographe dans le groupe expérimental. Inversement, aucune corrélation significative entre l'amélioration en orthographe et les améliorations ou le niveau initial en motricité n'a été retrouvée dans le groupe contrôle.

[24] Soulignons, que les analyses précédentes n'ont révélé un effet significatif de la pratique du jeu que sur une mesure motrice : la tâche de dextérité unimanuelle de la NEPSY. Néanmoins aucune corrélation significative entre cette tâche et l'amélioration en orthographe de mots n'a été mise en évidence au sein du groupe expérimental.

Tableau 21 : Matrice de corrélation entre l'amélioration en orthographe du pré-test au posttest et les compétences motrices (amélioration motrice et niveau initial)

	Amélioration en orthographe (Δ = post-test – pré-test) [b]	
	Contrôle (N=56)	Expérimental (N=91)
Amélioration de la motricité (Δ = post-test – pré-test)		
Dextérité unimanuelle : Chevilles M-ABC (s.) [a]	.09	-.22*
Dextérité unimanuelle : Tapping NEPSY (s.) [a]	.16	.13
Coordination bimanuelle : Ecrou M-ABC (s.) [a]	-.16	.06
Copie de runes (nombre de symboles) [b]	.22	-.006
Niveau initial de motricité		
Dextérité unimanuelle : Chevilles M-ABC (s.)	.03	.21*
Dextérité unimanuelle : Tapping NEPSY (s.)	-.13	-.03
Coordination bimanuelle : Ecrou M-ABC (s.)	.04	.03
Copie de runes (nombre de symboles)	-.02	-.25*

Note. *$p < .05$.

[a] Les deltas négatifs indiquent une augmentation de la performance du pré-test au post-test (diminution du temps d'exécution de la tâche motrice).

[b] Les deltas positifs indiquent une augmentation de la performance du pré-test au post-test (diminution du nombre de bonnes réponses/de figures correctement copiées).

4. DISCUSSION

Dans cette étude interventionnelle, nous avons cherché à évaluer les bénéfices d'un nouveau jeu vidéo sur tablette ciblant les habiletés motrices chez des élèves avec ou sans troubles des apprentissages. L'étude comporte deux objectifs principaux. Le premier est de déterminer l'efficacité d'un jeu vidéo sur tablette pour développer les habiletés motrices chez les élèves avec ou sans troubles des apprentissages. Le second objectif s'inscrit dans la continuité des précédentes études : il s'agit de chercher à confirmer l'influence des habiletés motrices sur le développement du langage écrit à la fois chez les élèves tout venants (voir Etudes 1.1. et 1.2., p.73 et p.9171) et chez les élèves présentant des troubles des apprentissages (voir Etude 4, p.147). En effet, l'utilisation d'approches corrélationnelles ou de comparaison de groupe ne permet pas de

conclure, à elles seules, à l'existence d'un lien de causalité entre ces deux habiletés. Aussi, nous avons cherché à confirmer cette hypothèse avec une étude interventionnelle.

4.1. BENEFICES D'UN JEU VIDEO ENTRAINANT LA MOTRICITE SUR LE DEVELOPPEMENT DES HABILETES MOTRICES D'ELEVES SANS TROUBLE DE L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT

Tout d'abord, l'étude des élèves sans troubles des apprentissages suggère que la pratique du jeu vidéo permet d'améliorer la dextérité manuelle, évaluée avec le test du tapping la NEPSY. Plusieurs travaux antérieurs avaient souligné l'intérêt de l'utilisation de programmes d'entraînement numérisés pour améliorer les habiletés motrices (Bonney et al., 2017; Butler et al., 2019; McGlashan et al., 2017; Poon et al., 2010; Short et al., 2018). Par exemple, des études ont montré que les jeux vidéo permettant de pratiquer un exercice physique (i.e. les exergames) pourraient être un outil intéressant pour développer les habiletés motrices des enfants au développement typique de CE1 (Vernadakis et al., 2015) et des enfants présentant un TDC (Bonney et al., 2017; Mentiplay et al., 2019; Wilson et al., 2016). Les entraînements ciblant la motricité fine proposés sur tablette ont également déjà montré leurs bénéfices chez des élèves avec un développement typique de 8 à 10 ans (McGlashan et al., 2017) ou présentant des difficultés motrices (Poon et al., 2010; Short et al., 2018). Il est cependant important de souligner que ces études présentent d'importantes faiblesses méthodologiques (e.g. échantillon inférieur à 10 participants, absence de groupe contrôle). De plus, la majorité de ces études a été menée chez des élèves de maternelle ou de CP (Butler et al., 2019; Poon et al., 2010; Short et al., 2018) ou chez les élèves présentant des troubles de la motricité (Mentiplay et al., 2019; Wilson et al., 2016). Notre étude permet de conforter ces résultats antérieurs en prouvant le bénéfice de la pratique d'un jeu vidéo sur les habiletés motrices chez des élèves sans difficulté de CM1.

Cependant, soulignons que, bien que la motricité fine ait été évaluée avec quatre tâches, l'effet d'interaction n'est significatif que pour un seul de ces tests : la tâche de tapping de la NEPSY. Plusieurs explications peuvent être apportées et limitent fortement l'interprétation de nos résultats. Tout d'abord, une différence initiale entre les groupes est retrouvée sur cette tâche. En effet, le groupe contrôle obtient de meilleures performances sur cette tâche que le groupe expérimental lors du pré-test et il est possible que le groupe contrôle ait moins progressé à cause d'un effet plafond. Par ailleurs, le test du tapping de la NEPSY est assez proche d'une des activités du jeu (« Twister »), qui repose également sur une dissociation des doigts. Les autres tâches de motricité fine utilisées en pré-test et post-test sont quant à elles assez éloignées des activités du jeu. L'absence d'améliorations significatives retrouvée sur ces tâches pourrait donc être la conséquence d'une absence de transfert sur des activités motrices trop éloignées de celles entraînées par le jeu. Ce résultat est congruent avec les résultats antérieurs qui montrent que les bénéfices des interventions se transfèrent rarement à des activités non entraînées par

l'intervention (Sala & Gobet, 2017). Une exploration des liens entre les données issues du jeu (e.g. taux de réussite ou courbe de progression pour chaque activité) et des résultats obtenus lors des tests étalonnés pourrait permettre de confirmer l'hypothèse que la tâche de la NEPSY est plus proche des activités entraînées en jeu.

Notons que le peu de résultats significatifs retrouvés dans la présente étude peut être mis en lien avec certaines limites du protocole. Tout d'abord, la durée de l'intervention est plus courte et moins intensive[25] que celles proposées dans d'autres études interventionnelles (e.g. McGlashan et al., 2017; Vernadakis et al., 2015). Or, la durée de l'intervention peut moduler son efficacité : par exemple, un bénéfice de la pratique d'exergames sur la motricité a été retrouvé suite à une intervention de 480 minutes (Vernadakis et al., 2015) mais pas suite à une intervention plus courte de 278 minutes (Barnett et al., 2015). Les bénéfices d'entraînements plus intensifs doivent être étudiés – notamment pour les élèves présentant des difficultés spécifiques, comme des troubles moteurs. Au-delà de la durée de l'entraînement, plusieurs facteurs n'ont pas été contrôlés dans cette étude comme la pratique de jeux vidéo à la maison, la familiarité avec l'usage d'une tablette ou encore la pratique de certaines activités extra-scolaires qui pourraient influencer le développement des habiletés motrices (e.g. pratique d'un instrument de musique, activités sportives). Ces facteurs pourraient venir brouiller les résultats et doivent être contrôlés dans de futures recherches.

Bien que notre étude rapporte un bénéfice du jeu sur les habiletés motrices, les limites obligent à considérer les résultats avec prudence. D'autres études doivent être menées pour confirmer les avantages et identifier les limites de l'utilisation de jeux vidéo sur tablette visant à entraîner la motricité chez les enfants de cette tranche d'âge.

4.2. BENEFICES D'UN JEU VIDEO ENTRAINANT LA MOTRICITE SUR L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT D'ELEVES SANS TROUBLES DES APPRENTISSAGES DU LANGAGE ECRIT

Le second objectif de l'étude était de démontrer l'influence des habiletés motrices sur l'apprentissage du langage écrit. Les résultats apportent des éléments en faveur de cette hypothèse : l'amélioration des compétences orthographiques est plus importante suite à l'entraînement moteur comparativement à l'activité contrôle. Notre étude confirme donc pour la première fois le lien causal entre les habiletés motrices et le langage écrit au travers d'une étude interventionnelle. Bien que les analyses exploratoires ne révèlent pas de corrélations significatives entre les bénéfices du jeu sur l'orthographe et sur la dextérité manuelle (i.e. tâche

[25] Pour rappel, nous avons proposé dans cette étude une intervention de 240 minutes réparties en deux sessions de 20 minutes par semaine pendant 6 semaines. La phase d'entraînement a été entrecoupée par une pause de 15 jours du fait de contraintes liées au calendrier scolaire.

de la NEPSY), elles montrent que l'amélioration en orthographe est négativement corrélée au niveau de motricité – mesuré par les tâches de copie de figures et de déplacement de chevilles. Les corrélations révèlent que les élèves qui améliorent le plus leur orthographe suite à la pratique du jeu de motricité sont ceux avec les plus faibles habiletés motrices. Ce résultat laisse supposer que les difficultés motrices ont une influence délétère sur l'apprentissage de l'orthographe et qu'un entraînement sollicitant spécifiquement la motricité fine peut permettre d'y remédier. D'autres études doivent être menées pour confirmer cette hypothèse – par exemple, en étudiant spécifiquement les bénéfices d'interventions motrices sur l'apprentissage du langage écrit des élèves avec de faibles compétences motrices.

Par ailleurs, nos hypothèses ne sont pas totalement confirmées dans cette étude qui ne révèle pas d'effet significatif de l'entraînement moteur sur l'ensemble des dimensions du langage écrit évaluées. Pourtant, des études menées chez les élèves de maternelle avaient rapporté des liens entre les habiletés motrices et l'orthographe (Doyen et al., 2017) mais également avec le décodage (Doyen et al., 2017; Suggate et al., 2016) et des compétences de plus haut niveau comme la compréhension (Cameron et al., 2012). Nous avions également confirmé la relation entre les habiletés motrices et différentes dimensions du langage écrit chez des élèves de CE2 et de CM1 dans de précédentes études (voir études 1.1 et 1.2., p.73 et p.91). Ici, les bénéfices de l'entraînement moteur n'ont été retrouvés que pour l'épreuve de dictée de mots de la BALE : aucune différence significative entre les groupes n'est retrouvée pour d'autres mesures du langage écrit. Plusieurs explications peuvent être suggérées. Tout d'abord, le groupe contrôle présente de meilleurs résultats sur l'épreuve de dictée de la BALE que le groupe expérimental. Comme indiqué dans le paragraphe précédent, il est possible que les enfants du groupe contrôle s'améliorent moins à cause d'un effet plafond et que l'effet d'interaction retrouvé ne soit pas dû aux bénéfices de l'entraînement moteur. Une seconde explication concerne les différences entre la tâche d'orthographe de la BALE et les autres tâches de langage écrit utilisées dans l'étude. Par exemple, aucun effet d'interaction n'est retrouvé sur la dictée de texte de la L2MA qui évalue également l'orthographe. Comparativement à l'épreuve de la BALE, celle-ci se caractérise par une augmentation des contraintes : la durée de l'exercice et la taille du texte à produire sont augmentées. Or, les difficultés expérimentées par les enfants ayant un faible niveau de motricité sont majorées en présence de ce type de contraintes (Huau et al., 2015) et il est possible que l'entraînement proposé dans le cadre de cette étude soit insuffisant pour y remédier. Enfin, les autres tâches de langage écrit utilisées dans l'étude évaluent non pas l'écriture mais la lecture (identification de mots et compréhension écrite). Il est possible que l'effet de l'entraînement sur la lecture ne se retrouve qu'à plus long terme : le développement des habiletés motrices permettant la consolidation des représentations orthographiques, il entraînerait indirectement une amélioration de l'identification de mots.

Nos résultats suggèrent donc un bénéfice de l'entraînement sur l'orthographe de mots mais pas sur l'ensemble des mesures du langage écrit évaluées. L'étude des effets à long terme de la pratique motrice sur le langage écrit pourrait permettre d'une part de confirmer le maintien de ces bénéfices sur l'orthographe de mots, et d'autre part d'investiguer une éventuelle généralisation de ces bénéfices sur d'autres dimensions du langage écrit à plus long terme. En outre, il est nécessaire de mieux comprendre les mécanismes qui sous-tendent l'amélioration en orthographe. Deux hypothèses de médiation avaient été formulées dans la thèse et testée dans la présente étude : celle d'une médiation par l'écriture manuscrite et celle d'une médiation par les fonctions exécutives.

4.3. BENEFICES D'UN JEU VIDEO ENTRAINANT LA MOTRICITE SUR LES DEUX MEDIATEURS POTENTIELS (ECRITURE MANUSCRITE ET FONCTIONS EXECUTIVES)

L'ambition de la thèse était de chercher à mieux comprendre les mécanismes explicatifs de la relation entre habiletés motrices et langage écrit. De précédents travaux ont montré que le lien entre la motricité et l'apprentissage du langage écrit était expliqué par deux facteurs : l'écriture manuscrite et les fonctions exécutives (voir Etude 1.1. p.73). Dans cette étude, nous avons cherché à démontrer les liens causaux entre la motricité et ces deux médiateurs potentiels. Toutefois, bien que la présente étude ait révélé un bénéfice de l'entraînement moteur sur l'orthographe de mots, aucun effet significatif de l'intervention n'a été retrouvé sur les deux médiateurs potentiels. Elle ne permet donc pas de confirmer les résultats des précédentes études qui ont montré que la relation entre les habiletés motrices et l'orthographe était médiatisée par ces deux facteurs (voir Etude 1.1. p.73).

En premier lieu, notre étude ne montre pas d'amélioration significative de l'écriture manuscrite suite à l'entraînement moteur comparativement à l'entraînement contrôle. Bien que les bénéfices d'interventions motrices sur le développement de l'écriture manuscrite aient été déjà rapportés chez des élèves de CP (Poon et al., 2010), plusieurs méta-analyses ont montré que les interventions n'impliquant pas de pratique de l'écriture semblent peu efficaces pour améliorer l'écriture manuscrite (Hoy et al., 2011; Santangelo & Graham, 2016). Toutefois très peu d'études se sont intéressées à cette question et elles utilisaient des méthodologies hétérogènes, ce qui limitent l'interprétation. Par ailleurs, le peu de résultats retrouvés dans la présente étude pourraient provenir de la population étudiée. Tout d'abord, l'âge des participants pourrait influer sur les bénéfices potentiels d'intervention motrices sur l'écriture manuscrite qui pourraient n'être efficaces qu'en début d'apprentissage mais pas en CM1, alors que l'écriture commence à s'automatiser (Palmis et al., 2017). Il est également possible que seuls les élèves présentant des difficultés spécifiques (e.g. difficultés motrices) bénéficient de ce type d'entraînement. Par ailleurs, la mesure utilisée pour évaluer l'écriture manuscrite (i.e. la tâche de l'alphabet) n'est

peut-être pas suffisamment sensible pour déceler de légères modifications dans les processus d'écriture. Les enregistrements de la cinétique de l'écriture à l'aide de tablettes graphiques ont pour l'instant été assez peu utilisés pour évaluer les bénéfices d'interventions sur l'écriture manuscrite (Hoy et al., 2011). Il pourrait être intéressant de les intégrer dans les études ultérieures.

En second lieu, aucun effet d'interaction significatif n'a été retrouvé pour les fonctions exécutives. Cette absence de résultats significatifs fait écho à un ensemble de travaux qui critiquent les bénéfices de différentes interventions (entraînement cérébral, musique, jeu d'échecs ou jeux vidéo) sur la cognition et qui soulignent que l'effet de transfert de ce type d'interventions sur les fonctions exécutives est souvent négligeable – notamment en présence d'un groupe contrôle actif (e.g. Sala & Gobet, 2017a). Néanmoins, d'autres explications peuvent être proposées. Premièrement, il est important de souligner que nous n'avons mesuré que deux fonctions exécutives (i.e. la flexibilité mentale et l'inhibition) mais pas la mémoire de travail et la planification. En effet, du fait des contraintes temporelles, nous n'avons pas pu évaluer toutes les fonctions exécutives. Les précédentes études ayant montré que la flexibilité mentale et l'inhibition étaient plus en lien avec les habiletés motrices, ces compétences ont été sélectionnées pour cette étude (voir Annexe 2, p.252). Il est toutefois possible que l'entraînement moteur influence des fonctions exécutives qui n'ont pas été mesurées ici et qui pourraient être en lien avec l'amélioration de l'orthographe. Deuxièmement, nous avons ici choisi de proposer au groupe contrôle des jeux de mathématiques sollicitant peu la motricité et le langage écrit. Cependant, les fonctions exécutives et l'apprentissage des mathématiques sont étroitement liées (Clements et al., 2016; Cragg et al., 2017; Roell et al., 2017) et certains auteurs proposent qu'ils existent entre les deux une relation bidirectionnelle (Clements et al., 2016). Il est donc possible que dans notre étude, la pratique du jeu contrôle (i.e. mathématiques) comme la pratique du jeu expérimental (i.e. motricité) améliorent les fonctions exécutives, ce qui impacterait en retour le niveau de langage écrit. L'inclusion d'un autre groupe (e.g. groupe contrôle jouant à un autre type de jeu, groupe contrôle passif, etc.) aurait permis de déterminer si cette absence de résultat peut être en partie expliquée par le choix du groupe contrôle.

En conclusion, d'autres travaux sont nécessaires pour mieux comprendre de quelle façon l'entraînement moteur améliore les compétences orthographiques et pour confirmer les hypothèses de médiation testées dans les précédentes études.

4.4. IMPLICATIONS POUR LES ELEVES AVEC UN TROUBLE DE L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT

Malgré les bénéfices de la pratique du jeu retrouvés chez les élèves sans difficulté, aucune amélioration significative n'a été retrouvée chez les élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit suite à l'entraînement moteur. Contrairement à l'hypothèse que nous avons formulée, l'efficacité d'un jeu de motricité pour soutenir les apprentissages dans cette population n'a pas été démontrée significativement– y compris chez les enfants présentant des difficultés motrices associées. En effet, malgré la forte proportion d'élèves présentant une altération de la motricité fine dans cette population[26], aucun effet de l'entraînement n'a été retrouvé sur les différentes mesures. L'évaluation de l'efficacité d'interventions non-langagières doit donc être poursuivie chez les enfants avec un trouble de l'apprentissage du langage écrit – notamment quand il est associé à une comorbidité. D'autres pistes de remédiations qui pourraient améliorer à la fois les habiletés motrices et le langage écrit doivent être envisagées.

Une première piste pourrait être une intervention ciblant les fonctions exécutives et les compétences attentionnelles. En effet, plusieurs études suggèrent que l'association de plusieurs troubles neuro-développementaux majore les difficultés attentionnelles (Puyjarinet et al., 2017) et augmente le risque de présenter d'autres troubles associés (Kaplan et al., 2001). Bien que nous ayons émis l'hypothèse que la motricité influence le développement des fonctions exécutives, il est également possible qu'à l'inverse, un trouble de l'attention et des fonctions exécutives détériore les performances motrices. Par exemple, Kaiser et al. (2015) ont proposé que les difficultés attentionnelles et le déficit d'inhibition dans le TDAH impactent négativement le contrôle moteur. Il est donc possible que, d'une part la présence de difficultés attentionnelles ou exécutives chez les enfants présentant un trouble des apprentissages limite les bénéfices de l'entraînement sur la motricité dans notre étude, et que d'autre part, une intervention permettant d'améliorer les fonctions exécutives et le contrôle attentionnel se montre bénéfique pour remédier aux difficultés motrices et langagières.

Une autre piste de remédiation à envisager est celle d'un entraînement des habiletés rythmiques. En effet, les précédentes études suggèrent une influence du traitement rythmique sur le langage écrit et sur les habiletés motrices. Un déficit des habiletés rythmiques chez les élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit (voir Etude 4) et plus largement dans les troubles neuro-développementaux (Goswami, 2011; Ladányi et al., 2020; Trainor et al., 2018) a également été rapporté. Les interventions ciblant le rythme semblent également améliorer le langage écrit chez les élèves présentant une dyslexie (Bhide et al., 2013; Thomson et al., 2013) et

[26] Dans cette étude, le trouble de l'apprentissage du langage écrit est associé à des difficultés motrices chez près d'un enfant sur deux : 61% des élèves du groupe contrôle et 47% des élèves du groupe expérimental présentent des résultats déficitaires sur les épreuves motrices du M-ABC.

les habiletés motrices chez les patients présentant des troubles moteurs (Dalla Bella, Benoit, et al., 2017).

D'autres études sont donc nécessaires afin de confirmer les bénéfices de ce type d'interventions sur la motricité et le langage écrit chez les élèves avec ou sans troubles des apprentissages, et plus spécifiquement chez les enfants présentant des troubles associés.

5. CONCLUSION

Dans cette étude nous avons cherché à évaluer les bénéfices d'un jeu vidéo sur tablette entraînant les habiletés motrices. Les résultats suggèrent que ce type d'entraînement permet d'améliorer à la fois les habiletés motrices mais également l'apprentissage de l'orthographe chez des élèves de CM1 sans trouble de l'apprentissage du langage écrit. L'entraînement semble d'autant plus bénéfique chez les enfants présentant de faibles compétences motrices et nos résultats offrent des perspectives de prise en charge intéressantes pour les élèves présentant ce profil. Néanmoins, la différence entre les groupes retrouvée en pré-test limite fortement l'interprétation des résultats qui doivent être confirmés dans d'autres études.

Par ailleurs, aucun bénéfice du jeu n'a été retrouvé chez les enfants présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit. D'autres études doivent être menées auprès de cette population, et plus spécifiquement auprès des élèves présentant à la fois des troubles de la motricité et du langage écrit, afin d'évaluer l'efficacité d'autres interventions non-langagières – comme celles ciblant les habiletés rythmiques.

DISCUSSION

Ce travail de thèse s'inscrit dans un projet visant à créer un jeu vidéo éducatif pour entraîner différentes habiletés non-langagières : les habiletés motrices, les habiletés rythmiques et la planification visuo-spatiale. Bien qu'initialement pensé pour venir en aide aux enfants présentant un trouble de la motricité et/ou un trouble du langage écrit, l'outil a été développé pour soutenir le développement de ces habiletés chez tous les élèves – y compris ceux qui ne présentent pas de difficultés.

Dans ce contexte, l'objectif de la thèse était d'étudier les relations entre deux habiletés non-langagières – la motricité fine et le rythme – et l'apprentissage du langage écrit chez les élèves avec ou sans troubles des apprentissages, et de tester l'efficacité de l'outil créé dans le cadre du projet. Différentes méthodologies ont été utilisées afin de répondre à ces deux objectifs. Dans un premier temps, des études corrélationnelles ont été réalisées afin d'identifier quelles habiletés motrices et rythmiques sont en lien avec l'apprentissage du langage écrit (voir Etude 1.2., p. 91 et 2.2. p.127) et de tester des hypothèses de médiation pour comprendre ces liens dans le développement typique (voir Etude 1.1. p.73 et 2.1. p.112). Les relations entre les deux prédicteurs non langagiers, la motricité fine et les habiletés rythmiques, ont également été évaluées. Dans un deuxième temps, une étude de comparaison de groupes a été réalisée afin d'examiner l'influence de ces deux facteurs chez les élèves faibles lecteurs avec ou sans difficultés motrices et/ou rythmiques associées (voir Etude 4 p. 147). Enfin, dans une dernière partie, nous avons testé l'efficacité du jeu vidéo conçu pour soutenir l'apprentissage du langage écrit (voir Etude 5 p.167). Cette dernière étude s'inscrit à la fois dans la continuité des précédentes études afin de confirmer les liens causaux proposés par les modèles théoriques, et dans une perspective plus appliquée – la validation de l'efficacité d'un nouvel outil numérique.

Après avoir présenté les principaux résultats de ce travail de recherche, la discussion s'organisera autour de trois axes. Le premier axe se focalisera sur les différentes hypothèses de médiations avancées pour expliquer les relations entre les habiletés motrices/rythmiques et l'apprentissage du langage écrit dans le développement typique. Le second traitera des spécificités des élèves avec un trouble de l'apprentissage du langage écrit. Enfin, le dernier axe s'orientera sur des aspects plus appliqués de la thèse. Plus spécifiquement nous traiterons de l'intérêt d'intégrer différents acteurs dans le développement de nouveaux jeux à visée éducative afin de proposer des outils conçus sur des bases théoriques solides et validés scientifiquement.

