



HAL
open science

Motricité et apprentissage en contexte scolaire Synthèse des travaux en vue de l'obtention d'une habilitation à diriger des recherches

Nathalie Bonneton-Botté

► **To cite this version:**

Nathalie Bonneton-Botté. Motricité et apprentissage en contexte scolaire Synthèse des travaux en vue de l'obtention d'une habilitation à diriger des recherches. Sciences cognitives. Université de Rennes 2, 2022. tel-04097071

HAL Id: tel-04097071

<https://univ-rennes2.hal.science/tel-04097071v1>

Submitted on 14 May 2023

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

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



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial - NoDerivatives 4.0
International License



Motricité et apprentissage en contexte scolaire

Synthèse des travaux en vue de
l'obtention d'une habilitation à diriger
des recherches

Jury :

Marie-France Morin, Professeure, Université de Sherbrooke (Rapporteure)

Loïc Pulido, Professeur, Université de Chicoutimi (Rapporteur)

Eric Jamet, Professeur, Université de Rennes 2 (Examineur)

Mohamed Bernoussi, Professeur, Université de Nantes (Examineur)

Jérémy Danna, Chercheur HDR, CNRS-Université de Toulouse (rapporteur)

Gaïd Lemaner-Idrissi, Professeure, Université Rennes 2 (Garante)

LP3C-INSPE de Bretagne-Université de Bretagne Occidentale
BONNETON-BOTTÉ NATHALIE
Réalisée sous la garantie du Pr. Gaïd Le Maner-Idrissi

Table des matières

Remerciements	3
Résumé.....	6
Introduction.....	8
1. Modèles théoriques et outils conceptuels.....	10
1.1. Le système moteur considéré comme vecteur des connaissances	10
1.2. Autour du développement moteur : Généralités et concepts en jeu.....	12
1.3. Les facteurs de transformation des actions motrices au cours du développement.....	15
1.4. Développement moteur et réussite scolaire.....	17
2. L'acquisition de l'écriture manuscrite cursive chez l'enfant : notions théoriques fondamentales.	20
2.1. Les caractéristiques du geste d'écriture manuscrite cursive	20
2.2. L'acquisition du geste d'écriture manuscrite : modèles et repères.....	22
2.3. Le rôle des feedbacks sensoriels dans l'acquisition du geste d'écriture.....	24
2.4. L'importance de la connaissance du résultat ou feedback extrinsèque	25
2.5. Relation perception -action, apprentissage implicite et acquisition du geste d'écriture.	26
2.6. Potentialités et limites des outils numériques et de l'intelligence artificielle pour apprendre à écrire.....	30
2.7. Conclusion et perspectives de recherche pour une psychologie de l'éducation incarnée ...	32
3. Le rôle du contexte dans les apprentissages scolaires.....	33
3.1. Une écologie de l'apprentissage qui impacte le développement	33
3.1.1. Les outils conceptuels pour penser les relations entre développement et apprentissage 33	
3.1.2. L'acquisition de la cursive au CP : pratiques et représentations des enseignants, pour quels espaces d'actions encouragées ? (Étude 1).....	36
3.1.3. La place du numérique pour l'écriture dans les espaces d'actions encouragées (étude 2) 41	
3.2. Apport des études sur les contextes scolaires d'apprentissage.....	49
4. Perception et production du mouvement d'écriture manuscrite par l'enfant.....	50
4.1. La connaissance par l'enfant des caractéristiques du geste d'écriture (étude 3).....	50
5. Apprendre à écrire : études en contexte scolaire	58
5.1. Faut-il enseigner le sens du tracé des lettres en capitale ? (Étude 4).....	59

5.2.	Apprendre les lettres à partir de la motricité globale a-t-il un intérêt ? (Étude 5)	62
5.3.	Faire écrire sans laisser de trace présente-t-il un intérêt ? (Étude 6).....	68
6.	Le numérique au service de l'écriture : conception et évaluation d'applications intelligentes pour tablette.	73
6.1.	Evaluation d'une application pour tablette ? L'exemple du projet intuiscript (étude 7).....	73
6.2.	L'IA pour s'entraîner de façon autonome à la dictée manuscrite (Étude 8)	77
7.	Conclusion générale sur mes contributions à l'étude du geste d'écriture	95
8.	La motricité manuelle au service du calcul : de l'usage spontané des doigts en calcul à son enseignement.....	95
8.1.	Construire le nombre et calculer avec les doigts	97
8.2.	La relation entre les représentations mentales des mains, le recours aux doigts et la réussite en calcul (étude 9)	98
8.3.	Stimuler le recours aux doigts pour soutenir les habiletés numériques et les habiletés de calcul (étude 10).....	102
9.	Conclusion sur mes contributions à l'étude du recours aux doigts en mathématiques.....	124
10.	Perspectives.....	124
10.1.	L'IA et la réalité virtuelle au service des enfants en situation de handicap : le projet Kaligo+	124
10.2.	Motricité manuelle et exploration haptique chez l'enfant présentant un TDI	127
10.3.	Une recherche coopérative au service des élèves en situation de handicap.	129
10.4.	Contribuer à structurer la place de la psychologie dans le champ des recherches en éducation : le rôle des recherches participatives	134
11.	Conclusion générale	138
	Références.....	139
	Table des illustrations.....	178