1. SYNTHESE DES RESULTATS

Alors que l'influence des habiletés langagières sur l'apprentissage du langage écrit fait consensus, de plus en plus de travaux suggèrent que des habiletés non-langagières, comme les habiletés motrices et les habiletés rythmiques, jouent également un rôle dans cet apprentissage (Cameron et al., 2012; Ozernov-Palchik et al., 2018). En effet, les élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit ont fréquemment des difficultés motrices et rythmiques associées (Goswami, 2011; Jover et al., 2013). Ces habiletés sont également un prédicteur précoce de l'émergence du langage écrit chez les élèves les plus jeunes (i.e. avant l'entrée à l'école et en maternelle) (Cameron et al., 2012; David et al., 2007). Néanmoins, les études s'étant intéressées aux relations entre ces deux habiletés non-langagières et l'apprentissage du langage écrit ont majoritairement été menées avant l'entrée en CP, et il est nécessaire de démontrer l'existence de ces liens chez les élèves plus âgés. En conséquence, dans le cadre de ce travail de thèse, nous avons choisi d'étudier spécifiquement cette relation chez des élèves du CE2 au CM2. Le choix de cette tranche d'âge se démarque des études antérieures et présente plusieurs avantages. Tout d'abord, il permet de généraliser les résultats retrouvés chez des élèves de maternelle à une population plus âgée. De plus, nous avons pu dissocier l'étude du développement typique de l'étude des troubles de l'apprentissage du langage écrit, en identifiant les élèves présentant ce type de profil qui ne bénéficient pas encore de diagnostic dans les populations plus jeunes. Enfin, étudier des élèves du CE2 au CM2 permet d'évaluer plus finement les compétences de langage écrit de haut niveau – comme la compréhension écrite et la rédaction.

Par ailleurs, l'étude des relations entre ces deux habiletés non-langagières et l'apprentissage du langage écrit soulève plusieurs questions, au-delà de celle de la tranche d'âge étudiée. Tout d'abord, il est important de souligner que les habiletés motrices et rythmiques sont des termes génériques qui englobent des habiletés parfois distinctes (e.g. dextérité manuelle et compétences graphomotrices ; perception et production de rythme). Or, plusieurs études n'utilisent qu'une seule mesure de ces habiletés et extrapolent les résultats. Par exemple, plusieurs études utilisent une tâche de copie de figure (e.g. Cameron et al., 2012; Grissmer et al., 2010) pour évaluer les habiletés motrices alors que cette tâche ne peut rendre compte de la motricité en général (Suggate et al., 2016). De façon similaire, les mesures du langage écrit rapportées dans les études sont souvent peu spécifiques (e.g. notes obtenues en anglais) et ne permettent pas d'identifier précisément quelles sont les dimensions du langage écrit en lien avec les habiletés motrices et rythmiques (e.g. Grissmer et al., 2010; Son & Meisels, 2006). Ces deux constats pointent la nécessité de dissocier les différentes habiletés motrices, rythmiques et compétences de langage écrit lors de l'étude des relations entre ces différentes habiletés. Afin de répondre à ce premier objectif, différentes dimensions du langage écrit ont été dissociées dans

chacune des études de la thèse afin de mieux comprendre les relations entre les deux prédicteurs et l'apprentissage du langage écrit. Plus spécifiquement, deux études ont été menées pour évaluer l'effet distinct de différentes habiletés motrices et rythmiques sur l'apprentissage du langage écrit (voir Etude 1.2., p. 91 et 2.2. p.127). Par ailleurs, différents mécanismes ont été avancés pour expliquer les relations entre les deux habiletés non-langagières et l'apprentissage du langage écrit. L'étude de ces mécanismes explicatifs constitue le deuxième objectif de ce travail de thèse. L'utilisation d'une méthode de modélisation structurale dans trois des études a permis de tester et confronter différentes hypothèses de médiations proposées dans la littérature (voir Etude 1.1. p.73, 2.1. p.112 et 3 p.138). Le troisième objectif est d'étudier plus précisément ces deux habiletés non-langagières dans les troubles de l'apprentissage du langage écrit afin de déterminer quelles pouvaient être les conséquences de difficultés motrices et rythmiques associées sur l'apprentissage de la lecture et de l'écriture. Pour finir, le dernier objectif de la thèse est d'évaluer les bénéfices d'une intervention ciblant les habiletés motrices et rythmiques afin de proposer de nouvelles pratiques pédagogiques et pistes de remédiation, dans le but de venir en aide aux élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit. Les éléments apportés par ce travail de thèse pour répondre à ces quatre objectifs seront déclinés dans la suite de cette section.

OBJECTIF 1 : ETUDE DES LIENS ENTRE DIFFERENTES HABILETES MOTRICES ET RYTHMIQUES ET DIMENSIONS DU LANGAGE ECRIT CHEZ DES ELEVES AU DEVELOPPEMENT TYPIQUE DU CE2 AU CM2.

En premier lieu les résultats de la thèse confirment la relation entre les habiletés motrices et rythmiques et l'apprentissage du langage écrit dans la tranche d'âge ciblée (du CE2 au CM2). Plus spécifiquement, les différentes études réalisées permettent de confirmer l'existence de relations significatives entre les habiletés motrices et rythmiques et l'ensemble des dimensions du langage écrit évaluées – l'identification et l'orthographe de mots, la compréhension écrite et la rédaction dans le développement typique (voir Etude 1.1. p.73, 1.2., p. 91, 2.1. p.112 et 2.2. p.127).

Par ailleurs, deux études corrélationnelles menées chez des élèves de CM1 suggèrent que les différentes habiletés motrices et rythmiques ne sont pas toutes reliées de la même façon à l'apprentissage du langage écrit (voir Etude 1.2., p. 91 et 2.2. p.127). Par exemple, seules les compétences graphomotrices – mais pas la dextérité manuelle – prédisent significativement l'identification de mots et les compétences orthographiques en CM2 (voir Etude 1.2., p. 91). De la même façon, l'étude de l'implication des différentes habiletés rythmiques montre que seule la production de rythmes réguliers – mais pas la perception – est reliée significativement à l'identification de mots (voir Etude 2.2. p.127). Si l'absence de relations significatives entre certains prédicteurs et l'apprentissage du langage écrit peut être attribuée à la faible puissance statistique des études, ces résultats soulignent néanmoins la nécessité de ne pas considérer les habiletés motrices et/ou rythmiques de façon unitaire. En effet, nos résultats confortent

l'existence de différentes habiletés au sein des termes « habiletés motrices » et « habiletés rythmiques » et celles-ci semblent exercer une influence différente sur l'apprentissage du langage écrit. Une meilleure compréhension des mécanismes qui sous-tendent les relations entre les habiletés motrices/rythmiques et le langage écrit nécessite donc avant tout une meilleure identification des habiletés reliées à cet apprentissage.

OBJECTIF 2 : ETUDE DES MECANISMES SOUS-TENDANT LES LIENS ENTRE HABILETES MOTRICES ET RYTHMIQUES ET LE LANGAGE ECRIT

Le deuxième objectif était de chercher à identifier les mécanismes explicatifs des relations entre les habiletés motrices et rythmiques et l'apprentissage du langage écrit. Plusieurs hypothèses de médiation ont été formulées. Tout d'abord, le lien entre les habiletés motrices et l'apprentissage du langage écrit pourrait être sous-tendu par l'automatisation de l'écriture manuscrite (Berninger et al., 1992; Bosse et al., 2014; Suggate et al., 2016) et/ou par les fonctions exécutives (Cameron et al., 2012; Oberer et al., 2018; Schmidt et al., 2017). La relation entre les habiletés rythmiques et l'apprentissage du langage écrit a quant à elle été expliquée par une médiation par les habiletés phonologiques (Ozernov-Palchik et al., 2018; Tierney & Kraus, 2014) et une médiation par les fonctions exécutives (Slevc et al., 2016; Tierney & Kraus, 2013). Dans ce travail de thèse, ces différentes hypothèses ont été testées et confrontées dans deux études à l'aide de modèles d'équations structurales (voir Etude 1.1. p.73, 2.1. p. 91 et 3, p.138).

- **Etude des mécanismes qui sous-tendent les relations entre les habiletés motrices et l'apprentissage du langage écrit**

L'examen des modèles permet tout d'abord de montrer que deux mécanismes jouent un rôle dans le lien entre habiletés motrices et apprentissage de l'écrit et que ces mécanismes varient en fonction de la dimension du langage écrit (voir Etude 1.1., p.73). Tout d'abord, les résultats de la thèse indiquent qu'une médiation via l'écriture manuscrite sous-tend la relation entre les habiletés motrices et les compétences de langage écrit de bas niveau : lecture et orthographe. Ces résultats sont en accord avec des résultats antérieurs qui ont montré que les habiletés motrices prédisent l'automatisation de l'écriture (Volman et al., 2006; Weintraub & Graham, 2000) et que l'apprentissage de la lecture et de l'orthographe de mots est lui-même lié à l'écriture manuscrite (Bosse et al., 2014; Suggate et al., 2018). Cependant, la médiation via l'écriture manuscrite n'explique pas à elle seule la relation entre les habiletés motrices et les compétences de langage écrit de bas niveau : les fonctions exécutives sont également un médiateur de cette relation. Ceci fait écho aux études qui indiquent que les fonctions exécutives langagières (e.g. mémoire de travail phonologique) et non langagières (e.g. inhibition et flexibilité) prédisent le niveau de lecture et d'orthographe de mots (Altemeier et al., 2008; Peng et al., 2018). Concernant les compétences de

haut niveau, l'effet des habiletés motrices sur la compréhension écrite est sous-tendu par les fonctions exécutives, mais pas par l'écriture manuscrite. Ceci est cohérent avec la littérature puisque des relations entre l'inhibition, la flexibilité, la mémoire de travail et la compréhension écrite ont déjà été rapportées (Butterfuss & Kendeou, 2018; Christopher et al., 2012; Potocki et al., 2015). En revanche, à notre connaissance, aucun modèle théorique ni aucune étude n'a proposé de lien entre l'automatisation du geste d'écriture et la compréhension écrite. A l'inverse, l'effet de la motricité sur la rédaction est sous-tendu par l'écriture manuscrite mais pas par les fonctions exécutives – qui ne sont pas significativement reliées à la mesure de la qualité de la rédaction. Ce résultat n'est pas concordant avec des résultats antérieurs qui ont montré un effet des fonctions exécutives sur la rédaction (Cordeiro et al., 2020; Drijbooms et al., 2015, 2017). Notons toutefois qu'un effet des fonctions exécutives sur la rédaction est retrouvé dans l'étude 2.1. utilisant les mêmes données mais qui n'intègre pas de mesure de l'écriture manuscrite dans le modèle (voir p. 91) ; il est donc possible que l'effet des fonctions exécutives soit réduit à cause de l'inclusion de cet autre facteur dans le modèle. Plus généralement, l'ensemble de ces résultats souligne la nécessité d'intégrer les deux médiateurs pour expliquer les liens entre les habiletés motrices et l'apprentissage du langage écrit. Les mécanismes distincts seront plus largement discutés dans une section suivante (voir p.200).

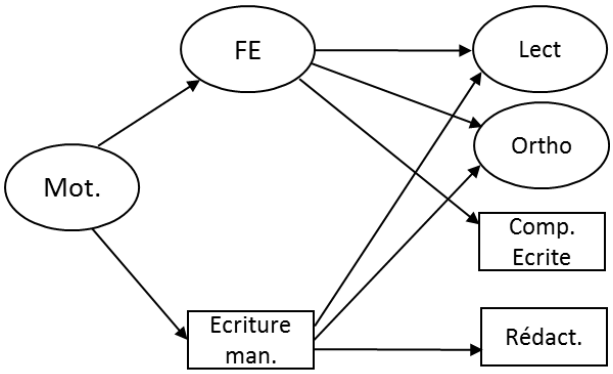

Figure 21 : Modèle de médiation final de l'étude 1.1. Le modèle présente les relations entre les habiletés motrices et différentes dimensions du langage écrit (lecture et orthographe de mots, compréhension écrite et rédaction) au travers de deux médiateurs : les fonctions exécutives et l'écriture manuscrite

- **Etude des mécanismes qui sous-tendent les relations entre les habiletés rythmiques et l'apprentissage du langage écrit**

Les résultats de l'étude 2.1. (voir p. 112) révèlent que l'effet des habiletés rythmiques sur les quatre dimensions du langage écrit évaluées est expliqué par les fonctions exécutives (voir Figure 22 ci-dessous). Cependant, contrairement à nos hypothèses et aux résultats antérieurs retrouvés chez les élèves de maternelle (Ozernov-Palchik et al., 2018) ou présentant un trouble

du langage (Bhide et al., 2013), les habiletés rythmiques ne sont pas significativement reliées aux habiletés phonologiques (dénomination rapide et conscience phonologique).

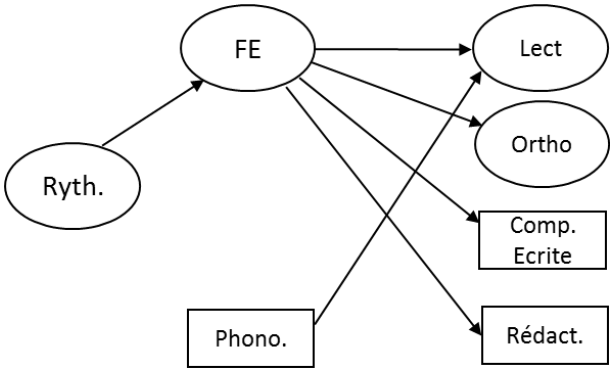

Figure 22: Modèle de médiation final de l'étude 2.1. Le modèle présente les relations entre les habiletés rythmiques et différentes dimensions du langage écrit (lecture et orthographe de mots, compréhension écrite et rédaction) au travers de deux médiateurs : les fonctions exécutives et les habiletés phonologiques

En outre, les résultats de l'étude 3 (voir p.138) suggèrent que la relation entre les habiletés rythmiques et les fonctions exécutives est sous-tendue par la motricité (voir Figure 23 ci-dessous). Il semble donc que dans le développement typique, le lien entre la synchronisation sensori-motrice et l'apprentissage du langage écrit dépende de la composante motrice de cette habileté – qui est elle-même en lien avec le développement des fonctions exécutives impliquées dans l'apprentissage du langage écrit.

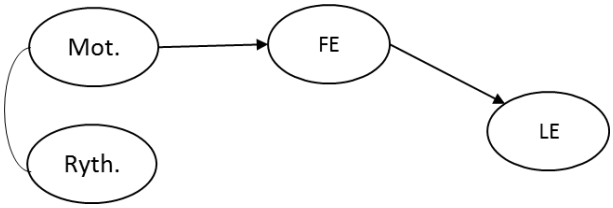

Figure 23 : Modèle de médiation final de l'étude 3. Le modèle présente les relations entre les habiletés motrices et rythmiques et le langage écrit (lecture et orthographe de mots, compréhension écrite et rédaction) au travers d'un médiateur : les fonctions exécutives.

- **Limite des études de modélisation par équations structurales**

Malgré l'apport de ces analyses permettant de modéliser les hypothèses de médiation, l'une des principales limites de ces études réside dans le fait que cette méthode ne permet pas de confirmer directement les liens de causalité. En effet, si le sens d'une relation entre deux variables latentes peut être inféré par un modèle théorique, les modèles d'équations structurales ne permettent pas de confirmer les relations causales entre deux variables car ils se basent sur les corrélations (Gana & Broc, 2018). Une des méthodes permettant de tester l'existence de ces liens de cause à effet est de manipuler expérimentalement l'influence de l'habileté ciblée sur

l'apprentissage du langage écrit – comme par exemple, en évaluant l'effet d'un entraînement à cette habileté sur l'apprentissage de la lecture et de l'écriture. C'est ce que nous avons fait dans l'étude 5 (voir p.167) en évaluant les bénéfices d'une intervention motrice sur l'apprentissage du langage écrit et sur les deux médiateurs potentiels – l'écriture manuscrite et les fonctions exécutives. Les résultats de l'étude ne permettent cependant pas de confirmer clairement les hypothèses formulées sur la base des modèles d'équations structurales. En effet, un bénéfice significatif de la pratique de l'activité motrice n'a été retrouvé que pour une mesure des compétences orthographiques mais pas pour les autres mesures du langage écrit. De plus, aucun effet significatif de l'entraînement moteur n'a été retrouvé sur les deux médiateurs potentiels. L'existence de lien de causalité entre les habiletés motrices sur l'apprentissage du langage écrit au travers de ces deux médiateurs doit donc encore être démontré.

OBJECTIF 3 : ETUDE DE L'INFLUENCE DE DIFFICULTES MOTRICES ET/OU RYTHMIQUES CHEZ DES ELEVES PRESENTANT DES TROUBLES DE L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT

Le troisième objectif de la thèse était d'étudier l'implication des deux prédicteurs non langagiers précités (motricité fine et habiletés rythmiques) chez les élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit. Cette question a été traitée dans l'étude 4. Dans cette étude, nous avons cherché à comparer les habiletés motrices et rythmiques chez les élèves avec et sans troubles d'apprentissages du langage écrit, et à identifier les spécificités des élèves présentant des difficultés motrices et/ou rythmiques associées à un trouble de l'apprentissage du langage écrit par rapport à des élèves sans difficultés associées (voir p.147).

Soulignons tout d'abord que dans ces deux études, les élèves présentant un trouble des apprentissages ont été identifiés au sein de la cohorte d'élèves tout-venants en se basant exclusivement sur leur niveau de lecture et d'orthographe. Cependant, cette méthode ne permet pas de diagnostiquer précisément la présence d'un trouble dyslexique, ni d'éventuels troubles associés car elle ne permet pas d'exclure l'existence de troubles sensoriels, neurologiques et/ou psychiatriques qui peuvent être à l'origine de ces difficultés (American Psychiatric Association, 2013). L'étude 4 confirme toutefois des résultats antérieurs qui avaient été retrouvés chez des élèves présentant une dyslexie (voir p.151) (Jover et al., 2013; Ramus, 2003; Thomson & Goswami, 2008). Les résultats montrent tout d'abord que le niveau de motricité ne diffère pas significativement entre les élèves avec ou sans troubles d'apprentissage du langage écrit, ce qui fait écho aux résultats hétérogènes rapportés dans la littérature. Ces derniers s'expliquent par la diversité des profils des élèves dyslexiques, certains présentant des difficultés motrices associées tandis que d'autres ont des habiletés motrices préservées (Jover et al., 2013; Ramus, 2003). En accord avec cette suggestion, la répartition des élèves en deux sous-groupes basés sur le niveau de motricité révèle que près de 40% d'entre eux obtiennent des scores en motricité supérieurs à

la moyenne des élèves du groupe contrôle. A l'inverse, les élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit obtiennent des performances significativement inférieures au groupe contrôle sur la tâche de synchronisation évaluant les habiletés rythmiques. Ceci conforte les résultats antérieurs qui rapportent un déficit du traitement rythmique dans la dyslexie (Goswami, 2011; Thomson et al., 2006; Wolff, 2002).

Par ailleurs, l'étude de sous-groupes d'élèves avec un trouble du langage écrit suggère que les participants présentant de faibles habiletés motrices et/ou rythmiques ont plus de difficultés à orthographier les mots par rapport à ceux présentant des habiletés motrices et/rythmiques préservées. Cependant, l'étude des médiateurs potentiels dans les deux sous-groupes ne permet pas d'identifier les mécanismes qui pourraient expliquer cette majoration du trouble du langage écrit, induite par la présence de difficultés motrices ou rythmiques associées. En effet, aucune différence significative n'est retrouvée entre les sous-groupes pour les mesures des fonctions exécutives[27], de l'écriture manuscrite et des habiletés phonologiques. D'autres études sont nécessaires pour mieux comprendre les relations entre les difficultés rythmiques et motrices et l'apprentissage du langage écrit, et cette question sera plus amplement développée dans une section suivante (voir p.206).

OBJECTIF 4 : EVALUATION DE L'EFFICACITE D'UN JEU VIDEO CIBLANT LES HABILETES NON-LANGAGIERES POUR AMELIORER L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT.

Le dernier objectif de la thèse était d'évaluer les bénéfices d'une intervention ciblant les deux habiletés motrices et rythmiques sur l'apprentissage du langage écrit chez des élèves avec ou sans troubles. Néanmoins, nous n'avons pu tester qu'un type d'entraînement dans le cadre de la thèse du fait de contraintes temporelles (temps nécessaire à la programmation des activités du jeu, durée des études interventionnelles). Étant donné que le projet initial s'intéressait en priorité à la motricité fine, c'est l'intervention motrice qui a été privilégiée. En conséquence, l'impact de l'entraînement aux habiletés rythmiques sur l'apprentissage du langage écrit n'a pas pu être évalué dans le cadre ce travail.

Dans l'étude 5, les effets de la pratique d'un jeu ciblant les habiletés motrices sur le langage écrit ont été évalués. Pour cela, deux interventions basées sur la pratique d'un jeu vidéo (motricité vs mathématiques) ont été proposées à des élèves de CM1 sur une durée de 6 semaines à raison de deux séances de 20 minutes par semaine. Les habiletés motrices, les fonctions exécutives, l'automatisation de l'écriture manuscrite et le niveau de langage écrit des deux groupes d'élèves

[27] On retrouve toutefois une différence significative pour une mesure de la flexibilité mentale – mais la différence entre les groupes semble majorée par les performance d'un individu qui obtient un score très inférieur aux autres (voir Annexe 4, p.263).

ont été évalués avant et après l'entraînement. Chez les élèves au développement typique, une amélioration significative suite à la pratique du jeu de motricité a été retrouvée sur deux des variables: la dextérité manuelle (réalisation de séquences motrices) et l'orthographe de mots. Aucun effet significatif sur les deux médiateurs n'est rapporté. Plus généralement, les bénéfices de l'intervention – ne serait-ce que sur la motricité fine – semblent assez limités. Il donc est indispensable d'optimiser les modalités de l'intervention et/ou de cibler les élèves qui pourraient en bénéficier pour réévaluer l'influence d'une intervention motrice sur l'apprentissage du langage écrit. Les limites de cette étude interventionnelle et plus largement de la validation de jeux sérieux seront plus amplement discutées dans la dernière section de la discussion (voir p.212).

Ces travaux avaient pour objectif de mieux comprendre les liens entre deux prédicteurs non-langagiers dans le développement typique et chez les élèves présentant des troubles des apprentissages. Afin de discuter les implications de ce travail, nous aborderons différentes perspectives de recherche autour de trois questions centrales qui ont guidé ce travail de thèse. Dans un premier temps nous examinerons les mécanismes sous-tendant les liens entre les prédicteurs non-langagiers – notamment la motricité fine – et l'apprentissage du langage écrit dans le développement typique. Dans un deuxième temps, nous nous intéresserons aux profils non langagiers des élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit. Enfin, dans un dernier axe, nous nous intéresserons à la validation d'interventions basées sur l'utilisation de jeux sérieux, qui a constitué l'un des enjeux essentiels du projet DysApp.

2. IMPLICATIONS DE LA THESE

2.1. MECANISMES EXPLICATIFS DES LIENS ENTRE LES HABILETES MOTRICES ET RYTHMIQUES

L'un des objectifs de la thèse était de mettre en évidence l'influence de deux habiletés non-langagières (la motricité et les habiletés rythmiques) sur l'apprentissage du langage écrit. Nous avons émis l'hypothèse que ces effets ne seraient pas directs mais sous-tendus par différents médiateurs. Les résultats des études de modélisation par équation structurales confirment que deux médiateurs sous-tendent ces relations : l'écriture manuscrite explique partiellement l'effet de la motricité sur différentes dimensions du langage écrit, et les fonctions exécutives expliquent à la fois l'effet de la motricité et des habiletés rythmiques. Cependant, afin de montrer l'existence d'une influence de la motricité fine et des habiletés rythmiques sur l'apprentissage du langage écrit, il est nécessaire de s'interroger plus précisément sur les liens causaux entre les prédicteurs et les médiateurs, et entre les médiateurs et les différentes dimensions du langage écrit – qui ne peuvent être démontrés par des études corrélationnelles.

L'influence de ces deux médiateurs sur l'apprentissage du langage écrit avait déjà été montrée dans plusieurs études. Par exemple, plusieurs travaux ont montré que l'automatisation de l'écriture manuscrite était un prédicteur de l'identification de mots, des compétences orthographiques et de la qualité de la rédaction (Cordeiro et al., 2020; Pontart et al., 2013; Suggate et al., 2016). L'apprentissage de l'orthographe de nouveaux mots semble facilité dans une condition d'écriture manuscrite (Bosse et al., 2014; Ouellette, 2010; Suggate et al., 2018). Enfin, les interventions facilitant l'automatisation de l'écriture manuscrite améliorent également l'apprentissage du langage écrit comme les compétences orthographiques et la rédaction de texte dans différentes tranches d'âge (pour une revue : Santangelo & Graham, 2016). De façon similaire, les fonctions exécutives sont impliquées dans les compétences de langage écrit de haut niveau, comme la compréhension écrite ou la rédaction (Butterfuss & Kendeou, 2018; Cordeiro et al., 2020). Certaines études – quoique moins nombreuses indiquent également que les fonctions exécutives prédisent l'identification de mot et les compétences orthographiques chez des élèves du CP au CM2 (Altemeier et al., 2008; Peng et al., 2018).