Remerciements

Faire de la recherche lorsqu'il faut assurer de nombreuses tâches d'enseignement ce n'est pas simple, faire de la recherche à l'INSPÉ est encore moins simple, du fait des réformes incessantes, du faible taux d'encadrement des étudiants par des enseignants chercheurs, des charges et responsabilités administratives qui incombent aux enseignants chercheurs, du fait aussi que les recherches que nous encadrons ne sont pas des recherches en psychologie. Le chemin fût long et sinueux pour identifier la place que je souhaitais accorder à mes activités de recherche. Ce parcours de recherche et la volonté aujourd'hui d'en réaliser une synthèse n'aurait pas existé si certains et certaines collègues ne m'avaient pas soutenu, stimulé, motivé et s'ils ne m'avaient pas accordé leur confiance à un moment ou un autre. En premier lieu, je tiens à remercier Gaïd Le Maner-Idrissi qui a soutenu cette démarche et a accepté de superviser ce travail avec exigence et bienveillance. Merci aussi à Agnès Lacroix de m'avoir gentiment proposé une relecture critique et pertinente du document. Les collègues de l'axe 3 et de l'axe 4 ont chacune et chacun contribué à me faire grandir, un grand merci à toutes et tous et plus particulièrement à Nathalie Marec-Breton, à ma chère collègue Fanny De La Haye partie sous le soleil ainsi qu'à Yvonnick Noël avec qui j'ai pris plaisir à travailler notamment dans le cadre de l'encadrement de la thèse de Fanny Ollivier. A l'INSPÉ, je tiens tout spécialement à écrire ici à quel point le fait de travailler avec des formatrices et formateurs disciplinaires a été une richesse pour moi, évidemment, il me faut plus particulièrement dire merci à Rozenn Nédelec et à Héliane Hili sans qui je ne me serais pas engagée à travailler sur le domaine des mathématiques qui était à l'origine bien loin de mon champ de compétence. Je profite de cette parenthèse sur l'INSPÉ pour remercier Nicolas Tocquer qui m'a ouvert de nouveaux horizons en me proposant de rentrer dans l'équipe de direction pour être en charge de la recherche à l'INSPÉ de Bretagne. Cette nouvelle fonction m'offre l'opportunité de coopérer avec de nombreux nouveaux collègues et de travailler toujours avec beaucoup de plaisir avec les personnels du service recherche. Un grand merci aussi à mes étudiants, en particulier à Fanny Ollivier qui m'a harcelée pour que j'encadre son travail de thèse et à Sophie Le Gall qui me permet de continuer l'aventure de l'accompagnement du travail de thèse. Mes recherches ne seraient pas ce qu'elles sont si je n'avais pas ces belles collaborations avec les praticiens de l'Éducation Nationale, merci aux différents acteurs avec qui j'ai collaboré et plus particulièrement aux élèves et aux enseignants. Les partenariats font la richesse de notre travail, merci à toute l'équipe de LEARN&GO pour me renouveler sans cesse sa confiance en m'associant à ces projets et aux équipes BEACHILD et IRISA pour les temps partagés toujours enrichissants et joyeux.

Wikipédia définit le mentorat comme « *une relation interpersonnelle de soutien, une relation d'aide, d'échange et d'apprentissage, dans laquelle une personne d'expérience, le mentor, offre sa sagesse acquise et son expertise dans le but de favoriser le développement d'une autre personne, le mentoré,*

qui a des compétences ou des connaissances à acquérir et des objectifs professionnels à atteindre ».

Sur le plan professionnel, je souhaite accorder une dédicace spéciale à deux collègues qui sont extrêmement importants à mes yeux et qui ont joué probablement (à l'insu de leur plein gré) le rôle de mentor. Il y a environ 10 ans de cela, je travaillais relativement seule sur la thématique du geste d'écriture, perdue sur mon site de Saint-Brieuc. Éric Jamet m'a accordé sa confiance en proposant de m'associer au projet intuiscript. C'est avec ce projet que tout a réellement commencé. Depuis cette période, notre collaboration a toujours été un réel plaisir, je suis très admirative de ses compétences professionnelles et j'ai toujours le sentiment d'apprendre énormément en travaillant avec lui. Florence Bara est la seconde personne qui a énormément compté dans mon parcours professionnel. Florence a réussi à me faire comprendre que mon travail avait de la valeur, qu'il méritait d'être publié à un moment où j'étais persuadée que mes travaux ne valaient pas la peine d'être publiés. Plus tard, elle a aussi contribué à me faire comprendre que les recherches interventionnelles que nous menions avaient une utilité et qu'ils étaient complémentaires d'approches plus expérimentales. Un grand merci donc Éric et Florence pour tout ce que vous m'avez apporté.

Je tiens à remercier chaleureusement le jury qui a accepté d'évaluer ce travail.

J'achève ces remerciements par un mot d'amour à ma famille chérie et plus particulièrement à mon mari Damien, à Gaspard et Léone qui sont des bulles de joie permanentes (sans oublier mes chats Uki et Haru).

A mon père,

Résumé

Ce document reflète une démarche réflexive menée à l'issue de 19 années d'enseignement et de recherche au service des élèves et des professeurs de l'Education Nationale et de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. En étudiant les représentations et pratiques des enseignants, certains travaux relatés ici visent à préciser les caractéristiques des espaces d'actions encouragées ou limitées à l'école primaire. Certaines recherches permettent aussi d'explorer le rôle que pourrait jouer la motricité pour faciliter ou limiter les apprentissages fondamentaux à l'aune de connaissances scientifiques récentes relatives notamment à la cognition motrice et au modèle de la cognition incarnée et située. Les méthodologies adoptées empruntent à la psychologie du développement, à la psychologie cognitive, à l'ergonomie ou aux sciences de l'éducation. Les démarches d'investigation sont le plus souvent participatives et quasi-expérimentales.

Après avoir présenté les principaux modèles et concepts qui ont orienté ce parcours de recherche (chapitre 1 et 2), le chapitre 3 analyse les relations entre les représentations, les pratiques et l'environnement scolaire des enseignants dans les domaines de l'acquisition de l'écriture cursive et des outils numériques au service de l'enseignement de l'écriture.

Le chapitre 4 présente les résultats de recherches relatifs à la cognition motrice du mouvement d'écriture chez l'enfant. Les études présentées dans les chapitres 5 à 8 relatent des expérimentations conduites en contexte scolaire dans le champ de la littéracie et de la numéracie. Toutes ces recherches partagent un objectif commun : contribuer à préciser l'efficacité de certains dispositifs d'enseignement pour la réussite de tous. Enfin, cette synthèse s'achève par une présentation des perspectives ; il s'agira de montrer comment ce parcours réflexif oriente aujourd'hui mes objets de recherche et ma conception d'une psychologie de l'éducation au service des préoccupations sociétales.

Mots-clés : Enfant ; Motricité ; Apprentissage ; Littéracie ; Numéracie

Abstract

This document reflects a reflexive approach carried out at the end of 19 years of teaching and research in the service of students and teachers in National Education and Higher Education and Research. By studying teachers' representations and practices, some of the work reported here aims to specify the characteristics of the spaces for actions encouraged or limited to elementary school. Some researches also allow exploring the role that motricity could play in facilitating or limiting fundamental learning in the light of current scientific knowledge

concerning motor cognition and the model of embodied and situated cognition. The methodologies adopted are based on developmental psychology, cognitive psychology, ergonomics, and educational sciences. The investigative approaches are most often participatory and quasi-experimental.

After presenting the main models and concepts that have guided this research (chapters 1 and 2), chapter 3 analyzes the relationships between teachers' representations, practices, and school environment in the areas of cursive writing acquisition and digital tools for teaching writing. Chapter 4 presents research findings related to the motor cognition of writing movement in children. The studies presented in chapters 5 to 8 relate experiments conducted in the school context in the field of literacy and numeracy. All of these studies share a common objective: to contribute to clarifying the effectiveness of certain teaching methods for the success of all. Finally, this synthesis ends with a presentation of the perspectives; it will show how this reflexive path orientates today my research objects and my conception of educational psychology at the service of societal concerns.

Keywords: Children, Teaching, Motricity; literacy; numeracy

Introduction

« *N'importe quelle méthode didactique ou quel programme d'enseignement dont l'application et les résultats sont à analyser par la pédagogie expérimentale soulève des problèmes de psychologie du développement, de psychologie de l'apprentissage et de psychologie générale de l'intelligence* » (Jean Piaget, 1961 ; p.41) ». Cette citation de Piaget résume avec élégance les tensions professionnelles qui ont parsemé mon parcours professionnel d'enseignant-chercheur.