Inversement, l'existence d'un lien causal entre habiletés motrices/rythmiques et les deux médiateurs présentés (écriture manuscrite et fonctions exécutives) dans la tranche d'âge étudiée soulève plus de discussions (Cameron et al., 2016). Par exemple, si la motricité fine joue un rôle dans l'acquisition de l'écriture manuscrite en début d'apprentissage, certains auteurs ont proposé que chez les élèves les plus âgés, seules certaines habiletés (e.g. graphomotrices) soient encore en lien avec l'écriture manuscrite (Cameron et al., 2016; Suggate et al., 2016). Plus généralement, l'influence de la motricité tendrait à diminuer avec l'automatisation de l'écriture (Karlsdottir & Stefansson, 2002). Concernant les fonctions exécutives, il existe un débat dans la littérature, certains auteurs suggèrent que les habiletés motrices n'exercent pas une influence sur les fonctions exécutives mais qu'à l'inverse le fonctionnement exécutif joue un rôle dans la réalisation de tâche motrices (Cameron et al., 2016) – voire que la relation entre ces habiletés découlent d'un facteur commun comme la maturation cérébrale (Cameron et al., 2016; Suggate et al., 2016). Or, il est indispensable de démontrer un lien de causalité entre les habiletés motrices/rythmiques et ces différents médiateurs pour confirmer leur influence sur l'apprentissage du langage écrit et ainsi affiner notre compréhension de cet apprentissage.

Cette section s'intéressera donc plus précisément à l'influence des habiletés motrices et rythmiques sur les deux médiateurs. Nous détaillerons les éléments apportés par la thèse pour répondre à cette question, et les limites de ce travail. La relation entre les habiletés motrices et l'écriture manuscrite sera traitée dans une première sous-section. Puis, nous aborderons la question de l'influence des habiletés motrices et rythmiques sur le fonctionnement exécutif dans une seconde sous-section.

2.1.1. Influence des différentes habiletés motrices sur l'acquisition de l'écriture manuscrite au cours du développement

Les résultats de plusieurs études de la thèse (voir Etudes 1.1., p.73 et 1.2., p. 91) révèlent que différents types d'habiletés motrices sont en lien avec l'automatisation de l'écriture manuscrite (évaluée à travers la vitesse de copie de l'alphabet) du CE2 au CM2 et confortent l'hypothèse d'une médiation du lien entre motricité et langage écrit à travers l'automatisation de l'écriture manuscrite chez des élèves de CE2 (voir Figure 24). Des résultats d'études antérieures avaient déjà pointé les relations entre les habiletés motrices et l'écriture manuscrite dans le développement typique, bien que ces études ne se soient focalisées que sur des élèves plus jeunes ou présentant une dysgraphie (Kaiser et al., 2009; Volman et al., 2006; Weintraub & Graham, 2000). Nos résultats montrent donc que ce lien persiste chez des élèves sans difficultés au moins jusqu'en CM2.

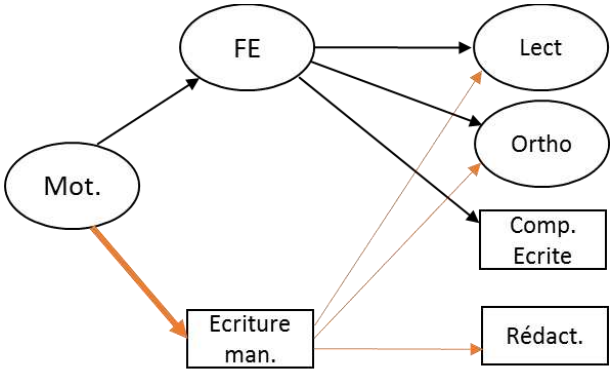

Figure 24 : Modèle représentant l'effet des habiletés motrices sur l'apprentissage du langage écrit. La médiation à travers l'écriture manuscrite est représentée en orange et la relation qui nous intéresse dans cette partie (lien entre motricité et écriture manuscrite) est présentée en gras.

Toutefois, comme indiqué dans l'étude 1.2., il semble que certaines habiletés motrices, comme la copie de figure ou le contrôle visuo-moteur (i.e. tracé entre deux lignes), ne soient plus significativement corrélés avec l'écriture manuscrite en CM1 (voir p.98). A l'inverse, la dextérité manuelle (déplacer des chevilles) est toujours significativement corrélée à l'automatisation de l'écriture manuscrite dans cette tranche d'âge. Cette étude ne portant que sur 32 participants, le manque de puissance statistique de l'étude pourrait expliquer cette absence de relation significative entre les tâches graphomotrices évaluées et l'écriture manuscrite. Il est néanmoins intéressant d'interpréter ce résultat au regard des connaissances actuelles sur l'apprentissage et l'automatisation de l'écriture manuscrite. En effet, l'étude de différentes tranches d'âge met en évidence un changement dans les processus d'écriture vers 9-10 ans : les élèves abandonnent le mode de contrôle rétroactif visuel de l'écriture pour utiliser un mode de contrôle proactif et l'écriture commence à s'automatiser (Palmis et al., 2017). Or, Weintraub et Graham (2000) proposent dans leur étude que les tâches de dextérité manuelle évaluent le contrôle moteur alors

que les tâches que nous avons considérées dans la thèse comme graphomotrices (e.g. copie de figure) sont en lien avec le contrôle visuel du mouvement. Les habiletés graphomotrices seraient donc un indicateur du contrôle visuo-moteur, qui commence à être moins sollicité dans l'écriture manuscrite vers 9 à 10 ans, et seraient donc moins corrélées à l'écriture manuscrite dans cette tranche d'âge. Ce travail de thèse s'est justement intéressé à une population âgée de 8 à 10 ans, qui correspond à la période de transition dans les processus d'écriture et dans laquelle une variabilité dans les processus d'écriture d'un élève à l'autre pourrait commencer à s'observer. Ces constats suggèrent que l'implication des différentes habiletés motrices dans l'automatisation de l'écriture manuscrite varient en fonction de la tranche d'âge étudiée. Cependant, contrairement à la proposition de Suggate et al. (2016) la principale différence entre les habiletés motrices ne proviendrait pas de la maîtrise de l'outil scripteur mais du traitement visuel impliqué. Ainsi, chez les élèves de maternelle, qui utilisent encore un contrôle rétroactif visuel de l'écriture, les tâches impliquant l'intégration et le traitement d'informations visuelles (comme la copie de figure) seraient plus en lien avec les tâches d'écriture manuscrite (Greenburg et al., 2020; Suggate et al., 2016). A l'inverse, chez les élèves plus âgés – à partir de 9 ans – les habiletés purement motrices seraient plus en lien avec l'automatisation de l'écriture manuscrite. Enfin, il est probable que chez l'adulte expert, le niveau de motricité n'influe plus sur l'écriture manuscrite – qui est alors parfaitement automatisée – et en conséquence, n'ait plus d'effet sur l'apprentissage du langage écrit à travers ce médiateur.

Une meilleure compréhension des processus moteurs impliqués dans l'acquisition de l'écriture manuscrite en fonction des tranches d'âge s'avère cruciale car elle permettrait de mieux comprendre l'influence des différentes habiletés motrices sur l'apprentissage du langage écrit au travers de ce médiateur. D'autre part, ceci permettrait d'améliorer l'efficacité d'interventions sensori-motrices conçues pour soutenir l'acquisition de l'écriture manuscrite. En effet, actuellement, les bénéfices de ces interventions ne sont pas clairement démontrés quand elles n'impliquent pas directement la pratique de l'écriture manuscrite. Ceci s'explique peut-être par l'hétérogénéité des études qui se sont intéressées à cette question dont la méthodologie employée (e.g. type d'intervention) et la population étudiée (avec ou sans dysgraphie, tranche d'âge variant de 4 à 13 ans) varie fortement d'une étude à l'autre (pour une méta-analyse : Hoy et al., 2011; Santangelo & Graham, 2016). Mieux caractériser les habiletés motrices impliquées dans l'apprentissage de l'écriture manuscrite à différentes étapes du développement permettrait de cibler les habiletés à entraîner en fonction de la population afin d'améliorer l'efficacité de ces interventions.

Pour conclure, il est nécessaire d'examiner quelles peuvent être les différentes habiletés motrices impliquées dans l'automatisation de l'écriture manuscrite en fonction de l'âge et dans les

troubles de l'écriture (comme la dysgraphie) afin de mieux comprendre l'effet de la motricité sur l'apprentissage du langage écrit au travers de ce médiateur. En conséquence, de futures études devront comparer des relations entre différentes habiletés motrices, écriture manuscrite et apprentissage du langage écrit dans plusieurs tranches d'âges, par exemple en distinguant les élèves avant et après 9 ans, afin d'étudier l'évolution de ces relations au cours du développement.

2.1.2. Quelles preuves d'une influence des habiletés motrices et rythmiques et sur le fonctionnement exécutif

Les résultats des modélisations par équations structurales réalisées dans le cadre de la thèse révèlent que les effets des habiletés motrices et rythmiques sur l'apprentissage du langage écrit sont expliqués par la médiation via les fonctions exécutives (voir Figure 25). Ces résultats sont en accord avec de précédentes études qui avaient rapporté des relations entre les habiletés motrices et rythmiques et les fonctions exécutives (Oberer et al., 2018; Schmidt et al., 2017; Tierney & Kraus, 2013).

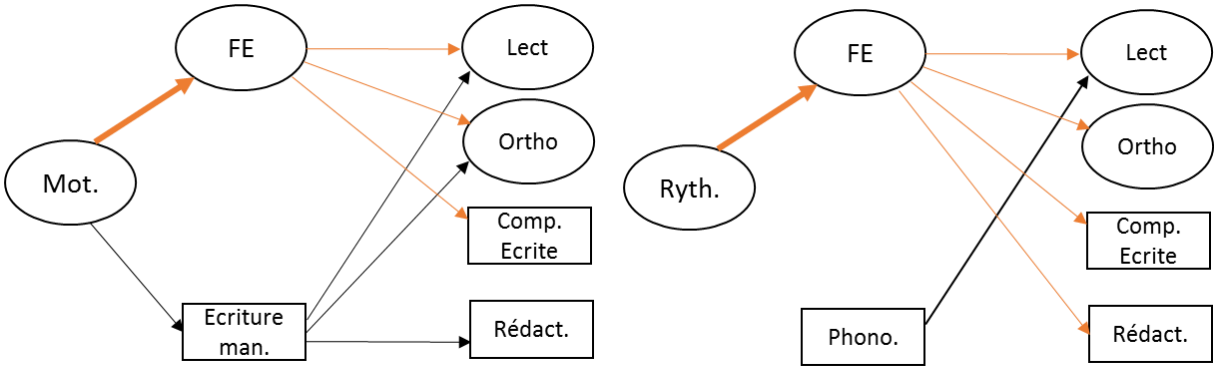

Figure 25 : Modèle représentant l'effet des habiletés motrices (à gauche) et des habiletés rythmiques (à droite) sur l'apprentissage du langage écrit. La médiation à travers les fonctions exécutives est représentée en orange et la relation qui nous intéresse dans cette partie (lien entre les habiletés motrices/rythmiques et les fonctions exécutives) est présentée en gras

Cependant, l'utilisation de ces méthodes corrélationnelles ne suffit pas pour déterminer les liens de causalité entre ces habiletés. Or, bien que nous ayons proposé dans les modèles présentés que les habiletés motrices et rythmiques influencent le développement des fonctions exécutives, plusieurs travaux suggèrent qu'inversement, les fonctions exécutives jouent un rôle dans la réalisation de tâches motrices ou rythmiques. Par exemple, certains auteurs suggèrent que les performances obtenues sur des activités motrices ou rythmiques plus automatisées ne seraient que peu voire pas corrélées aux mesures des fonctions exécutives, contrairement à la réalisation d'activités plus complexes impliquant un contrôle exécutif (Cameron et al., 2016; Maurer & Roebers, 2019). En conséquence, il est possible que le lien que nous observons dans notre étude ne soit pas dû à une influence des habiletés motrices/rythmiques sur les fonctions

exécutives mais à l'inverse à une influence des fonctions exécutives sur la réalisation d'activités motrices et rythmiques.

L'un des arguments avancés pour proposer une influence des habiletés motrices et rythmiques provient des résultats d'études interventionnelles. En effet, plusieurs études ont rapporté les bénéfices faibles à modérés d'interventions musicales (Jaschke et al., 2018; Moreno et al., 2011) ou d'entraînements sportifs (Xue et al., 2019) sur les fonctions cognitives. Cependant, l'implication des fonctions exécutives dans la réalisation de ces activités motrices et rythmiques pose question quant aux mécanismes qui sous-tendent les effets de ces entraînements. Certains auteurs ont ainsi proposé que ce sont en réalité l'implication des fonctions exécutives dans ces interventions qui soit à l'origine de ces améliorations. Par exemple, Schmidt et al., (2017) proposent dans l'hypothèse de remédiation cognitive que la réalisation de coordinations motrices complexes – sollicitant les fonctions exécutives – permettent en retour leur amélioration lors d'entraînements sportifs. De façon similaire, plusieurs auteurs suggèrent que les bénéfices de la musique sur les fonctions exécutives proviennent du fait que la pratique musicale s'appuie sur les fonctions exécutives et attentionnelles (Benz et al., 2016; Hannon & Trainor, 2007; Trainor et al., 2009). Plus généralement, ces auteurs proposent que ce ne sont pas tant les habiletés motrices et/ou rythmiques mais plutôt la pratique d'activités motrices ou rythmiques qui influe sur le développement des fonctions exécutives. Cet effet serait dû à une implication des fonctions exécutives dans les activités en question, et non à l'amélioration du niveau d'habiletés motrices et rythmiques découlant de l'entraînement.

Les propositions de ces différents auteurs indiquent qu'une réelle influence des habiletés motrices et rythmiques sur les fonctions exécutives reste à démontrer. Afin de prouver une telle influence, une solution pourrait être de démontrer l'efficacité d'une intervention ciblant spécifiquement la motricité fine ou les habiletés rythmiques, en limitant au maximum le contrôle exécutif. Dans ce contexte, il est important de rappeler que l'un des objectifs de la thèse était de montrer l'influence des habiletés motrices sur les différents médiateurs au travers d'une étude interventionnelle évaluant les bénéfices d'un entraînement moteur (voir Etude 5, p.167). Les activités motrices avaient été spécialement conçues pour proposer des exercices moteurs complexes tout en limitant au maximum l'implication des fonctions exécutives. Bien que, dans notre étude, aucun effet significatif sur les fonctions exécutives n'ait été rapporté suite à l'intervention motrice, soulignons que le groupe contrôle s'est entraîné sur un jeu de mathématiques. Or, le traitement numérique et la résolution de problèmes mathématiques implique les fonctions exécutives (Lubin et al., 2016; Roell et al., 2017) et l'entraînement proposé au groupe contrôle sollicitait donc beaucoup le contrôle exécutif malgré la faible contrainte motrice. La comparaison des effets de différentes interventions – avec des contraintes motrices et

cognitives plus ou moins élevées en fonction des entraînements – pourrait permettre de distinguer l'implication de la motricité de celle des fonctions exécutives dans l'intervention. Plus spécifiquement, il est nécessaire d'inclure un groupe contrôle à qui l'on propose une intervention sollicitant à la fois peu la motricité et peu les fonctions exécutives.

Plus généralement, il est indispensable de confirmer la relation causale entre les habiletés motrices et rythmiques et les fonctions exécutives pour démontrer une influence de ces deux habiletés sur le langage écrit au travers de ce médiateur.

Pour conclure, les études de la thèse ont permis de montrer que deux médiateurs sous-tendent la relation entre les habiletés motrices/rythmiques et l'apprentissage du langage écrit chez des élèves de CE2. Le lien entre les habiletés motrices et le langage écrit est expliqué à la fois par l'automatisation de l'écriture manuscrite et par le fonctionnement exécutif. Le lien entre les habiletés rythmiques et le langage écrit est quant à lui sous-tendu par les fonctions exécutives. Cependant, les analyses de modélisation par équations structurales utilisées pour confirmer ces hypothèses de médiations ne permettent pas de prouver l'existence d'un lien causal entre les habiletés. Or, si l'influence des deux médiateurs sur le langage écrit a déjà été montré, la relation causale entre les prédicteurs et les médiateurs mérite d'être plus approfondie pour confirmer une influence indirecte des habiletés motrices et rythmiques sur l'apprentissage du langage écrit dans cette tranche d'âge. Tout d'abord, il semble que certaines habiletés motrices influencent encore l'acquisition de l'écriture manuscrite mais il est nécessaire d'examiner plus précisément quelles sont les habiletés motrices impliquées dans cet apprentissage dans différentes tranches d'âge. Par ailleurs, l'influence des habiletés motrices et rythmiques sur le fonctionnement exécutif ne fait pas consensus : il reste à démontrer que le niveau moteur et rythmique favorise le développement des fonctions exécutives au-delà de leur implication dans les activités motrices et rythmiques. Plus largement, il est primordial de s'intéresser plus finement aux relations causales entre les habiletés motrices et rythmiques et les différents médiateurs afin de démontrer une influence de ces deux habiletés non-langagières sur l'apprentissage du langage écrit.

2.2. SPECIFICITES DES HABILETES MOTRICES ET RYTHMIQUES CHEZ DES ELEVES PRESENTANT UN TROUBLE DE L'APPRENTISSAGE DU LANGAGE ECRIT

L'un des objectifs de la thèse était d'évaluer plus précisément l'influence de difficultés motrices et rythmiques sur un trouble de l'apprentissage du langage écrit. En effet, un déficit des habiletés motrices et rythmiques dans la dyslexie a été rapportée par plusieurs auteurs (e.g.

Nicolson & Fawcett, 1994; Thomson & Goswami, 2008). Cependant, la présence de difficultés motrices associées n'est retrouvée que dans un sous-groupe d'élèves dyslexiques (Jover et al., 2013; Ramus, 2003). Les résultats des études menées chez les élèves tout venants (Cameron et al., 2012; Suggate et al., 2016) suggèrent que les élèves présentant les deux types de troubles associés expérimentent des difficultés d'apprentissage du langage écrit plus importantes par rapport à ceux avec un trouble isolé. Concernant les difficultés rythmiques, plusieurs auteurs proposent que ces dernières constituent un déficit central dans les troubles du langage et sont à l'origine du déficit phonologique retrouvés dans ces troubles (Goswami, 2011; Wolff, 2002). Cependant, l'existence de sous-groupes dans la dyslexie – présentant ou non des difficultés rythmiques associées – n'a pas été étudiée à notre connaissance. Il est donc nécessaire de confirmer que tous les élèves avec un trouble du langage écrit présentent des difficultés rythmiques – et si ce n'est pas le cas – de confirmer leur relation avec les habiletés phonologiques dans cette population. Pour finir, la présence de difficultés rythmiques a également été pointée dans le TDC (Trainor et al., 2018; Whitall et al., 2008). Les habiletés motrices et rythmiques étant associées dans le développement typique (Monier & Droit-Volet, 2019), il est important de déterminer si ces difficultés sont également associées dans les troubles de l'apprentissage du langage écrit – et donc si les difficultés rythmiques retrouvées dans les troubles du langage peuvent être la conséquence d'une association avec un trouble de la motricité ou au contraire si les difficultés expérimentées dans les deux troubles sont distinctes. L'étude 4 de la thèse (voir p.147) permet d'apporter des éléments de réponses à ces différentes questions qui seront discutées dans la suite de cette section.

2.2.1. Intérêt de distinguer des sous-groupes dans l'étude du trouble de l'apprentissage du langage écrit

Comme présenté dans une section précédente, les analyses de l'étude 4 (voir p.147) ne rapportent pas de différences significatives entre les groupes avec et sans troubles de l'apprentissage du langage écrit sur les quatre mesures de la motricité fine évaluées. De plus, l'examen des performances de chaque enfant révèle que l'on retrouve de faibles habiletés motrices chez 60% des élèves avec un trouble de l'apprentissage du langage écrit dans l'étude 4 (voir p.147) et 54% d'entre eux dans l'étude 5. Les résultats de l'étude confirment que les difficultés motrices sont plus fréquemment retrouvées dans le trouble de l'apprentissage du langage écrit que dans la population typique mais que la présence de ces difficultés n'est pas systématiquement associée à ces troubles (Jover et al., 2013; Ramus, 2003). Concernant les habiletés rythmiques, ce travail de thèse permet de répliquer des résultats antérieurs qui ont montré que les habiletés rythmiques sont altérées dans les troubles du langage écrit, comparativement à un groupe apparié en âge. Plus spécifiquement, les élèves présentant un

trouble de l'apprentissage du langage écrit sont globalement moins précis et anticipent plus l'apparition du stimulus que les élèves du groupe contrôle. Cependant, bien que l'on retrouve une détérioration des habiletés rythmiques au niveau du groupe, notons que tous les élèves avec un trouble de l'apprentissage du langage écrit ne semblent pas présenter des difficultés rythmiques : 9 d'entre eux (soit 30%) obtiennent des performances supérieures à la moyenne du groupe contrôle. Ces résultats vont à l'encontre de l'hypothèse de Goswami (2011), qui propose que le déficit du traitement des habiletés rythmiques est au cœur des troubles du langage. En effet, notre étude suggère que le trouble du langage écrit n'est pas systématiquement associé à des difficultés rythmiques. Ces constats soulignent l'intérêt d'étudier différents sous-groupes – en distinguant les élèves sur la base de la présence de difficultés motrices et/ou rythmiques – plutôt que de comparer un groupe « trouble des apprentissages » à un groupe contrôle. En effet, cette dernière méthode ne permet pas de rendre compte de la diversité des profils chez les élèves avec un trouble de l'apprentissage du langage écrit. A l'inverse, distinguer des sous-groupes permet de mieux caractériser ces différents profils et les interactions entre les difficultés motrices/rythmiques et l'apprentissage du langage écrit.

Dans l'étude 4 de la thèse, l'examen des différents sous-groupes révèle que les élèves avec de faibles habiletés motrices obtiennent de moins bonnes performances sur une tâche de dictée de mots irréguliers (voir p.160147). Ces résultats font écho à ceux de Di Brina et al. (2018) qui montrent que la présence d'un TDC associé chez les enfants dyslexique engendre un déficit du traitement orthographique. En effet, bien que ces enfants obtiennent des résultats significativement supérieurs à ceux présentant un trouble isolé sur les tâches de lecture, aucune différence significative entre les sous-groupes n'est retrouvé pour l'orthographe de mots. De plus, la présence d'un TDC associé se traduit par une détérioration de la qualité de l'écriture manuscrite. De ce fait, les auteurs suggèrent que chez les enfants dyslexiques avec des difficultés motrices associées, les faibles compétences orthographiques sont liées à l'altération de l'écriture manuscrite consécutives au trouble moteur. A l'inverse, dans le cas d'un trouble isolé, le trouble phonologique explique à la fois les difficultés de lecture et d'orthographe. Les résultats de notre étude ne permettent pas de confirmer cette hypothèse car aucune différence entre les sous-groupes n'est retrouvée sur la tâche de l'alphabet (voir p.160147). Néanmoins, des mesures plus fines de l'écriture manuscrite, évaluant à la fois la qualité de l'écriture et les caractéristiques kinesthésiques (e.g. vitesse et pics d'accélération) pourraient révéler des différences entre les élèves dyslexiques avec ou sans difficultés motrices associées. D'autres études sont nécessaires pour confirmer cette hypothèse.

Par ailleurs, l'examen des performances obtenues par deux sous-groupes d'élèves avec un trouble de l'apprentissage du langage écrit montre que la présence de difficultés rythmiques

associées se répercute sur l'orthographe de mots réguliers. Aucune différence significative n'est rapportée entre les sous-groupes sur l'ensemble des autres mesures [28]. Contrairement à l'hypothèse défendue par plusieurs auteurs (Flaugnacco et al., 2014; Goswami, 2011; Huss et al., 2011), la présence de difficultés rythmiques ne semble donc pas associée au déficit phonologique. Néanmoins, notre étude n'intègre que deux mesures du traitement phonologique (conscience phonémique et dénomination rapide d'images). Il est possible que les difficultés rythmiques soient associées à l'altération d'autres habiletés phonologiques – comme le traitement syllabique ou le traitement de l'accent tonique (Goswami, 2011; Leong & Goswami, 2014). D'autres études sont nécessaires pour clarifier les relations entre les déficits rythmiques et phonologiques dans les troubles du langage en comparant des sous-groupes d'élèves (avec ou sans difficultés rythmiques), plutôt qu'en comparant des élèves dyslexiques à un groupe contrôle apparié.

2.2.2. Liens entre les habiletés motrices et rythmiques chez les élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit

Tout au long de ce travail de thèse, les habiletés rythmiques et motrices ont été considérées comme des compétences distinctes – que ce soit dans la partie théorique ou dans la majeure partie des études présentées. Pourtant, ces habiletés rythmiques et motrices semblent étroitement reliées dans le développement typique (Konoike et al., 2012; Monier & Droit-Volet, 2019). Par exemple, le lien entre la synchronisation et la motricité a été rapporté chez des enfants de 4 à 8 ans (Monier & Droit-Volet, 2019) et dans les troubles moteurs (Dalla Bella, Benoit, et al., 2017; Janzen et al., 2019; Whitall et al., 2008). Par ailleurs, les études en neuro-imagerie suggèrent que le traitement rythmique active des structures cérébrales impliquées dans la réalisation d'activités motrices comme le cervelet, les ganglions de la base, le cortex prémoteur ou encore l'aire motrice supplémentaire, et ce même en l'absence de mouvement (Chen et al., 2008; Konoike et al., 2012, 2015). Les résultats de l'étude 3 (voir p.138) confortent l'existence de relations entre les habiletés motrices et la production rythmique dans le développement typique138. L'examen des corrélations révèle que la précision et la variabilité de la synchronisation sont significativement reliées aux trois mesures de dextérité manuelle. Les modèles d'équations structurales révèlent également des relations significatives entre la production rythmique et la motricité fine. En outre, les habiletés motrices semblent sous-tendre l'effet des habiletés rythmiques sur les fonctions exécutives et le langage écrit, puisque seul l'effet indirect de la motricité sur l'apprentissage du langage écrit perdure quand ces trois facteurs (i.e. habiletés motrices, rythmiques et fonctions exécutives) sont intégrés dans un même modèle. Ces résultats

[28] On retrouve toutefois une différence significative pour une mesure de la flexibilité mentale – mais la différence entre les groupes semble majorée par les performance d'un individu qui obtient un score très inférieur aux autres (voir Annexe 4, p.263).

soulignent la nécessité de considérer les habiletés motrices lors de l'étude de l'effet des habiletés rythmiques sur l'apprentissage du langage écrit chez les élèves tout venants.

De façon intéressante, cette relation entre habiletés motrices et rythmiques n'est pas rapportée chez les élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit. Des études antérieures n'ont pas retrouvé de corrélations significatives entre la synchronisation sensori-motrice et les habiletés motrices chez les élèves présentant un trouble du langage (Thomson et al., 2006). Notre étude corrobore ces résultats antérieurs : alors que des relations significatives sont retrouvées entre les habiletés motrices et rythmiques dans les études s'intéressant aux élèves tout venants (Etude 3, p.138), seule une corrélation significative a été retrouvée au sein du groupe d'élèves présentant un trouble des apprentissages (Etude 4, p.158). Bien que ce dernier résultat puisse être attribué à un manque de puissance statistique de l'étude – qui n'inclue que 32 participants – soulignons que les difficultés rythmiques retrouvées dans cette population ne semblent pas attribuables à la présence de difficultés motrices associées – contrairement à ce qui a été retrouvé dans le développement typique. En effet, les groupes avec et sans troubles des apprentissages diffèrent significativement pour la mesure des habiletés rythmiques mais pas pour la motricité fine. Ceci est concordant avec les résultats d'études antérieures qui ont montré une influence du rythme sur l'apprentissage de la lecture, de l'orthographe et de la phonologie, indépendamment du niveau moteur chez des élèves présentant un trouble du langage (Corriveau & Goswami, 2009; Thomson et al., 2006). Ces résultats suggèrent que ces deux habiletés interagissent différemment dans le développement typique et dans les troubles du langage – qu'il s'agisse du langage écrit ou du langage oral.

Un nombre croissant de travaux et modèles théoriques proposent que les difficultés de traitement du rythme soient au cœur des troubles du langage (Goswami, 2011; Ladányi et al., 2020; Wolff, 2002). Parallèlement, la présence de déficits du traitement temporel a été souligné dans des troubles affectant la motricité : par exemple, les élèves présentant un TDC sont plus variables sur une tâche de synchronisation sensori-motrice (Ladányi et al., 2020; Trainor et al., 2018; Whitall et al., 2008). Pourtant, les difficultés expérimentées dans ces différents troubles semblent indépendantes. Comme nous l'avons développé précédemment, les difficultés du traitement rythmique dans les troubles du langage sont retrouvées indépendamment de la présence de difficultés motrices (Thomson et al., 2006) et ces résultats suggèrent d'éventuelles différences dans la nature et/ou les processus qui sous-tendent les difficultés rythmiques dans ces troubles. Par exemple, il est possible que les difficultés rythmiques retrouvées dans le trouble développemental de la coordination soient spécifiques au versant de la production. En effet, actuellement, la quasi-totalité des études ayant rapporté des difficultés du traitement temporel dans ce trouble ont utilisé une tâche de synchronisation à une séquence rythmique visuelle (de

Castelnau et al., 2007) ou auditive (Roche et al., 2016; Whitall et al., 2008). Cependant la perception rythmique a été très peu étudiée dans ce trouble[29] et il est possible que les difficultés de production rythmique découlent de l'altération du contrôle moteur propre au TDC (Ladányi et al., 2020). Inversement, un déficit de la perception et de la production de rythme a été pointé dans les troubles du langage – qu'il s'agisse des troubles du langage écrit comme la dyslexie (Thomson et al., 2006; Wolff, 2002) ou de troubles du langage oral (Corriveau & Goswami, 2009). Cependant, ces difficultés n'ont été mises en évidence qu'avec des stimuli auditifs. Plus généralement, les modèles théoriques avancés pour expliquer les difficultés rythmiques dans les troubles du langage suggèrent un déficit du traitement auditif temporel qui impacterait en conséquence le traitement des unités phonologiques (Goswami, 2011; Tallal, 1980). Des modèles récents proposent que le traitement rythmique sous-tende à la fois la perception et la production du rythme musical (i.e. rythme non langagier) et la sensibilité au rythme du langage (Goswami, 2011, 2019; Ladányi et al., 2020). Un nombre croissant d'études s'intéresse à la perception de la structure rythmique de la parole, véhiculée par les intonations et accentuations dans les mots et les phrases, et à son influence sur les prédicteurs langagiers (Wood & Holliman, 2009) et sur le niveau de lecture et d'orthographe (Calet et al., 2015; Holliman et al., 2010, 2010). La sensibilité au rythme langagier est également altérée dans les troubles du langage (Caccia & Lorusso, 2020; Goswami, 2011). Ces modèles suggèrent donc que les troubles du langage pourraient être associés spécifiquement à une altération du traitement rythmique auditif – qui impacterait la perception du rythme langagier.

Pour conclure, nos résultats rapportent l'existence de difficultés rythmiques chez les élèves présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit, qui semble indépendantes de la présence de difficultés motrices associées. Ceci laisse supposer que, bien que des difficultés rythmiques et motrices aient été rapportées à la fois dans les troubles du langage et de la motricité, les processus altérés diffèrent dans les deux types de troubles. Ces résultats soulignent la nécessité de mieux caractériser les difficultés rythmiques propres à ces deux troubles neuro-développementaux. Comparer les difficultés rythmiques dans chaque population pourrait permettre de mieux comprendre l'origine de l'altération du traitement rythmique et son implication dans la symptomatologie de chacun de ces troubles.

En conclusion nos résultats soulignent la nécessité de s'intéresser à des sous-groupes d'élèves avec ou sans difficultés motrices et/ou rythmiques associées lors de l'étude des troubles

[29] Hormis une étude préliminaire qui suggère que les enfants avec un TDC présentent des difficultés de perception rythmiques – évaluées dans l'étude au travers d'une mesure de l'entraînement cérébral utilisant des mesures EEG.

de l'apprentissage du langage écrit. En effet, ces difficultés ne sont pas systématiquement retrouvées dans cette population et semblent être en lien avec une aggravation du trouble du langage écrit (e.g. altération du traitement orthographique). D'autres études impliquant plus de participants sont nécessaires pour confirmer et expliquer la détérioration des compétences orthographiques chez les élèves présentant des difficultés motrices et rythmiques associées. Par ailleurs, l'ensemble de ces travaux suggère que contrairement à ce qui est retrouvé chez les élèves sans difficultés (voir Etude 3, p.138), il existe une distinction entre les habiletés rythmiques et motrices dans le trouble de l'apprentissage du langage écrit. Les spécificités du traitement rythmique dans les troubles du langage doivent être explorées plus avant – en les comparant à la fois à des élèves sans difficultés mais aussi à des élèves présentant d'autres troubles neuro-développementaux comme le TDC, chez qui un déficit du traitement rythmique a également été pointé, mais dont les processus altérés pourraient être distincts.

2.3. UTILISATION DE JEUX VIDEO COMME OUTIL DE REMEDIATION

L'un des objectifs de la thèse était de participer à la conception et à la validation d'un jeu vidéo créé pour entraîner les compétences non langagières (habiletés motrices et rythmiques, planification visuo-spatiale). Dans cette section, nous questionnerons l'implication de différents acteurs dans la conception et la validation de ces nouveaux outils numériques en nous basant sur l'exemple du projet DysApp et en l'étayant des résultats formulés par des études antérieures.

2.3.1. Apport des différents acteurs dans la conception du jeu

Avant tout, il est nécessaire de replacer le projet dans son contexte. Au cours des dernières années, le nombre de nouveaux jeux vidéo dits sérieux, c'est-à-dire pensés pour servir un objectif éducatif par opposition aux jeux vidéo conçus pour le divertissement (Alvarez & Djaouti, 2011), a beaucoup augmenté sur le marché. Ces jeux sont de plus en plus utilisés dans les établissements scolaires et l'évaluation de leurs bénéfices constitue un enjeu crucial pour l'éducation. Le nombre de publications traitant de l'utilisation de ces jeux comme outils pédagogiques se multiplie en conséquence d'année en année (Zhonggen, 2019). Les résultats actuels tendent à souligner l'efficacité de ce type de jeux par rapport à des méthodes d'instruction classiques pour soutenir des apprentissages variés comme l'apprentissage des sciences (Wouters et al., 2013), des mathématiques (Wouters et al., 2013), de l'écriture manuscrite (Bonneton-Botté et al., 2020) ou encore du langage écrit (Richardson & Lyytinen, 2014). Toutefois, les bénéfices de ces jeux semblent modulés par les conditions d'utilisation : par exemple, une récente méta-analyse montre que le jeu sérieux « Graphogame » – qui cible les compétences phonologiques – n'améliore l'apprentissage de la lecture que lorsque les interactions entre l'élève et l'enseignant sont

privilégiées (e.g. interventions en petits groupes de 2 à 6 animées par un adulte) mais pas dans des situations d'apprentissage où l'enfant joue seul (McTigue et al., 2020). Ce résultat souligne la nécessité de tenir compte non seulement du contenu des jeux sérieux mais également du contexte d'apprentissage pour accroître les bénéfices de ces outils. Par ailleurs, malgré leurs avantages, les jeux sérieux n'ont généralement pas d'effet positif sur la motivation des élèves, qui favorise pourtant l'apprentissage (pour une méta-analyse : Buckley & Doyle, 2016; Wouters et al., 2013). L'une des interprétations avancées pour expliquer ce résultat est que les apprenants ne les considèrent pas comme ludiques du fait du manque d'intégration des objectifs pédagogiques dans le game design (i.e. objectifs ludiques). Il semble donc que la majorité des jeux sérieux ne soit pas suffisamment « ludifiés » et ne permettent pas de maintenir la motivation des élèves – notamment sur le long terme – contrairement à des jeux classiques.

Inversement, la pratique de jeux vidéo ludiques, n'ayant donc pas été conçus comme outils pédagogiques, pourrait s'avérer efficace, à la fois pour favoriser certains apprentissages (comme l'apprentissage du langage écrit) mais également pour améliorer des compétences transversales (comme les habiletés motrices ou les fonctions cognitives). Par exemple, Franceschini et al., (2017) ont montré que les enfants présentant une dyslexie bénéficient d'une intervention basée sur la pratique d'un jeu vidéo d'action. Suite à l'intervention, les élèves améliorent leurs compétences attentionnelles et leur vitesse de lecture. Plus généralement, un nombre croissant d'études suggèrent que les jeux vidéo d'action pourraient améliorer différentes fonctions cognitives (pour une méta-analyse : Bediou et al., 2018; Wang et al., 2016) bien que certains auteurs tendent à minimiser les bénéfices potentiels de ces jeux notamment dans le développement typique (e.g. Sala et al., 2018). Cependant, l'une des difficultés rencontrées dans l'étude de bénéfices de jeux déjà existants réside dans la compréhension des processus qui sous-tendent leurs bénéfices. Les jeux vidéo sollicitent de nombreuses habiletés, qu'il s'agisse de compétences motrices, attentionnelles, exécutives, ou visuo-spatiales, et il est difficile de déterminer si seules les compétences sollicitées en jeu s'améliorent ou si l'on retrouve également un effet de transfert à des compétences non-entraînées (Girard et al., 2013; Sala et al., 2018). En outre, l'utilisation d'un jeu déjà existant empêche de manipuler certaines dimensions du jeu pour comprendre les mécanismes qui sous-tendent ces améliorations. L'un des intérêts d'impliquer les chercheurs dans la conception du jeu est de permettre de choisir les activités proposées afin de pouvoir contrôler les habiletés qui seront entraînées.

Dans le cadre du projet dans lequel s'inscrit la thèse, le jeu vidéo a été créé en collaboration avec un laboratoire de recherche de sciences cognitives (le CeRCA), un laboratoire d'informatique (le CEDRIC) et une entreprise spécialisée dans la conception de jeux vidéo (Tralalère). Cette collaboration a permis de répondre aux différentes problématiques évoquées ci-dessus et de

proposer un jeu vidéo basé sur une assise scientifique tout en présentant un aspect ludique pour augmenter la motivation des élèves. Les bénéfices d'une conception collaborative impliquant différents professionnels ont par ailleurs été montrés dans une méta-analyse qui révèle que les jeux vidéo créés dans ces conditions s'avèrent être les plus efficaces pour soutenir les apprentissages (Cheung & Slavin, 2012). Au final, dans le cadre du projet, l'implication d'une entreprise spécialisée dans le développement d'outils éducatifs a permis de proposer un jeu ludique et motivant, et les apports théoriques issus de la recherche ont permis de cibler les activités proposées afin de pouvoir manipuler le type d'habiletés entraînées par le jeu.

2.3.2. Evaluation de l'outil

L'objectif de l'outil était d'entraîner différentes habiletés non langagières (motricité, habiletés rythmiques et fonctions exécutives). L'hypothèse défendue était que la pratique du jeu améliorerait l'apprentissage du langage écrit chez les élèves. Toutefois, par manque de temps, seules les activités motrices ont pu être testées dans le cadre de la thèse. En accord avec les résultats retrouvés dans les études corrélationnelles précédentes (voir Etude 1.1. p.73, 1.2., p. 91, 2.1. p.112 et 2.2. p.127), nous nous attendions à retrouver un bénéfice de ces activités à la fois sur les compétences motrices mais également sur le langage écrit et sur les deux médiateurs : les fonctions exécutives et l'écriture manuscrite. Cependant, les résultats de l'étude interventionnelle sont mitigés.

Tout d'abord, il est important de souligner que dans cette étude, les participants ont été répartis aléatoirement dans les groupes en fonction de leur école d'appartenance plutôt qu'en fonction de leurs résultats au pré-tests. Or, bien que des résultats significatifs suggèrent un bénéfice de l'entraînement au jeu sur certaines habiletés motrices (i.e. séquences motrices de la NEPSY) et sur certaines dimensions du langage écrit (i.e. dictée de mots), la différence initiale entre le groupe expérimental (entraîné au jeu cible) et le groupe contrôle (entraîné à un autre jeu) limite sévèrement l'interprétation des résultats. En effet, les élèves du groupe expérimental obtiennent des scores inférieurs aux élèves du groupe contrôle lors du pré-test pour les deux tâches où un bénéfice de la pratique du jeu est retrouvé (i.e. séquences motrices de la NEPSY et dictée de mots). Un effet plafond limitant l'évolution du groupe contrôle pourrait être à l'origine des différences de progression retrouvées entre les groupes. Des différences en pré-test se retrouvent également dans la répartition dans les sous-groupes d'élèves avec ou sans troubles de l'apprentissage du langage écrit. Nous avons observé a posteriori que le pourcentage de participants présentant des difficultés langagières est beaucoup plus important dans le groupe contrôle (37,1%) que dans le groupe expérimental (9,0%). Un appariement des deux groupes sur les mesures en pré-test, plutôt qu'une répartition aléatoire aurait pu permettre de limiter ces biais, en évitant les différences en pré-test sur les mesures motrices et langagières, et en

répartissant les élèves avec un trouble des apprentissages dans chacune des conditions d'entraînement de façon plus équilibrée.

Par ailleurs, le peu de bénéfices retrouvés sur l'habileté entraînée lors de la pratique du jeu constitue une seconde limite à nos résultats. En effet, un bénéfice significatif du jeu n'est retrouvé que sur une des quatre mesures de la motricité fine réalisées : la dextérité manuelle de la NEPSY. Contrairement à nos hypothèses et à des résultats antérieurs (McGlashan et al., 2017), aucun effet d'interaction (groupe x session) significatif n'est retrouvé sur les autres tâches évaluant la motricité fine (e.g. déplacement de chevilles). Certaines limites du protocole pourraient partiellement expliquer les résultats.

Premièrement, le jeu testé était une version bêta qui présentait encore des imperfections. Par exemple, certaines progressions individuelles dans le jeu n'ont pas été sauvegardées – ce qui a impacté la difficulté des niveaux proposés à certains élèves. De plus, l'analyse des courbes de progression révèlent qu'elles n'étaient pas toujours optimales, dans la mesure où le niveau de difficulté pouvait s'avérer trop faible pour certains joueurs, limitant ainsi leur marge de progression. Du fait des difficultés de sauvegarde, nous n'avons pas pu examiner l'évolution au sein du jeu pour chaque élève (e.g. amélioration de la vitesse et de la fluence du mouvement au fil des séances). La mise en relation de ces données avec les résultats des pré et post-tests pourrait pourtant permettre d'identifier plus précisément les élèves ayant bénéficié de l'entraînement. Par exemple, il est possible que les élèves s'étant le plus amélioré sur la tâche de la NEPSY (i.e. toucher le plus vite possible son pouce avec les autres doigts) soient ceux ayant le plus progressé sur l'activité Twister (i.e. toucher le plus vite possible des cibles avec les différents doigts) qui nécessite également une dissociation des doigts.

Deuxièmement, il est important de souligner que la durée de l'entraînement est plutôt courte et peu intensive comparativement à d'autres interventions ciblant la motricité : notre intervention a duré 6 semaines à raison de deux interventions par semaine (pour un total de 240 minutes) et a été entrecoupée d'une période de vacances. La procédure a été choisie sur la base des protocoles fréquemment utilisés pour tester l'efficacité d'interventions du langage écrit – qui proposent a minima une durée d'intervention similaire (Jamshidifarsani et al., 2019). Des contraintes de terrain imposées par les écoles (e.g. période de vacances) ont également influencé la durée de l'intervention proposée. Or, les interventions motrices sont généralement plus longues que celle proposée dans notre étude (e.g. 360 minutes pour l'étude de Poon et al., 2010 ; 480 minutes pour l'étude de Vernadakis et al., 2015) ou plus intensives (e.g. 5 sessions de 10 minutes dans la semaine pour l'étude de McGlashan et al., 2017) et la durée de l'entraînement pourrait moduler les bénéfices d'interventions motrices (Barnett et al., 2015). Cependant, dans le cadre d'une intervention en classe impliquant des élèves sans difficultés, la mise en place

d'entraînements peu soutenus est plus facile et peut être plus proche de l'utilisation réelle que pourrait en faire les enseignants. En effet, bien que l'utilisation d'outils numériques en classe augmente, l'usage fréquent de jeux pédagogiques numériques en classe reste peu courant (en 2018, seuls 4% des enseignants déclarent en utiliser dans la plupart de leurs cours) (Association internationale pour l'évaluation du rendement scolaire, 2019). En conséquence, il est difficile d'envisager l'utilisation intensive de ce type de jeux en classe pour les élèves tout venants. Par contre, l'évaluation d'une intervention plus longue pourrait être intéressante pour prouver ses bénéfices chez les élèves avec des difficultés motrices associées.

Au-delà des caractéristiques de l'intervention (e.g. progression des niveaux et durée de l'entraînement), il est nécessaire d'identifier les élèves à qui elle peut bénéficier. En premier lieu, certains facteurs n'ayant pas été contrôlés dans cette étude, comme par exemple la familiarité vis-à-vis des tablettes et la pratique de jeux vidéo ou d'activité motrices en extra-scolaire, peuvent venir masquer certains résultats. Par exemple, il est possible que les élèves ayant une pratique intensive de jeu vidéo sur tablette et/ou pratiquant une activité motrice en extra-scolaire ne bénéficient que peu de l'intervention, contrairement aux autres élèves (e.g. Barnett et al., 2015). Par ailleurs, dans cette étude – et tout au long de la thèse – nous avons choisi de distinguer les élèves sur la base de la présence ou de l'absence de trouble de l'apprentissage du langage écrit. Cependant, d'autres facteurs semblent importants à prendre en compte comme le niveau d'habiletés motrices. Compte tenu de la taille de l'échantillon, nous n'avons pas examiné plus précisément dans cette étude les bénéfices sur des sous-groupes d'élèves présentant des difficultés motrices associées, car ils étaient trop peu nombreux. Cependant nos analyses exploratoires suggèrent que les élèves ayant le plus amélioré leurs habiletés orthographiques suite à la pratique du jeu sont ceux qui ont de plus faibles habiletés motrices. Ceci suggère que l'entraînement moteur est plus bénéfique pour ces élèves. L'étude 4 a également montré que les élèves avec un trouble de l'apprentissage du langage écrit et des difficultés motrices associées avaient plus de difficultés à orthographier les mots que les élèves avec des habiletés motrices préservées (voir p.147). En conséquence, il pourrait être intéressant de tester spécifiquement l'influence d'une intervention motrice dans différents sous-groupes afin de tester si ces interventions pourraient être plus efficaces chez les élèves présentant une comorbidité. Plus largement, il pourrait être intéressant d'adopter une démarche plus exploratoire pour identifier quels sont les enfants qui ont bénéficié de cette intervention. Par exemple, dans une étude évaluant les bénéfices d'une application ciblant l'écriture manuscrite, les résultats indiquent que seuls les élèves présentant un niveau intermédiaire – mais pas ceux présentant un niveau faible ou élevé – bénéficient de l'application comparativement à un enseignement classique (Bonneton-Botté et al., 2020).

En conclusion, l'étude interventionnelle menée dans le cadre de ce travail de thèse présente des limites méthodologiques. Ces constats soulèvent la nécessité de poursuivre ces études pour tester si le jeu peut s'avérer efficace en faisant varier certaines modalités de l'intervention (e.g. durée d'intervention) et la population ciblée (e.g. cibler les enfants présentant des difficultés motrices). Par ailleurs, bien que ces limites méthodologiques soient parfois liées aux contraintes imposées par la collaboration avec les partenaires du projet (e.g. avancées dans le développement du jeu, contraintes temporelles liées au milieu scolaire), il est important de souligner que certains avantages apportés par cette association n'ont pas été évalués ici. Par exemple, l'un des principaux avantages d'une collaboration avec un partenaire spécialisé dans la conception d'outils numériques était de pouvoir proposer un jeu dont les objectifs pédagogiques soient complètement intégrés dans un univers et un scénario ludique, afin de favoriser la motivation des élèves (Wouters et al., 2013). Or, les aspects motivationnels des élèves n'ont pas encore été testés. Par ailleurs, les contraintes temporelles imposées par l'expérimentation en classe permettent de proposer une intervention plus facile à mettre en place pour les enseignants. Or bien que l'utilisabilité des outils numériques en classe n'ait pas été abordée dans le cadre de cette thèse, certains travaux indiquent que leur utilisation par les enseignant ne dépend pas uniquement de la perception de l'efficacité de l'outil mais également de sa facilité d'utilisation (Scherer et al., 2019) : un jeu éducatif qui nécessiterait une utilisation longue pour être efficace serait probablement rapidement délaissé. Un enjeu crucial de l'usage de jeux pédagogiques en classe est donc de tester une intervention dont la mise en place par les enseignants soit facile et peu coûteuse.

3. CONCLUSION

L'objectif de la thèse était d'examiner les relations entre deux habiletés non-langagières – la motricité fine et les habiletés rythmiques – et l'apprentissage du langage écrit à la fois, dans le développement typique et dans les troubles de l'apprentissage du langage écrit. Les résultats permettent tout d'abord de montrer que ces habiletés sont en lien avec des compétences de bas niveau (i.e. identification de mots et compétences orthographiques) et avec des compétences de haut niveau (i.e. compréhension écrite et rédaction) chez des élèves du CE2 au CM2. De plus, ce travail permet d'apporter un éclairage sur les mécanismes qui sous-tendent les relations entre ces habiletés non-langagières et l'apprentissage du langage écrit. Les résultats de trois études modélisant ces liens indiquent (1) que l'effet des habiletés motrices sur l'apprentissage du langage écrit est sous-tendu à la fois par l'automatisation de l'écriture manuscrite et par les fonctions exécutives, et (2) que l'effet des habiletés rythmiques est expliqué uniquement par les fonctions

exécutives. Néanmoins, les relations causales entre les deux habiletés cibles et les médiateurs restent à démontrer.

Par ailleurs l'étude des élèves présentant un trouble des apprentissages révèle que dans cette population, la présence de difficultés motrices et/ou rythmiques associées se traduit par une aggravation du trouble par rapport aux élèves présentant un trouble isolé d'apprentissage du langage écrit. D'autres travaux sont nécessaires pour mieux comprendre comment ces difficultés associées peuvent influer sur la symptomatologie.