L'action motrice est au cœur de mes recherches depuis mon travail de doctorat qui s'intéressait, dans une perspective développementale et constructiviste, à l'étude des actes moteurs du jeune enfant lors d'activités de tracé et de pointage. D'un point de vue théorique, ce travail de thèse m'avait conduite à tenter d'articuler le concept de schème Piagétien à celui de représentation motrice de Jeannerod (2001). Il me semblait en effet que les neurosciences avaient contribué à valider au moins partiellement le concept de schème en démontrant que nos actions sont guidées par les représentations internes liées à nos intentions plutôt que par l'information externe (Jeannerod & Decety, 1995).

Nommée comme Maître de Conférences à l'institut de formation des maîtres (IUFM) de Bretagne (anciennement école supérieure du professorat et de l'éducation, ESPÉ et actuelle institut national supérieur du professorat et de l'éducation, INSPÉ) le rôle du développement moteur et des actions perceptives et motrices dans les apprentissages scolaires est naturellement devenu une préoccupation majeure.

L'idée très ancienne que le cerveau est l'organe ultime de l'élaboration de la connaissance a contribué à mettre au second plan le rôle du corps et de l'environnement dans le développement du sujet humain. Les effets de ces conceptions sont visibles à l'école où le corps doit se faire le plus immobile possible et où le langage est considéré comme le vecteur principal de l'accroissement des connaissances. Ces vingt dernières années, des modèles vont bouleverser ces conceptions et vont venir réinterroger le rôle du corps, de la sensori-motricité et de l'environnement. Le cadre théorique de la cognition incarnée et située s'est installé progressivement dans le paysage scientifique de la psychologie. Il apporte des arguments solides tant sur le plan comportemental que neuroscientifique en faveur d'un rôle du système sensori-moteur et de l'environnement dans la construction et la récupération des connaissances. Ce modèle attrayant renforce mais aussi déstabilise certaines de mes conceptions constructivistes et ma façon de concevoir le développement. En effet si le courant de la cognition incarnée et située, tout comme le modèle Piagétien alloue un rôle majeur au système

sensori-moteur dans la construction des connaissances, le concept de représentation n'est plus essentiel et une place déterminante est accordée à l'environnement.

Comment accompagner les acteurs de la communauté éducative à questionner la place du corps et de la motricité dans leurs pratiques pédagogiques ? Comment ses théories peuvent-elles ou doivent-elles impacter nos conceptions de la forme scolaire¹ (*i.e.*, en particulier quant à la place du corps et de l'environnement d'apprentissage) et des processus d'apprentissage en milieu scolaire ?

Devenue enseignante-chercheuse, mes premiers travaux ont d'abord cherché à identifier chez l'enfant une cognition motrice du mouvement d'écriture (étude 3). Parallèlement, mes fonctions d'enseignante m'ont conduite à questionner la transformation des pratiques enseignantes. J'observe que l'enseignement de préconisations issues de recherches scientifiques présente un certain nombre de limites, les enseignants considérant bien souvent que les travaux hors sol ne sont pas transférables en classe. Ce constat me convainc d'étudier les relations entre les représentations, les pratiques et l'environnement scolaire des enseignants (études 1 et 2) puis à identifier des dispositifs d'enseignement ou des environnements d'apprentissage qui favorisent la réussite de tous. Ce dernier axe de recherche se décline aujourd'hui à travers l'étude des actes moteurs de l'enfant en contexte scolaire dans les domaines de la littératie (études 4 à 8) et de la numératie (études 9 et 10), à partir de méthodes quasi-expérimentales², de recherches participatives (*i.e.*, recherche action et recherche coopérative) et en formulant des questions fondamentales et appliquées. Mieux saisir chez l'enfant le rôle du système moteur et de l'environnement dans l'acquisition et la transformation des connaissances acquises en milieu scolaire m'a menée à sortir du cadre de la psychologie développementale pour aller vers une psychologie de l'éducation qui emprunte aux neurosciences, aux sciences de l'éducation, ou encore à l'ergonomie cognitive.

La coopération avec les enseignants pour concevoir et expérimenter des dispositifs d'apprentissage ou des applications pour tablette à visée éducative me semble aujourd'hui la méthode la plus appropriée pour intégrer la dimension située de la cognition et pour accompagner la transformation des pratiques enseignantes en faveur d'une réduction des inégalités scolaires. Dans le champ de la psychologie de l'éducation, la démarche

¹ La notion de « forme scolaire » renvoie ici à la conception de Vincent, Courtebras, & Reuter (2012) : « la forme scolaire, qui est une forme de transmission de savoirs et de savoir faire, privilégie l'écrit, entraîne la séparation de « l'écolier » par rapport à la vie adulte, ainsi que du savoir par rapport au faire ».