Plus globalement, l'ensemble de ces résultats soutient l'hypothèse d'une influence des habiletés motrices et rythmiques sur l'apprentissage du langage écrit et suggèrent qu'il pourrait être utile d'entraîner ces habiletés pour soutenir l'apprentissage du langage écrit. Les résultats de l'étude interventionnelle mise en place dans la thèse ne permettent pour l'instant pas de démontrer clairement les bénéfices de ce type d'entraînement. D'autres recherches sont nécessaires afin de valider de nouvelles remédiations basées sur un entraînement de ces habiletés. Les analyses exploratoires menées dans la thèse suggèrent que ces dernières pourraient notamment être efficaces pour améliorer le langage écrit chez les élèves présentant des difficultés motrices/rythmiques.

BIBLIOGRAPHIE

Abbott, R. D., Berninger, V. W., & Fayol, M. (2010). Longitudinal relationships of levels of language in writing and between writing and reading in grades 1 to 7. *Journal of Educational Psychology*, *102*(2), 281‑298.

Adi-Japha, E., & Brestel, G. (2020). Motor skill learning with impaired transfer by children with developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities*, *103*, 103671.

Afonso, O., Connelly, V., & Barnett, A. L. (2019). Struggling with writing: An examination of writing difficulties in specific language impairment, developmental dyslexia and developmental coordination disorder. In *Spelling and Writing Words* (pp. 112-127). Brill.

Alamargot, D., Chesnet, D., Dansac, C., & Ros, C. (2006). Eye and Pen : A new device for studying reading during writing. *Behavior Research Methods*, *38*(2), 287‑299.

Albaret, J.-M., Kaiser, M.-L., & Soppelsa, R. (2013). *Troubles de l'écriture chez l'enfant*. De Boeck Superieur.

Alexandrovsky, D., Alvarez, K., Walther-Franks, B., Wollersheim, J., & Malaka, R. (2016). Jump 'n'rhythm: a video game for training timing skills. *Mensch und Computer 2016–Workshopband*.

Altemeier, L. E., Abbott, R., & Berninger, V. (2008). Executive functions for reading and writing in typical literacy development and dyslexia. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 588‑606.

Altemeier, L. E., Jones, J., Abbott, R. D., & Berninger, V. W. (2006). Executive Functions in Becoming Writing Readers and Reading Writers : Note Taking and Report Writing in Third and Fifth Graders. *Developmental Neuropsychology*, *29*(1), 161‑173.

Alvarez, J., & Djaouti, D. (2011). An introduction to Serious game Definitions and concepts. *Serious Games & Simulation for Risks Management*, *11*(1), 11-15.

Anvari, S. H., Trainor, L. J., Woodside, J., & Levy, B. A. (2002). Relations among musical skills, phonological processing, and early reading ability in preschool children. *Journal of Experimental Child Psychology, 83*(2), 111‑130.

American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders (DSM-5®)*. American Psychiatric Pub.

Axford, C., Joosten, A. V., & Harris, C. (2018). iPad applications that required a range of motor skills promoted motor coordination in children commencing primary school. *Australian occupational therapy journal*, *65*(2), 146-155.

Bååth, R., Tjøstheim, T. A., & Lingonblad, M. (2016). The role of executive control in rhythmic timing at different tempi. *Psychonomic Bulletin & Review*, *23*(6), 1954‑1960.

Bailey, J. A., & Penhune, V. B. (2010). Rhythm synchronization performance and auditory working memory in early- and late-trained musicians. *Experimental Brain Research*, *204*(1), 91‑101.

Bara, F., & Gentaz, E. (2011). Haptics in teaching handwriting : The role of perceptual and visuo-motor skills. *Human Movement Science*, *30*(4), 745‑759.

Barkley, R. A. (1997). Behavioral inhibition, sustained attention, and executive functions: constructing a unifying theory of ADHD. *Psychological bulletin*, *121*(1), 65.

Barnett, L. M., Ridgers, N. D., Reynolds, J., Hanna, L., & Salmon, J. (2015). Playing Active Video Games may not develop movement skills : An intervention trial. *Preventive Medicine Reports*, *2*, 673‑678.

Baron, R. M., & Kenny, D. A. (1986). The moderator–mediator variable distinction in social psychological research: Conceptual, strategic, and statistical considerations. *Journal of personality and social psychology*, *51*(6), 1173.

Becker, D. R., Miao, A., Duncan, R., & McClelland, M. M. (2014). Behavioral self-regulation and executive function both predict visuomotor skills and early academic achievement. *Early Childhood Research Quarterly, 29*(4), 411‑424.

Bediou, B., Adams, D. M., Mayer, R. E., Tipton, E., Green, C. S., & Bavelier, D. (2018). Meta-analysis of action video game impact on perceptual, attentional, and cognitive skills. *Psychological Bulletin*, *144*(1), 77‑110.

Beers, S. F., & Nagy, W. E. (2011). Writing development in four genres from grades three to seven : Syntactic complexity and genre differentiation. *Reading and Writing*, *24*(2), 183‑202.

Bégel, V., Di Loreto, I., Seilles, A., & Dalla Bella, S. (2017). Music Games : Potential Application and Considerations for Rhythmic Training. *Frontiers in Human Neuroscience, 11*.

Bégel, V., Seilles, A., & Dalla Bella, S. (2018). Rhythm Workers: A music-based serious game for training rhythm skills. *Music & Science*, *1*, 2059204318794369.

Benz, S., Sellaro, R., Hommel, B., & Colzato, L. S. (2016). Music Makes the World Go Round : The Impact of Musical Training on Non-musical Cognitive Functions—A Review. *Frontiers in Psychology, 6,* 2023.

Bernardi, M., Leonard, H. C., Hill, E. L., Botting, N., & Henry, L. A. (2018). Executive functions in children with developmental coordination disorder : A 2-year follow-up study. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *60*(3), 306‑313.

Berninger, V. W., & Chanquoy, L. (2012). What writing is and how it changes across early and middle childhood development. *Writing: A mosaic of new perspectives*, 65-84.

Berninger, V. W., & Fuller, F. (1992). Gender differences in orthographic, verbal, and compositional fluency : Implications for assessing writing disabilities in primary grade children. *Journal of School Psychology*, *30*(4), 363‑382.

Berninger, V. W., Fuller, F., & Whitaker, D. (1996). A process model of writing development across the life span. *Educational Psychology Review, 8*(3), 193‑218.

Berninger, V. W., & Winn, W. (2006). Implications of advancements in brain research and technology for writing development, writing instruction, and educational evolution. *Handbook of writing research*, 96-114.

Berninger, V., Yates, C., Cartwright, A., Rutberg, J., Remy, E., & Abbott, R. (1992). Lower-level developmental skills in beginning writing. *Reading and Writing*, *4*(3), 257‑280.

Best, J., Miller, P,, & Naglieri, J. (2011). Relations between Executive Function and Academic Achievement from Ages 5 to 17 in a Large, Representative National Sample. *Learning and Individual Differences*, 327–336.

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.

Bialystok, E., & DePape, A.-M. (2009). Musical expertise, bilingualism, and executive functioning. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 35(2), 565‑574.

Bianco, M. (2015). La compréhension de textes : Peut-on l'apprendre et l'enseigner? In *Psychologie des apprentissages scolaires,* 28.

Bianco, M. (2016). Du langage oral à la compréhension de l'écrit. PUG - Presses universitaires de Grenoble.

Bianco, M., Pellenq, C., Lambert, E., Bressoux, P., Lima, L., & Doyen, A.-L. (2012). Impact of early code-skill and oral-comprehension training on reading achievement in first grade. *Journal of Research in Reading*, 35(4), 427‑455.

Biotteau, M., Albaret, J.-M., Lelong, S., & Chaix, Y. (2017). Neuropsychological status of French children with developmental dyslexia and/or developmental coordination disorder : Are both necessarily worse than one? *Child Neuropsychology*, 23(4), 422‑441.

Bonneton-Botté, N., Fleury, S., Girard, N., Le Magadou, M., Cherbonnier, A., Renault, M., Anquetil, E., & Jamet, E. (2020). Can tablet apps support the learning of handwriting? An investigation of learning outcomes in kindergarten classroom. *Computers & Education*, 151, 103831.

Bonney, E., Jelsma, D., Ferguson, G., & Smits-Engelsman, B. (2017). Variable training does not lead to better motor learning compared to repetitive training in children with and without DCD when exposed to active video games. *Research in Developmental Disabilities*, 62, 124‑136.

Bosse, M.-L., Chaves, N., & Valdois, S. (2014). Lexical orthography acquisition : Is handwriting better than spelling aloud? *Frontiers in Psychology*, 5.

Bosse, M.-L., Valdois, S., & Tainturier, M.-J. (2003). Analogy without priming in early spelling development. 24.

Botha, S., & Africa, E. K. (2020). The Effect of a Perceptual-Motor Intervention on the Relationship Between Motor Proficiency and Letter Knowledge. Early Childhood Education Journal.

Brookes, R. L., Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2007). Prisms throw light on developmental disorders. *Neuropsychologia*, 45(8), 1921‑1930.

Brookes, R. L., Tinkler, S., Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2010). Striking the right balance : Motor difficulties in children and adults with dyslexia. *Dyslexia*, 16(4), 358‑373.

Brookman, A., McDonald, S., McDonald, D., & Bishop, D. V. M. (2013). Fine motor deficits in reading disability and language impairment : Same or different? *PeerJ*, 1, e217.

Buckley, P., & Doyle, E. (2016). Gamification and student motivation. *Interactive learning environments*, *24*(6), 1162-1175.

Bus, A. G., & van IJzendoorn, M. H. (1999). Phonological awareness and early reading : A meta-analysis of experimental training studies. *Journal of Educational Psychology*, 91(3), 403‑414.

Butler, C., Pimenta, R., Tommerdahl, J., Fuchs, C. T., & Caçola, P. (2019). Using a handwriting app leads to improvement in manual dexterity in kindergarten children. *Research in Learning Technology*, 27.

Butterfuss, R., & Kendeou, P. (2018). The Role of Executive Functions in Reading Comprehension. *Educational Psychology Review*, 30(3), 801‑826.

Caccia, M., & Lorusso, M. L. (2020). The processing of rhythmic structures in music and prosody by children with developmental dyslexia and developmental language disorder. *Developmental Science*, e12981.

Cadoret, G., Bigras, N., Duval, S., Lemay, L., Tremblay, T., & Lemire, J. (2018). The mediating role of cognitive ability on the relationship between motor proficiency and early academic achievement in children. *Human Movement Science*, 57, 149‑157.

Calet, N., Gutiérrez-Palma, N., Simpson, I. C., González-Trujillo, M. C., & Defior, S. (2015). Suprasegmental Phonology Development and Reading Acquisition : A Longitudinal Study. *Scientific Studies of Reading*, 19(1), 51‑71.

Cameron, C. E., Brock, L. L., Murrah, W. M., Bell, L. H., Worzalla, S. L., Grissmer, D., & Morrison, F. J. (2012). Fine Motor Skills and Executive Function Both Contribute to Kindergarten Achievement. *Child Development*, 83(4), 1229‑1244.

Cameron, C. E., Cottone, E. A., Murrah, W. M., & Grissmer, D. W. (2016). How Are Motor Skills Linked to Children's School Performance and Academic Achievement? *Child Development Perspectives*, 10(2), 93‑98.

Carlson, A. G., Rowe, E., & Curby, T. W. (2013). Disentangling Fine Motor Skills' Relations to Academic Achievement : The Relative Contributions of Visual-Spatial Integration and Visual-Motor Coordination. *The Journal of Genetic Psychology*, 174(5), 514‑533.

Castles, A., Rastle, K., & Nation, K. (2018). Ending the Reading Wars : Reading Acquisition From Novice to Expert. *Psychological Science in the Public Interest, 19*(1), 5‑51.

Chaix, Y., & Albaret, J.-M. (2013). Trouble de l'Acquisition de la Coordination et déficits visuo-spatiaux. *Développements*, n° 15(2), 32‑43.

Chang, M., & Gu, X. (2018). The role of executive function in linking fundamental motor skills and reading proficiency in socioeconomically disadvantaged kindergarteners. *Learning and Individual Differences*, 61, 250‑255.

Chanquoy, L., & Alamargot, D. (2002). Mémoire de travail et rédaction de textes : Évolution des modèles et bilan des premiers travaux. *L'Année psychologique*, 102(2), 363‑398.

Chao, Y.-Y., Scherer, Y. K., & Montgomery, C. A. (2015). Effects of Using Nintendo WiiTM Exergames in Older Adults : A Review of the Literature. *Journal of Aging and Health*, 27(3), 379‑402.

Chen, J. L., Penhune, V. B., & Zatorre, R. J. (2008). Listening to musical rhythms recruits motor regions of the brain. *Cerebral cortex*, *18*(12), 2844-2854.

Chern, A., Tillmann, B., Vaughan, C., & Gordon, R. L. (2018). New evidence of a rhythmic priming effect that enhances grammaticality judgments in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 173, 371‑379.

Cheung, A. C. K., & Slavin, R. E. (2012). How features of educational technology applications affect student reading outcomes : A meta-analysis. *Educational Research Review*, 7(3), 198‑215.

Chevrie-Muller, C., Simon, A. M., Fournier, S., & Brochet, M. O. (1997). L2MA: batterie, langage oral, langage écrit, mémoire, attention. *Editions du Centre de psychologie appliquée*.

Chiang, C.-H., Hämäläinen, J., Xu, W., & Wang, H.-L. (2020). Neural Responses to Musical Rhythm in Chinese Children With Reading Difficulties. *Frontiers in Psychology*, 11, 1013.

Christopher, M. E., Miyake, A., Keenan, J. M., Pennington, B., DeFries, J. C., Wadsworth, S. J., Willcutt, E., & Olson, R. K. (2012). Predicting word reading and comprehension with executive function and speed measures across development : A latent variable analysis. *Journal of Experimental Psychology: General*, 141(3), 470‑488.

Cignetti, F., Nemmi, F., Vaugoyeau, M., Girard, N., Albaret, J.-M., Chaix, Y., Péran, P., & Assaiante, C. (2020). Intrinsic Cortico-Subcortical Functional Connectivity in Developmental Dyslexia and Developmental Coordination Disorder. *Cerebral Cortex Communications*, 1(1).

Cignetti, F., Vaugoyeau, M., Fontan, A., Jover, M., Livet, M.-O., Hugonenq, C., Audic, F., Chabrol, B., & Assaiante, C. (2018). Feedforward motor control in developmental dyslexia and developmental coordination disorder : Does comorbidity matter? *Research in Developmental Disabilities*, 76, 25‑34.

Clements, D. H., Sarama, J., & Germeroth, C. (2016). Learning executive function and early mathematics : Directions of causal relations. *Early Childhood Research Quarterly*, 36, 79‑90.

Cogo-Moreira, H., Ávila, C. R. B. de, Ploubidis, G. B., & Mari, J. de J. (2013). Effectiveness of Music Education for the Improvement of Reading Skills and Academic Achievement in Young Poor Readers : A Pragmatic Cluster-Randomized, Controlled Clinical Trial. *PLOS ONE*, 8(3), e59984.

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.

Coltheart, M., Rastle, K., Perry, C., Langdon, R., & Ziegler, J. (2001). DRC : A dual route cascaded model of visual word recognition and reading aloud. *Psychological Review*, 108(1), 204‑256.

Connelly, V., Dockrell, J. E., Walter, K., & Critten, S. (2012). Predicting the Quality of Composition and Written Language Bursts From Oral Language, Spelling, and Handwriting Skills in Children With and Without Specific Language Impairment. *Written Communication*, *29*(3), 278‑302.

Cook, C. J., Howard, S. J., Scerif, G., Twine, R., Kahn, K., Norris, S. A., & Draper, C. E. (2019). Associations of physical activity and gross motor skills with executive function in preschool children from low-income South African settings. *Developmental Science*, *22*(5), e12820.

Cordeiro, C., Limpo, T., Olive, T., & Castro, S. L. (2020). Do executive functions contribute to writing quality in beginning writers? A longitudinal study with second graders. *Reading and Writing*, 33(4), 813‑833.

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.

Cragg, L., Keeble, S., Richardson, S., Roome, H. E., & Gilmore, C. (2017). Direct and indirect influences of executive functions on mathematics achievement. *Cognition*, 162, 12‑26.

Cutler, A. (1991). Linguistic rhythm and speech segmentation. In *Music, language, speech and brain* (pp. 157-166). Palgrave, London.

Dalla Bella, S., Benoit, C.-E., Farrugia, N., Keller, P. E., Obrig, H., Mainka, S., & Kotz, S. A. (2017). Gait improvement via rhythmic stimulation in Parkinson's disease is linked to rhythmic skills. *Scientific Reports*, 7, 42005.

Dalla Bella, S., Farrugia, N., Benoit, C.-E., Begel, V., Verga, L., Harding, E., & Kotz, S. A. (2017). BAASTA : Battery for the Assessment of Auditory Sensorimotor and Timing Abilities. *Behavior Research Methods*, 49(3), 1128‑1145.

Daly, C. J., Kelley, G. T., & Krauss, A. (2003). Relationship Between Visual-Motor Integration and Handwriting Skills of Children in Kindergarten : A Modified Replication Study. *American Journal of Occupational Therapy*, 57(4), 459‑462.

Daumas, F. (1982). Méthodes de normalisation des données. *Revue de statistique appliquée*, *30*(4), 23-38.

Dauvergne, C., Bégel, V., Gény, C., Puyjarinet, F., Laffont, I., & Dalla Bella, S. (2018). Home-based training of rhythmic skills with a serious game in Parkinson's disease : Usability and acceptability. *Annals of Physical and Rehabilitation Medicine*, 61(6), 380‑385.

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.

De Castelnau, P., Albaret, J.-M., Chaix, Y., & Zanone, P.-G. (2007). Developmental coordination disorder pertains to a deficit in perceptuo-motor synchronization independent of attentional capacities. *Human Movement Science*, 26(3), 477‑490.

Deacon, S. H., Conrad, N., & Pacton, S. (2008). A statistical learning perspective on children's learning about graphotactic and morphological regularities in spelling. *Canadian Psychology/Psychologie Canadienne*, 49(2), 118‑124.

Degé, F., & Schwarzer, G. (2011). The Effect of a Music Program on Phonological Awareness in Preschoolers. *Frontiers in Psychology*, 2.

D'Elia, L., Satz, P., Uchiyama, C. L., & White, T. (1996). *Color trails test*. Odessa, FL: PAR.

Dellatolas, G., Watier, L., Le Normand, M.-T., Lubart, T., & Chevrie-Muller, C. (2009). Rhythm Reproduction in Kindergarten, Reading Performance at Second Grade, and Developmental Dyslexia Theories. *Archives of Clinical Neuropsychology*, 24(6), 555‑563.

Diamond, A. (2000). Close interrelation of motor development and cognitive development and of the cerebellum and prefrontal cortex. *Child development*, 71(1), 44–56.

Diamond, A. (2015). Effects of Physical Exercise on Executive Functions : Going beyond Simply Moving to Moving with Thought. *Annals of sports medicine and research*, 2(1), 1011.

Diamond, A., & Ling, D. S. (2016). Conclusions about interventions, programs, and approaches for improving executive functions that appear justified and those that, despite much hype, do not. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 18, 34‑48.

Di Brina, C. D., Averna, R., Rampoldi, P., Rossetti, S., & Penge, R. (2018). Reading and Writing Skills in Children With Specific Learning Disabilities With and Without Developmental Coordination Disorder. *Motor Control*, 22(4), 391‑405.

Dinehart, L., & Manfra, L. (2013). Associations Between Low-Income Children's Fine Motor Skills in Preschool and Academic Performance in Second Grade. *Early Education and Development*, 24(2), 138‑161.

Douglas, S., & Willatts, P. (1994). The relationship between musical ability and literacy skills. *Journal of Research in Reading*, 17(2), 99‑107.

Doyen, A.-L., Lambert, E., Dumas, F., & Carlier, M. (2017). Manual performance as predictor of literacy acquisition : A study from kindergarten to Grade 1. *Cognitive Development*, 43, 80‑90.

Drijbooms, E., Groen, M. A., & Verhoeven, L. (2015). The contribution of executive functions to narrative writing in fourth grade children. *Reading and Writing*, 28(7), 989‑1011.

Drijbooms, E., Groen, M. A., & Verhoeven, L. (2017). How executive functions predict development in syntactic complexity of narrative writing in the upper elementary grades. *Reading and Writing*, 30(1), 209‑231.

Ehri, L. C. (2000). Learning to read and learning to spell : Two sides of a coin. *Topics in Language Disorders*, 20(3), 19‑36.

Ehri, L. C., & Wilce, L. S. (1985). Movement into Reading : Is the First Stage of Printed Word Learning Visual or Phonetic? *Reading Research Quarterly*, 20(2), 163.

Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & Psychophysics*, 16(1), 143‑149.

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.

Flaugnacco, E., Lopez, L., Terribili, C., Zoia, S., Buda, S., Tilli, S., Monasta, L., Montico, M., Sila, A., Ronfani, L., & Schön, D. (2014). Rhythm perception and production predict reading abilities in developmental dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8.

Follmer, D. J. (2018). Executive Function and Reading Comprehension : A Meta-Analytic Review. *Educational Psychologist*, 53(1), 42‑60.

Foy, J., & Mann, V. (2013). Executive function and early reading skills. Reading and Writing, 453–472.

Fraisse, P. (1974). *Psychologie du rythme*. FeniXX.

Fraisse, P. (1982). Rhythm and tempo. *The psychology of music*, *1*, 149-180.

Franceschini, S., Trevisan, P., Ronconi, L., Bertoni, S., Colmar, S., Double, K., Facoetti, A., & Gori, S. (2017). Action video games improve reading abilities and visual-to-auditory attentional shifting in English-speaking children with dyslexia. *Scientific Reports*, 7(1), 5863.

Frischen, U., Schwarzer, G., & Degé, F. (2019). Comparing the Effects of Rhythm-Based Music Training and Pitch-Based Music Training on Executive Functions in Preschoolers. *Frontiers in Integrative Neuroscience*, 13.

Frith, U. (1986). A developmental framework for developmental dyslexia. *Annals of Dyslexia*, 36(1), 67‑81.

Frost, J., Madsbjerg, S., Niedersøe, J., Olofsson, Å., & Sørensen, P. M. (2005). Semantic and phonological skills in predicting reading development : From 3–16 years of age. *Dyslexia*, 11(2), 79‑92.

Fujii, S., & Schlaug, G. (2013). The Harvard Beat Assessment Test (H-BAT) : A battery for assessing beat perception and production and their dissociation. *Frontiers in Human Neuroscience, 7.*

Gana, K., & Broc, G. (2018). *Introduction à la modélisation par équations structurales: manuel pratique avec lavaan*. ISTE Group.

Garvey, M. A., Ziemann, U., Bartko, J. J., Denckla, M. B., Barker, C. A., & Wassermann, E. M. (2003). Cortical correlates of neuromotor development in healthy children. *Clinical Neurophysiology*, *114*(9), 1662‑1670.

Geertsen, S. S., Thomas, R., Larsen, M. N., Dahn, I. M., Andersen, J. N., Krause-Jensen, M., Korup, V., Nielsen, C. M., Wienecke, J., Ritz, C., Krustrup, P., & Lundbye-Jensen, J. (2016). Motor Skills and Exercise Capacity Are Associated with Objective Measures of Cognitive Functions and Academic Performance in Preadolescent Children. *PLOS ONE*, *11*(8), e0161960.

Gel, Y., Miao, W., & Gastwirth, J. L. (2005). The Importance of Checking the Assumptions Underlying Statistical Analysis : Graphical Methods for Assessing Normality. *Jurimetrics*, 46, 3.

Georgiou, G. K., Das, J. P., & Hayward, D. V. (2008). Comparing the contribution of two tests of working memory to reading in relation to phonological awareness and rapid naming speed. *Journal of Research in Reading*, 31(3), 302‑318.

Gilger, J. W., & Kaplan, B. J. (2008). The concept of atypical brain development (ABD) as applied to developmental learning disorders. *Adult learning disorders: Contemporary issues*, 55-82.

Girard, C., Ecalle, J., & Magnan, A. (2013). Serious games as new educational tools : How effective are they? A meta-analysis of recent studies: Serious games as educational tools. *Journal of Computer Assisted Learning*, 29(3), 207‑219.

González-Trujillo, M. C., Defior, S., & Gutiérrez-Palma, N. (2014). The role of nonspeech rhythm in Spanish word reading. *Journal of Research in Reading*, 37(3), 316‑330.

Gooch, D., Snowling, M., & Hulme, C. (2011). Time perception, phonological skills and executive function in children with dyslexia and/or ADHD symptoms. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 52(2), 195‑203.

Goodway, J. D., Ozmun, J. C., & Gallahue, D. L. (2019). *Understanding motor development: Infants, children, adolescents, adults*. Jones & Bartlett Learning.

Gordon, R. L., Fehd, H. M., & McCandliss, B. D. (2015). Does Music Training Enhance Literacy Skills? A Meta-Analysis. *Frontiers in Psychology*, 6.

Gordon, R. L., Shivers, C. M., Wieland, E. A., Kotz, S. A., Yoder, P. J., & McAuley, J. D. (2015). Musical rhythm discrimination explains individual differences in grammar skills in children. *Developmental Science*, 18(4), 635‑644.

Goswami, U. (2011). A temporal sampling framework for developmental dyslexia. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(1), 3‑10.

Goswami, U. (2019). A neural oscillations perspective on phonological development and phonological processing in developmental dyslexia. *Language and Linguistics Compass*, 13(5), e12328.

Goswami, U., & Bryant, P. (2016). Phonological Skills and Learning to Read. Psychology Press & Routledge Classic Editions. *Psychology Press, Taylor & Francis Group*.

Goswami, U., Huss, M., Mead, N., Fosker, T., & Verney, J. P. (2013). Perception of patterns of musical beat distribution in phonological developmental dyslexia : Significant longitudinal relations with word reading and reading comprehension. *Cortex*, 49(5), 1363‑1376.

Goswami, U., Wang, H.-L. S., Cruz, A., Fosker, T., Mead, N., & Huss, M. (2010). Language-universal Sensory Deficits in Developmental Dyslexia : English, Spanish, and Chinese. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(2), 325‑337.

Gough, P. B., & Tunmer, W. E. (1986). Decoding, Reading, and Reading Disability. Remedial and Special Education, 7(1), 6‑10.

Gozli, D. G., Bavelier, D., & Pratt, J. (2014). The effect of action video game playing on sensorimotor learning : Evidence from a movement tracking task. *Human Movement Science*, 38, 152‑162.

Graham, S., & Santangelo, T. (2014). Does spelling instruction make students better spellers, readers, and writers? A meta-analytic review. *Reading and Writing*, 27(9), 1703‑1743.

Grahn, J. A. (2012). Neural Mechanisms of Rhythm Perception : Current Findings and Future Perspectives. *Topics in Cognitive Science*, 4(4), 585‑606.

Grahn, J. A., & Brett, M. (2007). Rhythm and Beat Perception in Motor Areas of the Brain. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(5), 893‑906.

Grahn, J. A., & Rowe, J. B. (2009). Feeling the Beat : Premotor and Striatal Interactions in Musicians and Nonmusicians during Beat Perception. *Journal of Neuroscience*, 29(23), 7540‑7548.

Grahn, J. A., & Schuit, D. (2012). Individual differences in rhythmic ability : Behavioral and neuroimaging investigations. *Psychomusicology: Music, Mind, and Brain*, 22(2), 105‑121.

Greenburg, J. E., Carlson, A. G., Kim, H., Curby, T. W., & Winsler, A. (2020). Early Visual-Spatial Integration Skills Predict Elementary School Achievement Among Low-Income, Ethnically Diverse Children. *Early Education and Development*, 31(2), 234‑252.

Griffith, J. L., Voloschin, P., Gibb, G. D., & Bailey, J. R. (1983). Differences in Eye-Hand Motor Coordination of Video-Game Users and Non-Users. *Perceptual and Motor Skills*, 57(1), 155‑158.

Grissmer, D., Grimm, K. J., Aiyer, S. M., Murrah, W. M., & Steele, J. S. (2010). Fine motor skills and early comprehension of the world : Two new school readiness indicators. *Developmental Psychology*, 46(5), 1008‑1017.

Grube, M., Cooper, F. E., Chinnery, P. F., & Griffiths, T. D. (2010). Dissociation of duration-based and beat-based auditory timing in cerebellar degeneration. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(25), 11597‑11601.

Habib, M., Lardy, C., Desiles, T., Commeiras, C., Chobert, J., & Besson, M. (2016). Music and Dyslexia : A New Musical Training Method to Improve Reading and Related Disorders. *Frontiers in Psychology*, 7.

Haft, S. L., Caballero, J. N., Tanaka, H., Zekelman, L., Cutting, L. E., Uchikoshi, Y., & Hoeft, F. (2019). Direct and indirect contributions of executive function to word decoding and reading comprehension in kindergarten. *Learning and Individual Differences*, 76, 101783.

Hammill, D. D., Pearson, N. A., Voress, J. K., & Frostig, M. (1993). *Developmental test of visual perception: DTVP-2*. Austin, TX: Pro-ed.

Hannon, E. E., & Trainor, L. J. (2007). Music acquisition : Effects of enculturation and formal training on development. *Trends in Cognitive Sciences*, 11(11), 466‑472.

Hansen, M., Wallentin, M., & Vuust, P. (2013). Working memory and musical competence of musicians and non-musicians. *Psychology of Music*, 41(6), 779‑793.

Hayes, J. R. (1996). A new framework for understanding cognition and affect in writing process. *The Sciences of Writing. Hillsdale, NJ: Lawrence Erlbaum Associates*, 3-30.

Hayes, J. R., & Flower, L. (1980). Identifying the Organization of Writing Processes. *Cognitive Processes in Writing. Hiilsdale. New Jersey: LEA*.

Henderson, S., & Sugden, D. (1992). *Movement ABC (Assessment Battery for Children)*. London: The Psychological Coop Ltd.

Holliman, A. J., Wood, C., & Sheehy, K. (2010). The contribution of sensitivity to speech rhythm and non-speech rhythm to early reading development. *Educational Psychology*, 30(3), 247‑267.

Hooper, S. R., Swartz, C. W., Wakely, M. B., de Kruif, R. E., & Montgomery, J. W. (2002). Executive functions in elementary school children with and without problems in written expression. *Journal of Learning Disabilities*, *35*(1), 57-68.

Houwen, S., van der Veer, G., Visser, J., & Cantell, M. (2017). The relationship between motor performance and parent-rated executive functioning in 3- to 5-year-old children : What is the role of confounding variables? *Human Movement Science*, 53, 24‑36.

Hoy, M. M. P., Egan, M. Y., & Feder, K. P. (2011). A Systematic Review of Interventions to Improve Handwriting. *Canadian Journal of Occupational Therapy*, 78(1), 13‑25.

Huau, A., Velay, J.-L., & Jover, M. (2015). Graphomotor skills in children with developmental coordination disorder (DCD) : Handwriting and learning a new letter. *Human Movement Science*, 42, 318‑332.

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.

Inserm (dir.). (2007). *Dyslexie, dysorthographie, dyscalculie : Bilan des données scientifiques*.

Ireland, K., Iyer, T. A., & Penhune, V. B. (2019). Contributions of age of start, cognitive abilities and practice to musical task performance in childhood. *PLOS ONE*, 14(4), e0216119.

Ivry, R. B., & Keele, S. W. (1989). Timing Functions of The Cerebellum. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 1(2), 136‑152.

Jacquier-Roux, M., Lequette, C., Pouget, G., Valdois, S., & Zorman, M. (2010). *Batterie analytique du langage écrit (BALE)*. Grenoble, France: Laboratoire Cogni-Sciences.

James, K. H., & Engelhardt, L. (2012). The effects of handwriting experience on functional brain development in pre-literate children. *Trends in Neuroscience and Education*, 1(1), 32‑42.

Jamshidifarsani, H., Garbaya, S., Lim, T., Blazevic, P., & Ritchie, J. M. (2019). Technology-based reading intervention programs for elementary grades : An analytical review. *Computers & Education*, 128, 427‑451.

Janzen, T., Haase, M., & Thaut, M. H. (2019). Rhythmic priming across effector systems : A randomized controlled trial with Parkinson's disease patients. *Human Movement Science*, 64, 355‑365.

Jaschke, A. C., Honing, H., & Scherder, E. J. A. (2018). Longitudinal Analysis of Music Education on Executive Functions in Primary School Children. *Frontiers in Neuroscience*, 12.

Jongmans, M. J., Smits-Engelsman, B. C. M., & Schoemaker, M. M. (2003). Consequences of Comorbidity of Developmental Coordination Disorders and Learning Disabilities for Severity and Pattern of Perceptual—Motor Dysfunction. *Journal of Learning Disabilities*, 36(6), 528‑537.

Jover, M., Ducrot, S., Huau, A., Bellocchi, S., Brun-Henin, F., & Mancini, J. (2013). Motor disorders in dyslexic children : A review and perspectives. *Enfance*, No 4(4), 323‑347.

Juel, C., Griffith, P. L., & Gough, P. B. (1986). Acquisition of literacy : A longitudinal study of children in first and second grade. *Journal of Educational Psychology*, 78(4), 243‑255.

Just, M. A., & Carpenter, P. A. (1992). A capacity theory of comprehension : Individual differences in working memory. *Psychological Review*, 99(1), 122‑149.

Kaiser, M. L., Schoemaker, M. M., Albaret, J. M., & Geuze, R. H. (2015). What is the evidence of impaired motor skills and motor control among children with attention deficit hyperactivity disorder (ADHD)? Systematic review of the literature. *Research in developmental disabilities*, *36*, 338-357.

Kaiser, Marie-Laure, Albaret, J.-M., & Doudin, P.-A. (2009). Relationship Between Visual-Motor Integration, Eye-Hand Coordination, and Quality of Handwriting. *Journal of Occupational Therapy, Schools, & Early Intervention, 2*(2), 87‑95.

Kandel, S., & Perret, C. (2015). How does the interaction between spelling and motor processes build up during writing acquisition? *Cognition, 136*, 325‑336.

Kaplan, B., Crawford, S., Cantell, M., Kooistra, L., & Dewey, D. (2006). Comorbidity, co-occurrence, continuum : What's in a name? *Child: Care, Health and Development, 32(6),* 723‑731.

Kaplan, B. J., Dewey, D. M., Crawford, S. G., & Wilson, B. N. (2001). The Term Comorbidity Is of Questionable Value in Reference to Developmental Disorders : Data and Theory. *Journal of Learning Disabilities, 34*(6), 555‑565.

Karlsdottir, R., & Stefansson, T. (2002). Problems in Developing Functional Handwriting. *Perceptual and Motor Skills, 94*(2), 623‑662.

Katzir, T., Kim, Y., Wolf, M., Kennedy, B., Lovett, M., & Morris, R. (2006). The Relationship of Spelling Recognition, RAN, and Phonological Awareness to Reading Skills in Older Poor Readers and Younger Reading-Matched Controls. *Reading and Writing, 19*(8), 845‑872.

Kazimoglu, C., & Bacon, L. (2020). An analysis of a video game on cognitive abilities: A study to enhance psychomotor skills via game-play. *IEEE Access*, *8*, 110495-110510.

Kellogg, R. T. (1996). A model of working memory in writing. In *The science of writing : Theories, methods, individual differences, and applications* (p. 57‑71). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.

Kellogg, R. T., Olive, T., & Piolat, A. (2007). Verbal, visual, and spatial working memory in written language production. *Acta Psychologica, 124*(3), 382‑397.

Kendeou, P., van den Broek, P., White, M. J., & Lynch, J. S. (2009). Predicting reading comprehension in early elementary school : The independent contributions of oral language and decoding skills. *Journal of Educational Psychology, 101*(4), 765‑778.

Kieffer, M. J., & Christodoulou, J. A. (2020). Automaticity and Control : How Do Executive Functions and Reading Fluency Interact in Predicting Reading Comprehension? *Reading Research Quarterly, 55*(1), 147‑166.

Kieffer, M. J., Vukovic, R. K., & Berry, D. (2013). Roles of Attention Shifting and Inhibitory Control in Fourth-Grade Reading Comprehension. *Reading Research Quarterly, 48*(4), 333‑348.

Kirby, J. R., Georgiou, G. K., Martinussen, R., & Parrila, R. (2010). Naming Speed and Reading : From Prediction to Instruction. *Reading Research Quarterly, 45*(3), 341‑362.

Kirby, J. R., Parrila, R. K., & Pfeiffer, S. L. (2003). Naming speed and phonological awareness as predictors of reading development. *Journal of Educational Psychology, 95*(3), 453‑464.

Kline, R. B. (2015). *Principles and practice of structural equation modeling*. Guilford publications.

Konoike, N., Kotozaki, Y., Jeong, H., Miyazaki, A., Sakaki, K., Shinada, T., Sugiura, M., Kawashima, R., & Nakamura, K. (2015). Temporal and Motor Representation of Rhythm in Fronto-Parietal Cortical Areas : An fMRI Study. *PloS One, 10*(6), e0130120.

Konoike, N., Kotozaki, Y., Miyachi, S., Miyauchi, C. M., Yomogida, Y., Akimoto, Y., Kuraoka, K., Sugiura, M., Kawashima, R., & Nakamura, K. (2012). Rhythm information represented in the fronto-parieto-cerebellar motor system. *NeuroImage, 63*(1), 328‑338.

Korkman, M., Kirk, U., & Kemp, S. (2012). NEPSY-II Bilan neuropsychologique de l'enfant 2nde édition. *ECPA,* Paris.

Kung, S.-J., Chen, J. L., Zatorre, R. J., & Penhune, V. B. (2013). Interacting Cortical and Basal Ganglia Networks Underlying Finding and Tapping to the Musical Beat. *Journal of Cognitive Neuroscience, 25*(3), 401‑420.

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*, e1528.

Larousse (2020). Définitions : Rythme - Dictionnaire de français Larousse. Consulté 2 septembre 2020, à l'adresse https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/rythme/70326

Lefavrais, P. (1968). La pipe et le rat. *L'évaluation du savoir-lire du cours préparatoire à l'enseignement supérieur et le facteur d'éducabilité PI. Issy-Les-Moulineaux., Edition et Application Psychologique, France*.

Leonard, H. C., Bernardi, M., Hill, E. L., & Henry, L. A. (2015). Executive Functioning, Motor Difficulties, and Developmental Coordination Disorder. *Developmental Neuropsychology, 40*(4), 201‑215.

Leong, V., & Goswami, U. (2014). Impaired extraction of speech rhythm from temporal modulation patterns in speech in developmental dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience, 8.*

Limpo, T., Alves, R. A., & Connelly, V. (2017). Examining the transcription-writing link : Effects of handwriting fluency and spelling accuracy on writing performance via planning and translating in middle grades. *Learning and Individual Differences, 53*, 26‑36.

Longcamp, M., Boucard, C., Gilhodes, J.-C., Anton, J.-L., Roth, M., Nazarian, B., & Velay, J.-L. (2008). Learning through Hand- or Typewriting Influences Visual Recognition of New Graphic Shapes : Behavioral and Functional Imaging Evidence. *Journal of Cognitive Neuroscience, 20(5)*, 802‑815.

Longcamp, M., Boucard, C., Gilhodes, J.-C., & Velay, J.-L. (2006). Remembering the orientation of newly learned characters depends on the associated writing knowledge : A comparison between handwriting and typing. *Human Movement Science, 25*(4), 646‑656.

Longcamp, M., Hlushchuk, Y., & Hari, R. (2011). What differs in visual recognition of handwritten vs. printed letters? An fMRI study. *Human Brain Mapping, 32*(8), 1250‑1259.

Longcamp, M., Zerbato-Poudou, M.-T., & Velay, J.-L. (2005). The influence of writing practice on letter recognition in preschool children : A comparison between handwriting and typing. *Acta Psychologica, 119*(1), 67‑79.

Lubin, A., Regrin, E., Boulc'h, L., Pacton, S., & Lanoë, C. (2016). Executive Functions Differentially Contribute to Fourth Graders' Mathematics, Reading, and Spelling Skills. *Journal of Cognitive Education and Psychology, 15*(3), 444‑463.

Lundetræ, K., & Thomson, J. M. (2018). Rhythm production at school entry as a predictor of poor reading and spelling at the end of first grade. *Reading and Writing, 31*(1), 215‑237.

MacArthur, C. A., Graham, S., & Fitzgerald, J. (Eds.). (2008). *Handbook of writing research*. Guilford Press.

Macdonald, K., Milne, N., Orr, R., & Pope, R. (2018). Relationships between Motor Proficiency and Academic Performance in Mathematics and Reading in School-Aged Children and Adolescents : A Systematic Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 15*(8),

MacDonald, M., Lipscomb, S., McClelland, M. M., Duncan, R., Becker, D., Anderson, K., & Kile, M. (2016). Relations of Preschoolers' Visual-Motor and Object Manipulation Skills With Executive Function and Social Behavior. *Research Quarterly for Exercise and Sport, 87*(4), 396‑407.

Manly, T., Robertson, I. H., Anderson, V., Nimmo-Smith, I., Lussier, F., & Flessas, J. (2006). Test d'Evaluation de l'Attention chez l'enfant (TEA-Ch). *Éditions du Centre de psychologie appliquée (ECPA)*.

Manning, F., & Schutz, M. (2013). "Moving to the beat" improves timing perception. *Psychonomic Bulletin & Review, 20*(6), 1133‑1139.

Marr, D., Cermak, S., Cohn, E. S., & Henderson, A. (2003). Fine Motor Activities in Head Start and Kindergarten Classrooms. *American Journal of Occupational Therapy, 57*(5), 550‑557.

Martinet, C., Valdois, S., & Fayol, M. (2004). Lexical orthographic knowledge develops from the beginning of literacy acquisition. *Cognition, 91*(2), B11‑B22.

Martínez-García, C., Afonso, O., Cuetos, F., & Suárez-Coalla, P. (2020). Handwriting production in Spanish children with dyslexia: spelling or motor difficulties?. *Reading and Writing*, 1-29.

Massonnié, J., Bianco, M., Lima, L., & Bressoux, P. (2019). Longitudinal predictors of reading comprehension in French at first grade : Unpacking the oral comprehension component of the simple view. *Learning and Instruction, 60*, 166‑179.

Maurer, M. N., & Roebers, C. M. (2019). Towards a better understanding of the association between motor skills and executive functions in 5- to 6-year-olds : The impact of motor task difficulty. *Human Movement Science, 66*, 607‑620.

Maziero, S., Tallet, J., Bellocchi, S., Jover, M., Chaix, Y., & Jucla, M. (2020). Influence of comorbidity on working memory profile in dyslexia and developmental coordination disorder. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*.

McCutchen, D. (1996). A capacity theory of writing : Working memory in composition. *Educational Psychology Review, 8*(3), 299‑325.

McDermott, J. M., Pérez-Edgar, K., & Fox, N. A. (2007). Variations of the flanker paradigm : Assessing selective attention in young children. *Behavior Research Methods, 39*(1), 62‑70.

McGlashan, H. L., Blanchard, C. C. V., Sycamore, N. J., Lee, R., French, B., & Holmes, N. P. (2017). Improvement in children's fine motor skills following a computerized typing intervention. *Human Movement Science, 56*, 29‑36.

McTigue, E. M., Solheim, O. J., Zimmer, W. K., & Uppstad, P. H. (2020). Critically Reviewing GraphoGame Across the World : Recommendations and Cautions for Research and Implementation of Computer-Assisted Instruction for Word-Reading Acquisition. *Reading Research Quarterly, 55*(1), 45‑73.

Melby-Lervåg, M., Lyster, S.-A. H., & Hulme, C. (2012). Phonological skills and their role in learning to read : A meta-analytic review. *Psychological Bulletin, 138*(2), 322‑352.

Mentiplay, B. F., FitzGerald, T. L., Clark, R. A., Bower, K. J., Denehy, L., & Spittle, A. J. (2019). Do video game interventions improve motor outcomes in children with developmental coordination disorder? A systematic review using the ICF framework. *BMC Pediatrics, 19*(1), 22.

Merchant, H., & de Lafuente, V. (2014). Introduction to the neurobiology of interval timing. *Advances in Experimental Medicine and Biology, 829*, 1‑13.

Michel, E., Molitor, S., & Schneider, W. (2019). Motor Coordination and Executive Functions as Early Predictors of Reading and Spelling Acquisition. *Developmental Neuropsychology, 44*(3), 282‑295.

Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex "Frontal Lobe" Tasks : A Latent Variable Analysis. *Cognitive Psychology, 41*(1), 49‑100.

Mody, M., Studdert-Kennedy, M., & Brady, S. (1997). Speech perception deficits in poor readers : Auditory processing or phonological coding? *Journal of Experimental Child Psychology, 64*(2), 199‑231.

Moll, K., Ramus, F., Bartling, J., Bruder, J., Kunze, S., Neuhoff, N., Streiftau, S., Lyytinen, H., Leppänen, P. H. T., Lohvansuu, K., Tóth, D., Honbolygó, F., Csépe, V., Bogliotti, C., Iannuzzi, S., Démonet, J.-F., Longeras, E., Valdois, S., George, F., … Landerl, K. (2014). Cognitive mechanisms underlying reading and spelling development in five European orthographies. *Learning and Instruction, 29*, 65‑77.

Mombarg, R., Jelsma, D., & Hartman, E. (2013). Effect of Wii-intervention on balance of children with poor motor performance. *Research in Developmental Disabilities, 34*(9), 2996‑3003.

Monette, S., Bigras, M., & Guay, M. C. (2011). The role of the executive functions in school achievement at the end of Grade 1. *Journal of experimental child psychology*, *109*(2), 158-173.

Monier, F., & Droit-Volet, S. (2019). Development of sensorimotor synchronization abilities: Motor and cognitive components. *Child Neuropsychology*, *25*(8), 1043-1062.

Moreno, S., Bialystok, E., Barac, R., Schellenberg, E. G., Cepeda, N. J., & Chau, T. (2011). Short-Term Music Training Enhances Verbal Intelligence and Executive Function. *Psychological Science, 22(11)*, 1425‑1433.

Morin-Moncet, O., Therrien-Blanchet, J.-M., Ferland, M. C., Théoret, H., & West, G. L. (2016). Action Video Game Playing Is Reflected In Enhanced Visuomotor Performance and Increased Corticospinal Excitability. *PLOS ONE, 11*(12), e0169013.

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.

Muneaux, M., Ziegler, J. C., Truc, C., Thomson, J., & Goswami, U. (2004). Deficits in beat perception and dyslexia : Evidence from French. *NeuroReport, 15*(8), 1255–1259.

Nazzi, T., Bertoncini, J., & Mehler, J. (1998). Language discrimination by newborns : Toward an understanding of the role of rhythm. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 24*(3), 756‑766.

Newcorn, J. H., Halperin, J. M., Jensen, P. S., Abikoff, H. B., Arnold, L. E., Cantwell, D. P., Conners, C. K., Elliott, G. R., Epstein, J. N., Greenhill, L. L., Hechtman, L., Hinshaw, S. P., Hoza, B., Kraemer, H. C., Pelham, W. E., Severe, J. B., Swanson, J. M., Wells, K. C., Wigal, T., & Vitiello, B. (2001). Symptom Profiles in Children With ADHD : Effects of Comorbidity and Gender. *Journal of the American Academy of Child & Adolescent Psychiatry, 40*(2), 137‑146.

Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (1994). Comparison of deficits in cognitive and motor skills among children with dyslexia. *Annals of Dyslexia, 44*(1), 147‑164.

Nicolson, R. I., & Fawcett, A. J. (2011). Dyslexia, dysgraphia, procedural learning and the cerebellum. *Cortex, 47*(1), 117‑127.

Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., Berry, E. L., Jenkins, I. H., Dean, P., & Brooks, D. J. (1999). Association of abnormal cerebellar activation with motor learning difficulties in dyslexic adults. *The Lancet, 353*(9165), 1662‑1667.

Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., & Dean, P. (1995). Time estimation deficits in developmental dyslexia : Evidence of cerebellar involvement. *Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences, 259*(1354), 43‑47.

Nicolson, R. I., Fawcett, A. J., & Dean, P. (2001). Developmental dyslexia : The cerebellar deficit hypothesis. *Trends in Neurosciences, 24*(9), 508‑511.

Oakhill, J., & Kyle, F. (2000). The Relation between Phonological Awareness and Working Memory. *Journal of Experimental Child Psychology, 75*(2), 152‑164.

Oberer, N., Gashaj, V., & Roebers, C. M. (2018). Executive functions, visual-motor coordination, physical fitness and academic achievement : Longitudinal relations in typically developing children. *Human Movement Science, 58*, 69‑79.

O'Hare, A., & Khalid, S. (2002). The association of abnormal cerebellar function in children with developmental coordination disorder and reading difficulties. *Dyslexia, 8*(4), 234‑248.

Olive, T., & Piolat, A. (2005). Le rôle de la mémoire de travail dans la production écrite de textes. *Psychologie Française, 50*(3), 373‑390.

Ouellette, G. (2010). Orthographic learning in learning to spell : The roles of semantics and type of practice. *Journal of Experimental Child Psychology, 107*(1), 50‑58.

Overy, K. (2000). Dyslexia, Temporal Processing and Music : The Potential of Music as an Early Learning Aid for Dyslexic Children. *Psychology of Music, 28*(2), 218‑229.

Ozernov-Palchik, O., Wolf, M., & Patel, A. D. (2018). Relationships between early literacy and nonlinguistic rhythmic processes in kindergarteners. *Journal of Experimental Child Psychology, 167*, 354‑368.

Pacton, S., Sobaco, A., Fayol, M., & Treiman, R. (2013). How does graphotactic knowledge influence children's learning of new spellings? *Frontiers in Psychology, 4*.

Palmis, S., Danna, J., Velay, J. L., & Longcamp, M. (2017). Motor control of handwriting in the developing brain: A review. *Cognitive Neuropsychology*, *34*(3-4), 187-204.

Patel, A. D. (2010). *Music, language, and the brain*. Oxford university press.

Patel, A. D. (2011). Why would Musical Training Benefit the Neural Encoding of Speech? The OPERA Hypothesis. *Frontiers in Psychology, 2.*

Patel, A. D. (2014). The Evolutionary Biology of Musical Rhythm : Was Darwin Wrong? *PLOS Biology, 12*(3), e1001821.