² Le terme « quasi-expérimental » a d'abord été utilisé dans le champ de la santé et fait référence à une « expérimentation avec une intervention donnée, des résultats mesurés et au moins deux unités expérimentales (groupe recevant l'intervention et groupe contrôle), mais sans recours à la randomisation pour créer les conditions d'inférence causale » (Cook, Campbell *et al.* 1979)

interventionnelle commence à être reconnue et défendue comme en témoigne un édito datant de 2017 rédigé par Édouard Gentaz pour la revue ANAE (Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant) « *La co-construction par des enseignants et des chercheurs de programmes interventionnels et leurs évaluations avec la méthode expérimentale peut constituer un très bon outil de formation professionnelle* ».

Les deux premières parties de cette synthèse présenteront les modèles et concepts théoriques sur lesquels je me suis appuyée pour élaborer mon parcours de recherche. Le troisième chapitre présente l'importance de la prise en compte du contexte pour l'étude des apprentissages scolaires, les résultats de deux études menées auprès d'enseignants de maternelle et d'école primaire sont relatés. Les chapitres 3 et 4 portent sur mes travaux relatifs à la perception, à la production et à l'apprentissage du geste d'écriture chez l'enfant d'âge pré-scolaire et scolaire. Le chapitre 5 est consacré aux recherches menées dans le cadre de la conception d'innovations numériques dotées d'intelligence artificielle dédiées aux apprentissages scolaires, et plus particulièrement à la production d'écrit. Les recherches présentées dans le chapitre 7 interrogent là encore la place du corps dans la construction des connaissances mais cette fois dans le champ de la numératie. J'y présente mes recherches relatives au rôle des doigts pour la construction du nombre et l'entrée dans le calcul. Finalement, en présentant les perspectives de recherches futures, je montrerai quelle place je souhaite désormais accorder aux apprentissages scolaires de l'enfant présentant un développement atypique et aux démarches interventionnelles dans les recherches coopératives comme moyen de contribuer à réduire les inégalités scolaires.

1. Modèles théoriques et outils conceptuels

1.1. Le système moteur considéré comme vecteur des connaissances

Chez Piaget, la genèse des actes moteurs n'a jamais réellement représenté un objet d'étude à part entière. Si l'activité sensori-motrice a un rôle fondamental dans son modèle, c'est parce que la construction des connaissances ultérieures lui est subordonnée. Néanmoins, dans sa démarche épistémologique, l'auteur envisage les rapports entre perception, action et connaissance. Piaget (1967) considère que la connaissance suppose une organisation préalable permettant son assimilation. L'activité cognitive de l'enfant consiste donc à attribuer des significations aux informations qui lui parviennent c'est-à-dire aussi à transformer ces informations en connaissances. Le schème, défini comme « l'organisation des actions telles qu'elles se transfèrent ou se généralisent lors de la répétition de cette même action » (Piaget, 1966, p.11), est la structure par laquelle l'enfant peut élaborer ses premières significations.

Ainsi, à partir du schème sensori-moteur mobilisé, l'objet perçu par le bébé sera perçu comme occupant une position dans l'espace, comme objet à saisir, à regarder ou à manipuler. L'action motrice observable n'est qu'une particularisation d'un schème, elle n'est pas porteuse de représentation ou plutôt ne représente qu'elle-même : "*L'intelligence sensori-motrice consiste à coordonner directement des actions sans passer par la représentation ou la pensée.* » (Piaget 1967 p 23). Il faut attendre les années 90 et la notion de représentation motrice pour que les actions motrices soient étudiées pour elles-mêmes et que les mécanismes qui les lient à l'élaboration de la connaissance soit investigués. La notion de représentation motrice émerge grâce aux travaux menés dans le champ des neurosciences et recouvre l'ensemble des mécanismes cérébraux permettant la mise en œuvre d'une motricité intentionnelle adaptée qu'elle soit réelle ou imaginée mais aussi d'anticiper les conséquences sensorielles, posturales et spatiales des actions motrices (Bidet-Ildei, Orliaguet & Coello, 2011). Jeannerod (2001) constate des similitudes fonctionnelles entre le fait de produire un mouvement, de l'imaginer ou de l'observer (*i.e.*, les caractéristiques spatio-temporelles d'une action imaginée et réalisée par un sujet présentent des similitudes) et suppose à l'origine de ces différentes actions, un mécanisme commun de simulation interne du mouvement. Sur un plan neurophysiologique, la découverte des neurones miroirs vient étayer ces suppositions (Rizzolatti, Fadiga, Gallese & Fogassi, 1996). Les neurones miroirs d'abord identifiés chez le macaque puis chez l'homme, s'activent de la même façon lorsqu'il s'agit de réaliser une action ou d'observer cette même action réalisée par un congénère. Par ailleurs, les zones cérébrales activées lors d'une exécution motrice le sont également lorsque cette même action est simulée mentalement. Ces structures corticales communes sont l'aire motrice supplémentaire, le cortex pré-moteur dorsal, le cortex préfrontal, le lobule pariétal (Decety, 1999) et le cervelet (Decety et al., 1990). En résumé, ces découvertes conduisent à l'émergence d'un concept de cognition motrice qui promeut l'idée que toute action motrice est porteuse de connaissance et que le système moteur participe pleinement aux processus cognitifs et à l'activité perceptive.

Dans la continuité de ces découvertes, un modèle incarné et situé de la cognition se développe à partir des années 2000. Il défend l'idée que les connaissances sont sensori-motrices par nature, qu'elles sont distribuées dans le cerveau et qu'elles résultent des interactions entre les composants sensoriels et moteurs des expériences passées et présentes. Dans cette approche, la cognition est enracinée dans la sensori-motricité mais elle est aussi située puisque toute expérience dépend du contexte et des caractéristiques environnementales dans lesquels elle se déroule. Il existe au sein de ce courant des approches différenciées, certains auteurs conservant

l'idée de représentations internes plurimodales, tandis que d'autres considèrent que la référence à la notion de représentation n'est pas utile, toute connaissance étant simplement une réactivation ou une simulation transitoire des interactions sensorielles et motrices avec l'environnement (Barsalou, 1999 ; Versace, Brouillet & Vallet, 2018). Les travaux issus de ce courant démontrent avec force les relations inter-modales dans la construction des connaissances, et montrent que nous percevons le monde en fonction des expériences sensori-motrices qui nous ont été possibles de vivre. Le modèle ACT-IN (pour activation-intégration) développé par Versace et al. (2018) modifie radicalement la vision verticale des rapports hiérarchiques entre perception sensori-motrice et mémoire pour proposer une vision horizontale où perception et mémoire impliquent des composants sensori-moteurs de traces d'expériences présentes et passées. Si les traces actives concernent majoritairement des composants présents, le sujet perçoit ; lorsque les composants en jeu sont réactivés, le sujet se remémore. Les auteurs précisent cependant que la cognition dépend toujours de composants présents et récréés puisque la perception nécessite la mémoire et inversement. ACT-IN accorde une part déterminante à la situation dans les processus perceptifs et mnésiques et de façon générale dans l'élaboration cognitive : les buts, intentions et anticipations d'un sujet dans un environnement particulier déterminent les états successifs de la cognition et par conséquent l'émergence de ses ressentis perceptifs, mnésiques et émotionnels. Le modèle présente l'intérêt de différencier les processus mnésiques en jeu lors de la réactivation d'un souvenir ou de l'activation d'une connaissance. La réactivation d'un nombre très limité de traces réactivées équivaut à des connaissances spécifiques (soit un souvenir) tandis que la réactivation d'un grand nombre de traces permet l'émergence d'une connaissance conceptuelle.

Si la connaissance est située et incarnée alors le rôle de l'environnement en ce qu'il permet ou limite certaines expériences devient déterminant dans l'étude des mécanismes d'apprentissage et les possibilités sensori-motrices de l'enfant, elles aussi, peuvent jouer le rôle de contraintes ou de leviers pour le développement et les apprentissages. Nous présenterons dans les paragraphes suivants les concepts et repères qui nous semblent essentiels lorsqu'il s'agit de considérer la place du corps et de la motricité dans les apprentissages chez l'enfant.

1.2. Autour du développement moteur : Généralités et concepts en jeu

Les actions motrices ou plus exactement sensori-motrices assurent de multiples fonctions essentielles au bon développement de l'enfant. La fonction de transport permet les déplacements du corps entier ou de certains segments. Les actions motrices servent aussi à agir

sur son environnement, à s'orienter en fonction des flux sensoriels (olfactifs ou auditifs par exemple), à se protéger en cas de danger, à se mettre en relation avec d'autres personnes. Elles assurent des fonctions expressives grâce à l'expression d'émotions et à la communication orale ou écrite. Enfin, comme nous venons de l'aborder que l'on se réfère à la théorie de l'intelligence de Piaget (1936) ou à la théorie plus récente de la cognition incarnée et située (Versace, et al., 2018), elles jouent un rôle fondamental dans l'acquisition des connaissances. Il faut aussi rappeler que le bon déroulement des actes moteurs requiert une efficacité du système tonico-postural. Le système de régulation tonico-postural remplit deux grandes fonctions. La première consiste à maintenir une posture antigravitaire qui contribue aussi à assurer l'équilibre ; la seconde à fixer les segments du corps dans une position stable qui servira de cadre de référence à la perception et au calibrage d'actions précises, c'est le cas par exemple lors de l'activité d'écriture (Paillard, 1991 ; Massion, 1994 ; Bullinger, 2003 ; Assaiante, 2011).