Patel, A. D., Iversen, J. R., Bregman, M. R., & Schulz, I. (2009). Experimental Evidence for Synchronization to a Musical Beat in a Nonhuman Animal. *Current Biology, 19*(10), 827‑830.

Patscheke, H., Degé, F., & Schwarzer, G. (2019). The effects of training in rhythm and pitch on phonological awareness in four- to six-year-old children. *Psychology of Music, 47*(3), 376‑391.

Peng, P., Barnes, M., Wang, C., Wang, W., Li, S., Swanson, H. L., Dardick, W., & Tao, S. (2018). A meta-analysis on the relation between reading and working memory. *Psychological Bulletin, 144*(1), 48‑76.

Perfetti, C. A., Rieben, L., & Fayol, M. (Eds.). (1997). *Learning to spell: Research, theory, and practice across languages*. Routledge.

Perfetti, C., & Stafura, J. (2014). Word Knowledge in a Theory of Reading Comprehension. *Scientific Studies of Reading, 18*(1), 22‑37.

Piper, B. J., Li, V., Eiwaz, M. A., Kobel, Y. V., Benice, T. S., Chu, A. M., Olsen, R. H. J., Rice, D. Z., Gray, H. M., & Mueller, S. T. (2012). Executive function on the Psychology Experiment Building Language tests. *Behavior Research Methods, 44*(1), 110‑123.

Pitchford, N. J., Papini, C., Outhwaite, L. A., & Gulliford, A. (2016). Fine Motor Skills Predict Maths Ability Better than They Predict Reading Ability in the Early Primary School Years. *Frontiers in Psychology, 7*.

Pitt, M. A., & Samuel, A. G. (1990). The use of rhythm in attending to speech. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 16*(3), 564‑573.

Pontart, V., Bidet-Ildei, C., Lambert, E., Morisset, P., Flouret, L., & Alamargot, D. (2013). Influence of handwriting skills during spelling in primary and lower secondary grades. *Frontiers in Psychology, 4*, 818.

Poon, K. W., Li-Tsang, C. W. P., Weiss, T. P. L., & Rosenblum, S. (2010). The effect of a computerized visual perception and visual-motor integration training program on improving Chinese handwriting of children with handwriting difficulties. *Research in Developmental Disabilities, 31*(6), 1552‑1560.

Potocki, A., Bouchafa, H., Magnan, A., & Ecalle, J. (2014). Évaluation de la compréhension écrite de récits chez l'enfant de 7 à 10ans : Vers des profils de compreneurs. *European Review of Applied Psychology, 64*(5), 229‑239.

Potocki, Anna, Sanchez, M., Ecalle, J., & Magnan, A. (2017). Linguistic and Cognitive Profiles of 8- to 15-Year-Old Children With Specific Reading Comprehension Difficulties : The Role of Executive Functions. *Journal of Learning Disabilities, 50*(2), 128‑142.

Pritchard, V. E., Malone, S. A., & Hulme, C. (2020). Early Handwriting Ability Predicts the Growth of Children's Spelling, but Not Reading, Skills. *Scientific Studies of Reading*, 1-15.

Prunty, M. M., Barnett, A. L., Wilmut, K., & Plumb, M. S. (2013). Handwriting speed in children with Developmental Coordination Disorder : Are they really slower? *Research in Developmental Disabilities, 34*(9), 2927‑2936.

Puyjarinet, F. (2018). Trouble du déficit de l'attention/hyperactivité avec ou sans troubles associés: mise en évidence de différences attentionnelles et exécutives. *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*, *66*(1), 13-21.

Puyjarinet, F., Bégel, V., Lopez, R., Dellacherie, D., & Bella, S. D. (2017). Children and adults with Attention-Deficit/Hyperactivity Disorder cannot move to the beat. *Scientific Reports, 7*(1), 1‑11.

Ramus, F. (2003). Developmental dyslexia : Specific phonological deficit or general sensorimotor dysfunction? *Current Opinion in Neurobiology, 13*(2), 212‑218.

Rapp, B. (2015). *Handbook of cognitive neuropsychology: What deficits reveal about the human mind*. Psychology Press.

Rapp, B., & Tainturier, Marie-Josèphe. (2001). The Spelling Process. In *Handbook of Cognitive Neuropsychology : What Deficits Reveal About the Human Mind*. Psychology Press.

Reitan, R. M. (1971). Trail Making Test Results for Normal and Brain-Damaged Children. *Perceptual and Motor Skills, 33*(2), 575‑581.

Repp, B. H., & Keller, P. E. (2004). Adaptation to tempo changes in sensorimotor synchronization : Effects of intention, attention, and awareness. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology Section A, 57*(3), 499‑521.

Richardson, U., & Lyytinen, H. (2014). The GraphoGame Method : The Theoretical and Methodological Background of the Technology-Enhanced Learning Environment for Learning to Read. *Human Technology: An Interdisciplinary Journal on Humans in ICT Environments, 10*(1), 39‑60.

Rigoli, D., Piek, J. P., Kane, R., & Oosterlaan, J. (2012). An examination of the relationship between motor coordination and executive functions in adolescents : Motor Coordination and Executive Functions. *Developmental Medicine & Child Neurology, 54*(11), 1025‑1031.

Riopel, M., Nenciovici, L., Potvin, P., Chastenay, P., Charland, P., Sarrasin, J. B., & Masson, S. (2019). Impact of serious games on science learning achievement compared with more conventional instruction : An overview and a meta-analysis. *Studies in Science Education, 55*(2), 169‑214.

Roche, R., Viswanathan, P., Clark, J. E., & Whitall, J. (2016). Children with developmental coordination disorder (DCD) can adapt to perceptible and subliminal rhythm changes but are more variable. *Human Movement Science, 50*, 19‑29.

Roebers, C. M., & Kauer, M. (2009). Motor and cognitive control in a normative sample of 7-year-olds. *Developmental Science, 12*(1), 175‑181.

Roebers, C. M., Röthlisberger, M., Neuenschwander, R., Cimeli, P., Michel, E., & Jäger, K. (2014). The relation between cognitive and motor performance and their relevance for children's transition to school : A latent variable approach. *Human Movement Science, 33*, 284‑297.

Roell, M., Viarouge, A., Houdé, O., & Borst, G. (2017). Inhibitory control and decimal number comparison in school-aged children. *PLOS ONE, 12*(11), e0188276.

Rosen, S., Carlyon, R. P., Darwin, C. J., & Russell, I. J. (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.

Rosenblum, S., & Livneh-Zirinski, M. (2008). Handwriting process and product characteristics of children diagnosed with developmental coordination disorder. *Human Movement Science, 27*(2), 200‑214.

Rosenblum, S., & Regev, N. (2013). Timing abilities among children with developmental coordination disorders (DCD) in comparison to children with typical development. *Research in Developmental Disabilities, 34*(1), 218‑227.

Roussey, J. Y., Piolat, A., & Guercin, F. (1990). Revising strategies for different text types. *Language and Education, 4*(1), 51‑65.

Rupp, M. A., McConnell, D. S., & Smither, J. A. (2019). Examining associations between action game play and motor control. *Acta Psychologica, 193*, 55‑65.

Rust, J., & Wechsler, D. (1996). *WOLD : Wechsler objective language dimensions*. London : Psychological Corporation.

Saito, S. (2001). The phonological loop and memory for rhythms : An individual differences approach. *Memory, 9*(4‑6), 313‑322.

Sakkal, A., & Martin, L. (2019). Learning to rock : The role of prior experience and explicit instruction on learning and transfer in a music videogame. *Computers & Education, 128*, 389‑397.

Sala, G., & Gobet, F. (2017a). Does far transfer exist? Negative evidence from chess, music, and working memory training. *Current directions in psychological science*, *26*(6), 515-520.

Sala, G., & Gobet, F. (2017b). When the music's over. Does music skill transfer to children's and young adolescents' cognitive and academic skills? A meta-analysis. *Educational Research Review, 20*, 55‑67.

Sala, G., Tatlidil, K. S., & Gobet, F. (2018). Video game training does not enhance cognitive ability : A comprehensive meta-analytic investigation. *Psychological Bulletin, 144*(2), 111‑139.

Santangelo, T., & Graham, S. (2016). A Comprehensive Meta-analysis of Handwriting Instruction. *Educational Psychology Review, 28*(2), 225‑265.

Saylors, R., & Trafimow, D. (2020). Why the Increasing Use of Complex Causal Models Is a Problem: On the Danger Sophisticated Theoretical Narratives Pose to Truth. *Organizational Research Methods*, 1094428119893452.

Scherer, R., Siddiq, F., & Tondeur, J. (2019). The technology acceptance model (TAM) : A meta-analytic structural equation modeling approach to explaining teachers' adoption of digital technology in education. *Computers & Education, 128*, 13‑35.

Schmidt, M., Egger, F., Benzing, V., Jäger, K., Conzelmann, A., Roebers, C. M., & Pesce, C. (2017). Disentangling the relationship between children's motor ability, executive function and academic achievement. *PLOS ONE, 12*(8), e0182845.

Shahar-Yames, D., & Share, D. L. (2008). Spelling as a self-teaching mechanism in orthographic learning. *Journal of Research in Reading, 31*(1), 22‑39.

Shallice, T. (1982). Specific impairments of planning. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, *298*(1089), 199-209.

Share, D. L. (1995). Phonological recoding and self-teaching: Sine qua non of reading acquisition. *Cognition*, *55*(2), 151-218.

Short, N., Best, S., Bhowmick, A., Brenner, D., Cundall, C., Farmer, M., Patel, M., & Ross, M. (2018). Impact of the DexteriaTM application use on visual–motor integration in elementary-age children. *Journal of Occupational Therapy, Schools, & Early Intervention, 11*(4), 364‑373.

Slater, J., Ashley, R., Tierney, A., & Kraus, N. (2017). Got Rhythm? Better Inhibitory Control Is Linked with More Consistent Drumming and Enhanced Neural Tracking of the Musical Beat in Adult Percussionists and Nonpercussionists. *Journal of Cognitive Neuroscience, 30*(1), 14‑24.

Slevc, L. R., Davey, N. S., Buschkuehl, M., & Jaeggi, S. M. (2016). Tuning the mind : Exploring the connections between musical ability and executive functions. *Cognition, 152*, 199‑211.

Snowling, M. J. (1995). Phonological processing and developmental dyslexia. *Journal of Research in Reading, 18*(2), 132‑138.

Son, S. H., & Meisels, S. J. (2006). The relationship of young children's motor skills to later reading and math achievement. *Merrill-Palmer Quarterly (1982-)*, 755-778.

Sowiński, J., & Dalla Bella, S. (2013). Poor synchronization to the beat may result from deficient auditory-motor mapping. *Neuropsychologia, 51*(10), 1952‑1963.

Sprenger-Charolles, L., Siegel, L. S., Béchennec, D., & Serniclaes, W. (2003). Development of phonological and orthographic processing in reading aloud, in silent reading, and in spelling : A four-year longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology, 84*(3), 194‑217.

St Clair-Thompson, H. L., & Gathercole, S. E. (2006). Executive functions and achievements in school : Shifting, updating, inhibition, and working memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 59*(4), 745‑759.

Stambak, M. (1951). Le problème du rythme dans le développement de l'enfant et dans les dyslexies d'évolution. *Enfance, 4*(5), 480‑502.

Stoodley, C. J., Fawcett, A. J., Nicolson, R. I., & Stein, J. F. (2006). Balancing and pointing tasks in dyslexic and control adults. *Dyslexia, 12*(4), 276‑288.

Straker, L., Howie, E., Smith, A., Jensen, L., Piek, J., & Campbell, A. (2015). A crossover randomised and controlled trial of the impact of active video games on motor coordination and perceptions of physical ability in children at risk of Developmental Coordination Disorder. *Human Movement Science, 42*, 146‑160.

Suggate, S. P. (2016). A Meta-Analysis of the Long-Term Effects of Phonemic Awareness, Phonics, Fluency, and Reading Comprehension Interventions. *Journal of Learning Disabilities, 49*(1), 77‑96.

Suggate, S., Pufke, E., & Stoeger, H. (2016). The effect of fine and grapho-motor skill demands on preschoolers' decoding skill. *Journal of Experimental Child Psychology, 141*, 34‑48.

Suggate, S., Pufke, E., & Stoeger, H. (2018). Do fine motor skills contribute to early reading development? *British Educational Research Journal*, 1‑19.

Suggate, S., Pufke, E., & Stoeger, H. (2019). Children's fine motor skills in kindergarten predict reading in grade 1. *Early Childhood Research Quarterly, 47*, 248‑258.

Sulik, M. J., Haft, S. L., & Obradović, J. (2018). Visual-Motor Integration, Executive Functions, and Academic Achievement : Concurrent and Longitudinal Relations in Late Elementary School. *Early Education and Development, 29*(7), 956‑970.

Sumner, E., Connelly, V., & Barnett, A. L. (2013). Children with dyslexia are slow writers because they pause more often and not because they are slow at handwriting execution. *Reading and Writing, 26*(6), 991‑1008.

Swanson, H. L., Xinhua Zheng, & Jerman, O. (2009). Working Memory, Short-Term Memory, and Reading Disabilities : A Selective Meta-Analysis of the Literature. *Journal of Learning Disabilities, 42*(3), 260‑287.

Tallal, P. (1980). Auditory temporal perception, phonics, and reading disabilities in children. *Brain and Language, 9*(2), 182‑198.

Tallal, P. (2004). Improving language and literacy is a matter of time. Nature Reviews *Neuroscience, 5*(9), 721‑728.

Teki, S., Grube, M., & Griffiths, T. D. (2012). A Unified Model of Time Perception Accounts for Duration-Based and Beat-Based Timing Mechanisms. *Frontiers in Integrative Neuroscience, 5.*

Thomson, J. M., Fryer, B., Maltby, J., & Goswami, U. (2006). Auditory and motor rhythm awareness in adults with dyslexia. *Journal of Research in Reading, 29*(3), 334‑348.

Thomson, J. M., & Goswami, U. (2008). Rhythmic processing in children with developmental dyslexia : Auditory and motor rhythms link to reading and spelling. *Journal of Physiology-Paris, 102*(1‑3), 120‑129.

Thomson, Jennifer M., Leong, V., & Goswami, U. (2013). Auditory processing interventions and developmental dyslexia : A comparison of phonemic and rhythmic approaches. *Reading and Writing, 26*(2), 139‑161.

Thomson, J. (2009). Auditory processing and developmental dyslexia: Throwing the baby out with the bathwater?. In *Contemporary perspectives on reading and spelling* (pp. 36-53). Routledge.

Tierney, A., & Kraus, N. (2014). Auditory-motor entrainment and phonological skills : Precise auditory timing hypothesis (PATH). *Frontiers in Human Neuroscience, 8.*

Tierney, A. T., & Kraus, N. (2013). The ability to tap to a beat relates to cognitive, linguistic, and perceptual skills. *Brain and Language, 124*(3), 225‑231.

Tiffin, J. (1968). Purdue Pegboard. Chicago. *Science Research Associates*.

Tiffin-Richards, M. C., Hasselhorn, M., Richards, M. L., Banaschewski, T., & Rothenberger, A. (2004). Time reproduction in finger tapping tasks by children with attention-deficit hyperactivity disorder and/or dyslexia. *Dyslexia, 10*(4), 299‑315.

Trainor, L. J., Chang, A., Cairney, J., & Li, Y.-C. (2018). Is auditory perceptual timing a core deficit of developmental coordination disorder? *Annals of the New York Academy of Sciences, 1423*(1), 30‑39.

Trainor, L. J., Shahin, A. J., & Roberts, L. E. (2009). Understanding the Benefits of Musical Training : Effects on Oscillatory Brain Activity. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1169*(1), 133‑142.

Treiman, R., & Bourassa, D. C. (2000). The development of spelling skill. *Topics in language disorders*, *20*(3), 1-18.

Van der Fels, I. M. J., te Wierike, S. C. M., Hartman, E., Elferink-Gemser, M. T., Smith, J., & Visscher, C. (2015). The relationship between motor skills and cognitive skills in 4–16 year old typically developing children : A systematic review. *Journal of Science and Medicine in Sport, 18*(6), 697‑703.

Van Dijk, T., & Kintsch, W. (1983). *Strategies of discourse comprehension*.

Varvara, P., Varuzza, C., Sorrentino, A. C. P., Vicari, S., & Menghini, D. (2014). Executive functions in developmental dyslexia. *Frontiers in Human Neuroscience, 8*.

Verhoeven, L., & Leeuwe, J. van. (2008). Prediction of the development of reading comprehension : A longitudinal study. *Applied Cognitive Psychology, 22*(3), 407‑423.

Vernadakis, N., Papastergiou, M., Zetou, E., & Antoniou, P. (2015). The impact of an exergame-based intervention on children's fundamental motor skills. *Computers & Education, 83*, 90‑102.

Volman, M. J. M., Schendel, B. M. van, & Jongmans, M. J. (2006). Handwriting Difficulties in Primary School Children : A Search for Underlying Mechanisms. *American Journal of Occupational Therapy, 60*(4), 451‑460.

Wang, P., Liu, H.-H., Zhu, X.-T., Meng, T., Li, H.-J., & Zuo, X.-N. (2016). Action Video Game Training for Healthy Adults : A Meta-Analytic Study. *Frontiers in Psychology, 7*.

Wechsler, D. (2016). *WISC-V - Échelle d'intelligence de Wechsler pour enfants et adolescents—5ème édition*. Paris : Editions du Centre de psychologie appliquée.

Wechsler, D., & Naglieri, J. (2009). *WNV - Échelle non verbale d'intelligence de Wechsler*. Paris : Editions du Centre de psychologie appliquée.

Weintraub, N., & Graham, S. (2000). The Contribution of Gender, Orthographic, Finger Function, and Visual-Motor Processes to the Prediction of Handwriting Status. *The Occupational Therapy Journal of Research, 20*(2), 121‑140.

Whitall, J., Chang, T.-Y., Horn, C. L., Jung-Potter, J., McMenamin, S., Wilms-Floet, A., & Clark, J. E. (2008). Auditory-motor coupling of bilateral finger tapping in children with and without DCD compared to adults. *Human Movement Science, 27*(6), 914‑931.

Wilson, P., Green, D., Caeyenberghs, K., Steenbergen, B., & Duckworth, J. (2016). Integrating New Technologies into the Treatment of CP and DCD. *Current Developmental Disorders Reports, 3*(2), 138‑151.

Wilson, P. H., Ruddock, S., Smits-Engelsman, B., Polatajko, H., & Blank, R. (2013). Understanding performance deficits in developmental coordination disorder : A meta-analysis of recent research: Review. *Developmental Medicine & Child Neurology, 55*(3), 217‑228.

Wolff, P. H. (2002). Timing precision and rhythm in developmental dyslexia. *Reading and Writing, 15*(1), 179‑206.

Wood, C., Wade-Woolley, L., & Holliman, A. J. (2009). Phonological awareness: Beyond phonemes. In *Contemporary perspectives on reading and spelling* (pp. 19-35). Routledge.

Wouters, P., van Nimwegen, C., van Oostendorp, H., & van der Spek, E. D. (2013). A meta-analysis of the cognitive and motivational effects of serious games. *Journal of Educational Psychology*, 105(2),

Xue, Y., Yang, Y., & Huang, T. (2019). Effects of chronic exercise interventions on executive function among children and adolescents : A systematic review with meta-analysis. *British Journal of Sports Medicine, 53*(22), 1397‑1404.

Zhang, J., Meng, Y., Wu, C., & Zhou, D. Q. (2017). Writing System Modulates the Association between Sensitivity to Acoustic Cues in Music and Reading Ability : Evidence from Chinese–English Bilingual Children. *Frontiers in Psychology, 8.*

Zhonggen, Y. (2019). A meta-analysis of use of serious games in education over a decade. *International Journal of Computer Games Technology*, *2019*.

Ziegler, J. C., Bertrand, D., Tóth, D., Csépe, V., Reis, A., Faísca, L., Saine, N., Lyytinen, H., Vaessen, A., & Blomert, L. (2010). Orthographic Depth and Its Impact on Universal Predictors of Reading : A Cross-Language Investigation. *Psychological Science, 21*(4), 551‑559.

Ziegler, J. C., & Goswami, U. (2005). Reading Acquisition, Developmental Dyslexia, and Skilled Reading Across Languages : A Psycholinguistic Grain Size Theory. *Psychological Bulletin, 131*(1), 3‑29.

TABLE DES FIGURES ET TABLEAUX

Figure 1: (a) Hypothèse d'un processus commun sous-tendant les relations entre les habiletés motrices et le développement cognitif. (b) Hypothèse d'une influence des habiletés motrices sur le développement des fonctions exécutives..... 36

Figure 2 : Amplitude de l'enveloppe temporelle de la parole et montée d'amplitude au niveau de la syllabe, extrait de Leong et Goswami (2014). 60

Figure 3 : Relations attendues entre les habiletés motrices, les deux médiateurs potentiels (fonctions exécutives et écriture manuscrite) et le langage écrit.. 74

Figure 4 : Présentation des différents modèles de médiation testés pour expliquer la relation entre habiletés motrices et langage écrit..... 83

Figure 5 : Modèle de médiation final avec la motricité comme prédicteur, les fonctions exécutives et l'écriture manuscrite comme médiateurs et les différentes composantes du langage écrit comme variables prédites. 86

Figure 6 : Différentes hypothèses dissociant les compétences de motricité fine. (a) Hypothèse de médiation formulée par Suggate et al. (2016). (b) Hypothèse alternative formulée sur la base des travaux de Weintraub & Graham (2000) 92

Figure 7: Relations attendues entre les habiletés rythmiques, les deux médiateurs potentiels (fonctions exécutives et habiletés phonologiques) et le langage écrit. 113

Figure 8 : Présentation des différents modèles de médiations testés pour expliquer la relation entre habiletés rythmiques et langage écrit 120

Figure 9 : Modèle de médiation final avec les habiletés rythmiques comme prédicteur, les fonctions exécutives comme médiateur et les différentes composantes du langage écrit comme variable prédite..... 123

Figure 10 : Différentes hypothèses dissociant les différentes habiletés temporelles. (a) Distinction du traitement de la régularité et le traitement de la durée (b) Distinction des versants productif et perceptif..... 129

Figure 11 : Différents modèles de médiation intégrant les habiletés motrices et rythmiques comme prédicteur, les fonctions exécutives comme médiateur et le langage écrit comme variable prédite. 141

Figure 12 : Modèle de médiation final intégrant les habiletés rythmiques et motrices comme prédicteurs, les fonctions exécutives comme médiateur et le langage écrit comme variable prédite 142

Figure 13 : Nombre de participants présentant un trouble de l'apprentissage du langage écrit associé ou non à des difficultés motrices et/ou rythmiques. 158

Figure 14 : (a) Capture d'écran des premières versions des activités du jeu avant l'habillage. (b) Capture d'écran des mêmes activités après habillage. 173

Figure 15 : Capture d'écran des éléments de ludification du jeu 173
Figure 16: Capture d'écran de l'activité "River" 174
Figure 17: Capture d'écran de l'activité "Twister" 175
Figure 18 : Capture d'écran de l'activité "Trace" 175
Figure 19 : Effet de l'entraînement sur le temps d'exécution des séquences motrices de la NEPSY chez les élèves sans difficultés d'apprentissage. 179
Figure 20 : Effet de l'entraînement sur le niveau d'orthographe chez les élèves sans difficultés d'apprentissage. 180
Figure 21 : Modèle de médiation final de l'étude 1.1. Le modèle présente les relations entre les habiletés motrices et différentes dimensions du langage écrit au travers de deux médiateurs : les fonctions exécutives et l'écriture manuscrite 196
Figure 22 : Modèle de médiation final de l'étude 2.1. Le modèle présente les relations entre les habiletés rythmiques et différentes dimensions du langage écrit au travers de deux médiateurs : les fonctions exécutives et les habiletés phonologiques 197
Figure 23 : Modèle de médiation final de l'étude 3. Le modèle présente les relations entre les habiletés motrices et rythmiques et le langage écrit au travers d'un médiateur : les fonctions exécutives. 197
Figure 24 : Modèle représentant sous-tendant l'effet des habiletés motrices sur l'apprentissage du langage écrit via l'écriture manuscrite. La relation entre motricité et écriture manuscrite est présentée en gras 202
Figure 25 : Modèles représentant l'effet des habiletés motrices (à gauche) et des habiletés rythmiques (à droite) sur l'apprentissage du langage écrit via les fonctions exécutives. La relation entre les habiletés motrices/rythmiques et les fonctions exécutives est présentée en gras 204
Figure 26 : Performances obtenues par les deux sous-groupes d'élèves avec un trouble des apprentissages (habiletés motrices élevées vs faibles) sur une tâche d'orthographe de mots irréguliers 257
Figure 27 : Performances obtenues par les deux sous-groupes d'élèves avec un trouble des apprentissages (habiletés rythmiques élevées vs faibles) sur une tâche d'orthographe de mots réguliers 258
Figure 28 : Performances obtenues par les deux sous-groupes d'élèves avec un trouble des apprentissages (habiletés rythmiques élevées vs faibles) sur une tâche de flexibilité mentale 258
Figure 29 : Tâche de copie de figures utilisée pour mesurer les habiletés graphomotrices dans l'étude 5 259