Mouvement, action motrice, habileté, corps ou organismes, motricité globale ou fine, diverses notions sont invoquées par les chercheurs lorsqu'il s'agit de décrire le développement moteur ou les apprentissages moteurs. Avec Bullinger (2013), nous retiendrons que le terme de « *corps* » réfère aux représentations relatives à l'objet matériel qu'est l'*organisme*. L'*organisme* est donc considéré ici comme un objet du milieu. La notion de *mouvement* réfère à la partie observable de la production motrice, tandis que *l'action motrice* réfère à la coordination de plusieurs mouvements. Lorsque cette action est maîtrisée dans son exécution, on parle alors d'*habileté motrice*. L'habileté est définie par Guthrie en 1935 comme la capacité de parvenir à un résultat fixé à l'avance avec le maximum de certitude et le minimum de temps ou d'énergie. De fait, la précision et la rapidité des actions motrices sont des critères généralement observés pour juger de la mise en place d'une habileté. De plus, pour que l'action motrice ait le statut d'habileté, la performance doit présenter une relative stabilité, le mouvement doit être lisse, harmonieux et exempt de syncinésies. En psychologie cognitive, les actions motrices sont généralement appréhendées comme un processus ordonné constitué de trois étapes : la planification, la programmation et l'exécution (Pailhous & Bonnard, 1989). La planification concerne le but de l'action, tandis que la programmation prend en charge l'exécution. Pour que l'exécution puisse être adaptée aux caractéristiques du milieu et aux contraintes de la tâche, des contrôles proactifs (mis en place avant le début de l'exécution) et rétroactifs (en cours d'exécution) seront nécessaires.

La littérature distingue généralement la motricité globale de la motricité fine. La motricité globale apparaît en premier dans le développement de l'enfant. Elle recouvre des activités

motrices qui nécessitent le contrôle des grands muscles de l'organisme et qui permettent la possibilité d'attraper de gros objets entre 4 et 8 mois (Fagard, 2000), de faire du quatre pattes ou de ramper entre 5 et 11 mois, de marcher entre 9 et 18 mois (Bril, 2000 ; Fastame, 2020). La motricité fine est fréquemment définie comme « des petits mouvements musculaires nécessitant une coordination étroite œil-main » (Luo, Jose, Huntsinger & Pigott, 2007, p. 596), elle est alors généralement associée à la visuo-motricité ou encore à la dextérité. D'autres auteurs comme Pitchford, Papini, Outhwaite, & Gulliford (2016) associent la motricité fine à la coordination contrôlée de la musculature distale des mains et des doigts, excluant de fait la référence explicite au contrôle oculaire. Il nous semble important par ailleurs de remarquer que d'un point de vue épistémologique, la notion de motricité fine ne recouvre pas celle de motricité manuelle. La motricité manuelle, plus large, recouvre les habiletés de motricité fine appelant une certaine dextérité (comme enfiler une perle) mais convoque aussi des capacités de manipulation bimanuelle d'objets avec ou sans retour visuel (exploration haptique d'objets) ou encore des gestes symboliques (dire au revoir avec la main, représenter des quantités ou transformer des quantités à l'aide des doigts). Les repères les plus fréquemment évoqués en motricité fine concerne l'apparition de la pince pour saisir de petits objets qui mobilise l'index et le pouce et que l'on observe entre 7 et 9 mois (Brunet & Lézine, 2001). La capacité à tenir compte de la taille, de la forme et de l'orientation de l'objet à saisir s'installe au cours du dernier trimestre de la première année tandis que vers la fin de la première année les bébés deviennent capables d'utiliser les deux mains de façon complémentaire et asymétrique ce qu'exige la plupart des manipulations (Fagard, 2000). En situation d'imitation, le jeune enfant est capable de tracer un trait vertical dès l'âge de 20 mois (Brunet & Lézine, 2001).

Les actions motrices peuvent aussi être catégorisées en considérant le type de but poursuivi. Soit il s'agit d'atteindre un but spatial, et l'action est topocinétique (*e.g.*, action de pointage), soit il s'agit de reproduire une forme et elle est morphocinétique (*e.g.*, la danse). Certaines actions possèdent les deux caractéristiques. C'est le cas de l'écriture manuscrite qui peut être décrite comme une action motrice rapide et précise qui possède des caractéristiques morphocinétiques et topocinétiques (Paillard, 1991) et qui porte en elle-même une intention sémiotique (Bonneton-Botté, Guilbert & Bara, 2019).