Tableau 1 : Statistiques descriptives (moyenne, écart-types, minimum et maximum) des mesures de langage écrit, des habiletés motrices, des fonctions exécutives et de l'écriture manuscrite de l'étude 1.1 80

Tableau 2 : Corrélations entre les mesures motrices et du langage écrit 81

Tableau 3 : Indicateurs d'ajustement des différents modèles testés pour expliquer la relation entre habiletés motrices et langage écrit. Les modèles représentant correctement les données (i.e. CFI ≥.90, RMSEA ≤.06, SRMR ≤ .09) sont indiqués en gras. 84

Tableau 4 : Statistiques descriptives des mesures réalisée en T1 (N = 40) 97

Tableau 5 : Statistiques descriptives des mesures réalisées en T2 (N = 32) 97

Tableau 6 : Corrélations entre les différentes variables motrices et l'écriture manuscrite 99

Tableau 7 : Corrélations entre les différentes variables motrices et cognitives et les mesures du langage écrit 100

Tableau 8 : Analyses de régressions multiples prédisant les scores de langage écrit 101

Tableau 9 : Statistiques descriptives (moyenne, écart-types, minimum et maximum) des mesures de langage écrit, des habiletés rythmiques, des fonctions exécutives et des habiletés phonologiques de l'étude 2.1. 117

Tableau 10 : Corrélations entre les habiletés rythmiques et de langage écrit 118

Tableau 11 : Indicateurs d'ajustement des différents modèles de médiations testés pour expliquer la relation entre habiletés rythmiques et le langage écrit. Les modèles représentant correctement les données (i.e. CFI ≥.90, RMSEA ≤.06, SRMR ≤ .09) sont indiqués en gras. 121

Tableau 12 : Statistiques descriptives (moyenne, écart-types, minimum et maximum) des mesures des habiletés rythmiques et du langage écrit de l'étude 2.2 131

Tableau 13 : Corrélations entre les différentes habiletés rythmiques et les mesures du langage écrit 132

Tableau 14 : Corrélations entre les habiletés motrices et rythmiques 139

Tableau 15 : Indicateurs d'ajustement des différents modèles de l'étude 3. Les modèles représentant correctement les données (i.e. CFI ≥.90, RMSEA ≤.06, SRMR ≤ .09) sont indiqués en gras. 141

Tableau 16 : Caractéristiques des deux groupes d'élèves avec un trouble des apprentissages ou sans trouble (i.e. groupe contrôle apparié) 153

Tableau 17 : Caractéristiques des élèves avec un trouble des apprentissages divisant en deux sous-groupes sur la base de leurs habiletés motrices 155

Tableau 18 : Caractéristiques des élèves avec un trouble des apprentissages divisant en deux sous-groupes sur la base de leurs habiletés rythmiques 157

Tableau 19 : Caractéristiques des différents groupes de l'étude interventionnelle 169

Tableau 20 : Scores en pré-tests des différents groupes de l'étude interventionnelle 178

Tableau 21 : Matrice de corrélation entre l'amélioration en orthographe du pré-test au posttest et les compétences motrices (amélioration motrice et niveau initial) 183

Tableau 22 : Liste des tâches utilisées en fonctions des études..... 251

Tableau 23 : Corrélations entre les variables motrices et les mesures du langage écrit, des fonctions exécutives et d'écriture manuscrite..... 252

Tableau 24 : Corrélations entre les variables rythmiques et les mesures du langage écrit, des fonctions exécutives et des habiletés phonologiques..... 253

Tableau 25 : Corrélations entre les mesures du langage écrit et les médiateurs potentiels (fonctions exécutives, habiletés phonologiques et écriture manuscrite)..... 254

Tableau 26 : Caractéristiques des deux groupes d'élèves avec un trouble des apprentissages ou sans trouble (i.e. groupe contrôle apparié) 255

Tableau 27: Caractéristiques des deux groupes d'élèves avec un trouble des apprentissages ou sans trouble (i.e. groupe contrôle apparié) 256

ANNEXES

Annexe 1 : Protocole utilisé pour les études en modélisation par équations structurales

Trois des études présentées dans la thèse (Etude 1.1., p.73, Etude 2.1., p.112 et Etude 3, p.138) renvoient en réalité à une seule et même étude qui ont a été divisée en sous questions et ont donc mené à des analyses distinctes. La liste complète des différentes tâches utilisées peut être retrouvée ci-dessous. Le Tableau 22 synthétise les tests ayant été utilisés dans chacune des études.

SESSION COLLECTIVE (1H)

- **Orthographe de mots -** BALE (Jacquier-Roux et al., 2010).
  Description de la tâche : dictée de listes de mots réguliers, irréguliers et pseudo-mots
- **Compréhension de la lecture -** tâche développée par Potocki et al. (2014).
  Description de la tâche : lecture d'un texte et réponse à des questions de compréhension
- **Rédaction** - tâche de la WOLD (Rust & Wechsler, 1996).
  Description de la tâche : rédiger un texte répondant à la consigne suivante « Décris la maison de tes rêves avec le plus de détails possibles. »

SESSION INDIVIDUELLE 1 (45 MINUTES)

- **Planification -** Tour de Londres (Piper et al., 2012; Shallice et al., 1982)
  Description de la tâche : résolution de douze problèmes de planification (déplacement des billes à partir d'une configuration donnée pour arriver à une configuration cible en un nombre de déplacement limité).
- **Dextérité unimanuelle -** « Placer les chevilles » M-ABC (Henderson & Sugden, 1992)
  Description de la tâche : placer des pions le plus vite possible sur une planche en bois (temps en seconde).
- **Lecture de mots -** BALE (Jacquier-Roux et al., 2010)
  Description de la tâche : lecture de listes de mots réguliers, irréguliers et pseudo-mots.
- **Mémoire de travail phonologique -** « Séquence Lettre-Chiffres »**,** WISC-V (Wechsler, 2016).
  Description de la tâche : rappeler une séquence de chiffres et de lettres en classant les chiffres dans l'ordre puis les lettres – dans l'ordre alphabétique
- **Habiletés rythmiques** - Wolff (2002)
  Description de la tâche : Synchronisation sensori-motrice à un métronome et poursuite de rythme
- **Flexibilité mentale -** Trail Making Test (TMT) (Reitan, 1971)
  Description de la tâche : relier les points de 1 à 25 (condition A) puis relier les chiffres de 1 à 13 et les lettres de A à L en alternant entre un chiffre et une lettre.

SESSION INDIVIDUELLE 2 (45 MINUTES)

- **Flexibilité mentale -** « Petits Hommes Verts », TEA-Ch (Manly et al., 2006)
  Description de la tâche : compter des créatures à l'endroit ou à rebours en tenant compte du sens des flèches qui indiquent le sens de comptage.
- **Coordination bimanuelle -** « Enfiler le Lacet » M-ABC (Henderson & Sugden, 1992)
  Description de la tâche : enfiler un lacet dans une planchette le plus vite possible.
- **Conscience phonologique -** BALE (Jacquier-Roux et al., 2010)
  Description de la tâche : suppression de phonème initial/final.
- **Inhibition -** NEPSY-II (Korkman et al., 2012)
  Description de la tâche : Donner le nom correct ou le nom inverse d'une forme (carré ou rond) en fonction de la couleur de la forme le plus vite possible.
- **Dénomination rapide -** BALE (Jacquier-Roux et al., 2010)
  Description de la tâche : nommer 25 images le plus vite possible.
- **Coordination bimanuelle -** « Tracé de la Fleur » M-ABC (Henderson & Sugden, 1992)
  Description de la tâche : tracer entre deux lignes le plus précisément possible
- **Mémoire de travail visuo-spatiale -** WNV (Wechsler & Naglieri, 2009)
  Description de la tâche : reproduire une séquence de cubes touchés par l'expérimentateur dans le même ordre ou l'ordre inverse.
- **Automatisation de l'écriture manuscrite** - tâche de l'alphabet (Berninger et al., 1992)
  Description de la tâche : écrire les lettres de l'alphabet dans l'ordre le plus rapidement et le plus précisément possible pendant 30 secondes.

Tableau 22 : Liste des tâches utilisées en fonctions des études

	Etude 1.1.	Etude 2.1.	Etude 3
Lecture de mots	X	X	X
Orthographe de mots	X	X	X
Compréhension écrite	X	X	X
Rédaction	X	X	X
Dextérité unimanuelle	X		X
Coordination bimanuelle	X		X
Contrôle visuo-moteur	X		X
Habiletés rythmiques		X	X
Conscience phonologique		X	
Dénomination rapide		X	
Ecriture manuscrite	X		
Mémoire de travail phonologique	X	X	X
Mémoire de travail visuo-spatiale	X	X	X
Inhibition	X	X	X
Flexibilité – TMT	X	X	X
Flexibilité – Petits hommes verts	X	X	X
Planification	X	X	X

Annexe 2 : Corrélations entre les habiletés motrices et rythmiques et les médiateurs

Tableau 23 : Corrélations entre les variables motrices et les mesures du langage écrit, des fonctions exécutives et d'écriture manuscrite

	Dextérité manuelle MD (s.)	Dextérité manuelle MND (s.)	Coordination bimanuelle (s.)	Contrôle VM (erreurs)
Langage écrit				
Lecture de mots réguliers (/20)	-.09	**-.14***	**-.15***	-.08
Lecture de mots irréguliers (/20)	-.11#	**-.14***	**-.20****	**-.19***
Lecture de pseudo-mots (/20)	-.08	-.13#	-.06	**-.14***
Orthographe de mots réguliers (/10)	-.12#	**-.20****	-.09	-.12#
Orthographe de mots irréguliers (/10)	-.08	-.08	**-.16***	**-.14***
Orthographe de pseudo-mots (/10)	-.02	-.08	-.09	-.10
Compréhension écrite (score /12)	-.13#	-.12#	-.07	-.12#
Rédaction (score /10)	-.10	-.13#	-.12#	**-.14***
Fonctions exécutives				
Mémoire de travail visuo-spatiale (/32)	**- .17****	**-.18****	**-.25*****	-.07
Mémoire de travail verbale (/30)[30]	- .06	- .09	-.04	-.02
Inhibition (a) (différence des temps entre les conditions en s.)	.09	**.16***	-.02	.02
Inhibition (b) (différence des temps entre les conditions en s.)	.004	.10	**.14***	-.007
Flexibilité (a) : TMT (différence des temps entre les conditions en s.)	.09	**.20****	**.20****	.02
Flexibilité (b) : TeaCh (score/temps)	**.16***	**.20****	.09	-.04
Planification (/46)	- .09	- .09	- .12#	-.05
Ecriture manuscrite				
Tâche de l'alphabet	**- .24*****	**- .17****	**- .24*****	**-.15***

*** $p < .001$; ** $p < .01$; * $p < .05$; # $p < .10$.

[30] Soulignons que la mémoire de travail verbale est également une habileté phonologique. Cependant, elle a été incluse comme mesure des fonctions exécutives dans les études de la thèse.

Tableau 24: Corrélations entre les variables rythmiques et les mesures du langage écrit, des fonctions exécutives et des habiletés phonologiques

	Précision de la synchronisation (ms)	Variabilité de la synchronisation (ms)
Langage écrit	**-.16***	**-.16***
Lecture de mots réguliers (/20)	-.06	**-16***
Lecture de mots irréguliers (/20)	-.07	-.06
Lecture de pseudo-mots (/20)	**-.16***	-.10
Orthographe de mots réguliers (/10)	-.12#	**-.13***
Orthographe de mots irréguliers (/10)	**-.18****	**-.15***
Orthographe de pseudo-mots (/10)	-.11	-.12#
Compréhension écrite (score /12)	**-.18****	-.13#
Rédaction (score /10)		
Fonctions exécutives		
Mémoire de travail visuo-spatiale (/32)[31]	-.10	-.08
Mémoire de travail verbale (/30)	**-.13***	-.12#
Inhibition (a) (différence des temps entre les conditions)	.10	.03
Inhibition (b) (différence des temps entre les conditions)	.09	-.01
Flexibilité (a) : TMT (différence des temps entre les conditions)	.05	.03
Flexibilité (b) : TeaCh (score/temps)	.05	**.15***
Planification (/46)	-.12#	-.02
Habiletés phonologiques		
Conscience phonologique (score /20)	-.018	.05
Dénomination rapide (.s)	-.004	.11

** $p < .01$; * $p < .05$; # $p < .10$.

[31] Soulignons que la mémoire de travail verbale est également une habileté phonologique. Cependant, elle a été incluse comme mesure des fonctions exécutives dans les études de la thèse.

Tableau 25 : Corrélations entre les mesures du langage écrit et les médiateurs potentiels (fonctions exécutives, habiletés phonologiques et écriture manuscrite)

	Lecture MR (/20)	Lecture MI (/20)	Lecture PM (/20)	Orthographe MR (/10)	Orthographe MI (/10)	Orthographe PM (/10)	Compréhension écrite (12)	Réddaction (/10)
Fonctions exécutives								
Mémoire de travail visuo-spatiale (/32)	.03	.09	.11	**.19****	**.16***	.03	**.20****	.12#
Mémoire de travail verbale (/30)[32]	**.30*****	**.34*****	**.24*****	**.26*****	**.18****	**.33*****	**.34*****	**.34*****
Inhibition (a) (différence des temps entre conditions)	**-.13***	-.05	-.08	-.09	-.06	-.03	-.01	.05
Inhibition (b) (différence des temps entre conditions)	-.08	-.04	-.08	-.05	-.02	.00	.02	.08
Flexibilité (a) : TMT (différence des temps entre conditions)	**-.18****	**-.16***	**-.15***	**-.17***	**-.17***	**-.16***	-.11	-.09
Flexibilité (b) : TeaCh (score/temps)	**-.23*****	**-.18****	**-.17***	**-.16***	**-.14***	-.10	**-.21****	**-.14***
Planification (/46)	-.01	-.02	.10	-.03	-.02	.01	.07	.02
Habiletés phonologiques								
Conscience phonologique (score /20)	**.17***	**.20****	**.24*****	**.14***	.10	**.14***	**.16***	**.21****
Dénomination rapide (.s)	-.03	**-.21****	-.01	**-.13***	-.06	-.07	.01	.01
Ecriture manuscrite								
Tâche de l'alphabet	**.33*****	**.43*****	**.19****	**.41*****	**.41*****	**.28****	**.23*****	**.35*****

[32] Soulignons que la mémoire de travail verbale est également une habileté phonologique. Cependant, elle a été incluse comme mesure des fonctions exécutives dans les études de la thèse.

Annexe 3 : Différences obtenues entre les groupes d'élèves et sans trouble de l'apprentissage du langage écrit sur l'ensemble des variables

Tableau 26: Caractéristiques des deux groupes d'élèves avec un trouble des apprentissages ou sans trouble (i.e. groupe contrôle apparié)

	Contrôle	**Trouble des apprentissages**	***t***	***U***	***p*-value**
N	32	32			
Sex Ratio (F/G)[1]	17/15	17/15			
Âge moyen[1]	8 ans 5 mois (4 mois)	8 ans 5 mois (3 mois)			
QI non verbal[1]	98,81 (10,71)	98,22 (10,66)			
Langage écrit					
Score z lecture de mots [2]	-0,03 (0,47)	-2,20 (1,15)		32,00	<.001***
Score z orthographe de mots[2]	-0,21 (0,55)	-2,70 (0,80)		0,00	<.001***
Compréhension écrite /12	9,34 (2,01)	6,17 (2,53)	5,49		<.001***
Rédaction	5,42 (1,14)	4,18 (1,02)	3,52		<.001***
Motricité fine					
Dextérité de la main dominante (s.)	23,94 (3,56)	24,53 (4,25)	-0,61		.55
Dextérité de la main non dominante (s.)	26,59 (4,30)	26,88 (3,99)	-0,27		.79
Coordination bimanuelle (s.)	31,23 (10,79)	30,72 (10,21)		454,50	.67
Contrôle visuo-moteur (erreurs)	2,35 (2,23)	3,03 (1,92)		361,00	.13
Habiletés rythmiques					
Précision moyenne de la synchronisation (ms)	35,20 (16,80)	62,98 (40,40)		281,00	.008**
Précision de la synchronisation – 15 Hz (ms)	41,74 (36,07)	85,01 (82,71)		339,00	.07#
Précision de la synchronisation – 20 Hz (ms)	27,80 (22,79)	47,16 (42,94)		330,00	.05*
Précision de la synchronisation – 25 Hz (ms)	36,08 (33,31)	56,77 (44,52)		339,00	.07#
Variabilité moyenne de la synchronisation (ms)	73,32 (32,74)	85,00 (46,20)		421,00	.54
Variabilité de la synchronisation – 15 Hz (ms)	87,10 (50,97)	105,39 (79,97)		442,00	.76
Variabilité de la synchronisation – 20 Hz (ms)	62,25 (33,29)	70,19 (66,26)		417,00	.50
Variabilité de la synchronisation – 25 Hz (ms)	70,59 (40,56)	81,63 (66,26)		454,00	.87
Anticipation moyenne du stimulus (ms)	-5,68 (30,95)	-40,28 (51,07)		269,00	.005**
Anticipation – 15 Hz (ms)	-23,82 (47,10)	-70,45 (95,20)		373,00	.19
Anticipation – 20 Hz (ms)	-6,91 (34,39)	-36,38 (48,76)		277,00	.007**
Anticipation – 25 Hz (ms)	13,69 (43,84)	-14,02 (69,42)		343,00	.08#

*** p <.001 ; ** p <.01 ; * p <.05 ; # p <.10

[1] Variables sur lesquelles les groupes ont été appariés

[2] Variables sur lesquels les groupes ont été constitués

Tableau 27: Caractéristiques des deux groupes d'élèves avec un trouble des apprentissages ou sans trouble (i.e. groupe contrôle apparié)

	Contrôle	Trouble des apprentissages	*t*	*U*	*p*-value
Fonctions exécutives					
Mémoire de travail visuo-spatiale (/32)	10,97 (3,18)	11,22 (2,77)	-0,33		.74
Mémoire de travail verbale (/30)	14,31 (3,51)	11,25 (4,00)		281,00	.002**
Inhibition (a) (différence des temps entre conditions)	12,69 (8,87)	10,35 (6,31)		434,50	.40
Inhibition (b) (différence des temps entre conditions)	33,34 (11,39)	36,66 (9,85)	-1,21		.14
Flexibilité (a) : TMT (différence des temps entre conditions)	110,79 (51,47)	92,15 (37,08)	-0,55		.59
Flexibilité (b) : TeaCh (score/temps)	5,92 (1,33)	6,17 (2,07)	1,55		.13
Planification (/46)	18,81 (7,52)	20,13 (6,43)	-0,75		.46
Habiletés phonologiques					
Conscience phonologique (score /20)	13,34 (4,43)	10,00 (5,08)		321,00	.007**
Dénomination rapide (.s)	26,69 (5,85)	29,03 (6,79)	-1,48		.14
Ecriture manuscrite					
Tâche de l'alphabet	12,88 (3,63)	9,78 (2,85)		252,00	<.001***

*** p <.001 ; ** p <.01 ; * p <.05 ; # p <.10

Annexe 4 : Graphiques représentant les performances obtenues par les différents sous-groupes d'élèves présentant un trouble des apprentissages avec ou sans difficultés rythmiques associées

Les graphiques ci-dessous représentent les performances obtenues par les différents sous-groupes sur les différentes mesures où une différence significative entre les sous-groupes a été rapportée.

1) Sous-groupes basés sur le niveau de motricité

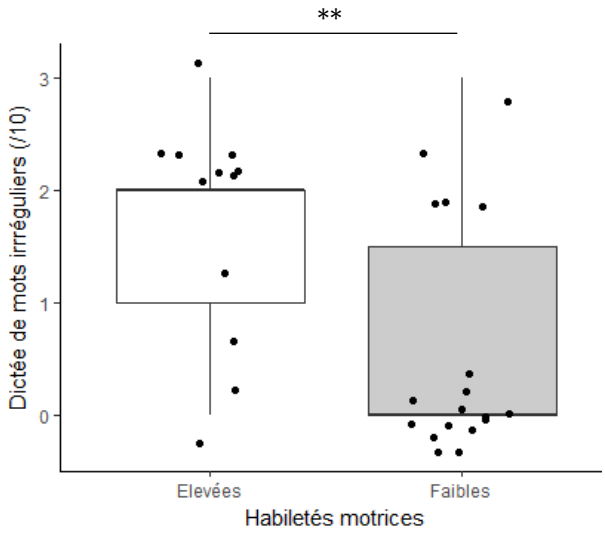

Figure 26: Performances obtenues par les deux sous-groupes d'élèves avec un trouble des apprentissages (habiletés motrices élevées vs faibles) sur une tâche d'orthographe de mots irréguliers

2) Sous-groupes basés sur les habiletés rythmiques

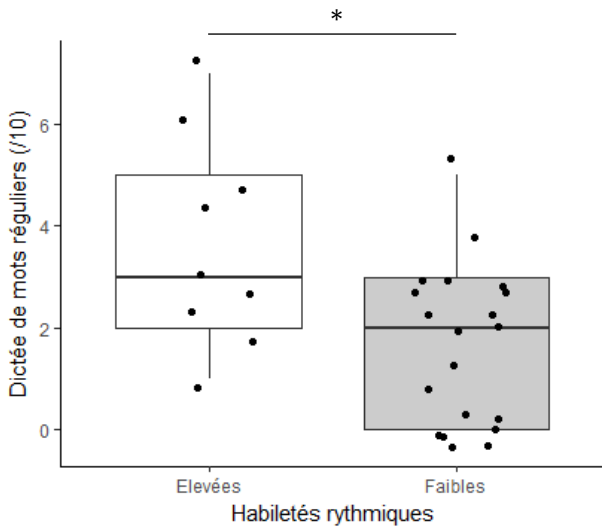

Figure 27 : Performances obtenues par les deux sous-groupes d'élèves avec un trouble des apprentissages (habiletés rythmiques élevées vs faibles) sur une tâche d'orthographe de mots réguliers

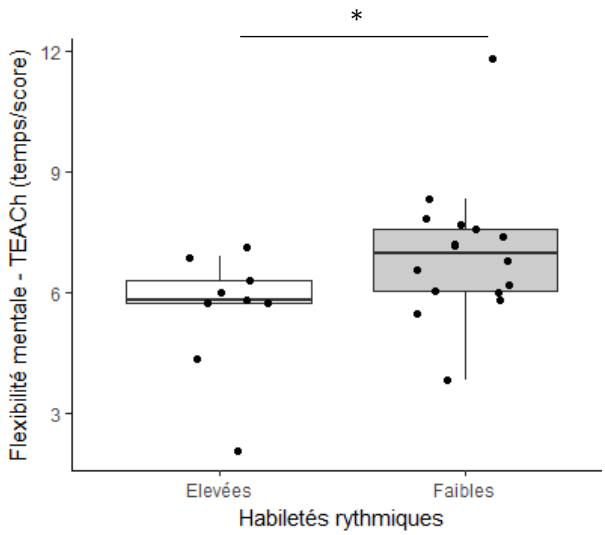

Figure 28 : Performances obtenues par les deux sous-groupes d'élèves avec un trouble des apprentissages (habiletés rythmiques élevées vs faibles) sur une tâche de flexibilité mentale

Annexe 5 : Tâche de copie de runes

Dans l'étude interventionnelle présentée dans le chapitre 9, les habiletés graphomotrices ont été évaluée à l'aide d'une tâche de copie de figure sur la base de la tâche de copie de symboles grecs proposée par Suggate et al. (2016). Les lettres grecques ont été remplacées par des runes scandinaves du fait de la familiarité avec certains symboles afin de s'assurer de la copie de figures inconnues. Les vingt figures devaient être copiées dans l'ordre (de gauche à droite et de haut en bas) le plus vite possible.

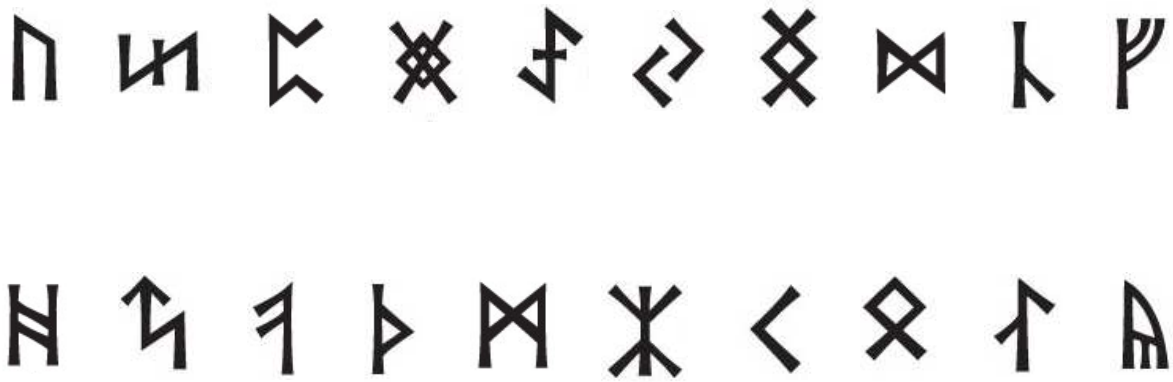

Figure 29: Tâche de copie de figures utilisée pour mesurer les habiletés graphomotrices dans l'étude 5