1.3. Les facteurs de transformation des actions motrices au cours du développement

Comment concevoir l'apparition de nouvelles formes motrices ou de nouvelles habiletés au cours du développement ? Comment rendre compte de la variabilité intra et interindividuelle des patterns moteurs du jeune enfant ?

Selon Fagard (2000) qui s'intéresse au développement manuel de l'enfant, les chercheurs qui étudient le développement moteur de l'enfant s'accordent sur deux points 1) il existe dès la naissance des boucles sensori-motrices et des patterns moteurs innés qui servent de base au développement du répertoire moteur et 2) ces patterns s'enrichissent progressivement et se complètent de nouveaux patterns moteurs pour aboutir à des mouvements coordonnés. Pour Fagard, le désaccord entre chercheurs porte sur les facteurs qui provoquent ces modifications développementales.

Selon une approche maturationniste, les modifications motrices observées peuvent être attribuées à des facteurs neuromaturationnels. Gesell (1933) suppose que ces modifications sont programmées génétiquement. Plus récemment, l'accent est mis sur les limites qu'apporte la maturité ou l'immaturité du système neuromoteur. On pense par exemple au concept de « kinaesthetic readiness » de Lazlow et Bairstow (1985) qui suggère que l'apprentissage avant l'âge de 7 ans de l'écriture cursive est contraire aux possibilités neuromotrices de l'enfant. La maturation neuromotrice peut donc être appréhendée comme un ensemble de contraintes à l'intérieur desquelles les apprentissages et le développement pourront s'exprimer. Dans cette perspective, le rythme du développement biologique de l'enfant impacte l'effet d'un apprentissage ou d'un entraînement et peut en limiter les effets. Certains chercheurs essaient aujourd'hui de comprendre en quoi la maturation de certaines aires cérébrales impacte le développement des habiletés motrices : Diamond (1990) explique certains changements moteurs, comme la conduite de détour, par la maturation des aires pré-frontales impliquées dans la planification et l'inhibition de l'action. Fagard, Morioka & Wolff (1985) convoquent la maturation du corps calleux (tardif puisque s'étendant jusqu'à l'adolescence) pour expliquer le développement de la coordination bimanuelle (Fagard et al., 1985). L'apprentissage d'une habileté manuelle peut donc être modulé par des contraintes motrices liées au système neuromoteur et à la co-activation de plusieurs effecteurs (Fagard, 2000 ; Fagard, Hardy-Léger, Kervella, & Marks, 2001). Ces contraintes neuromotrices sont généralement évoquées pour expliquer différents phénomènes observés lors de conduites motrices manuelles comme a) les

différences de performances entre main dominante et non dominante, b) la présence de syncinésies (Wallon & Denjean, 1962), (*i.e.*, mouvements parasites involontaires qui accompagnent une action unimanuelle ou bimanuelle et qui perdurent jusqu'à l'âge de 10 ans); c) la tendance à produire des gestes bimanuels en miroir (Brumbl, 1972) ou encore d) la présence de mouvements interférents lorsque deux actions différentes sont prises en charge par chacune des mains (Schmidt & Lee, 2005 ; Otte & Van Mier, 2006).

Pour les tenants des approches dynamiques comme Thelen (2005), des assemblages, ou patterns d'action, disponibles dès la naissance agissent comme des attracteurs au sens où ils sont privilégiés à un moment donné du développement mais n'ont pas de caractère obligatoire. Étant donné leur étroite dépendance à l'environnement et à l'état du système sensori-moteur, ils peuvent alternativement devenir stables ou instables. Le développement moteur est alors appréhendé comme un processus de stabilisation et de déstabilisation de ces attracteurs. L'apparition des nouvelles formes motrices résulte de l'exploration continue du corps et de l'espace d'action par l'enfant.

Dans la conception constructiviste et cognitiviste, le bébé dispose à la naissance de couplages sensori-moteurs directs et automatiques avec l'environnement qui permettent que des actions soient déclenchées par des perceptions. Ces premiers couplages vont constituer la base des programmes moteurs nécessaires à la production de l'action motrice. Un consensus s'est établi pour définir le programme moteur comme : "*Une séquence de commandes stockées avant le début du mouvement et qui permet la mise en place de la séquence entière sans influence du feedback périphérique*" (Keele, 1968). Les tentatives de formalisation du concept de programme moteur aboutiront à deux types de modèles prescriptifs complémentaires qui privilégient soit les processus périphériques (*i.e.*, le modèle d'Adams (1971) met l'accent sur le rôle des réafférences sensorielles pour rendre compte de l'acquisition d'une habileté motrice) soit les processus centraux (*i.e.*, le modèle de Schmidt en 1975 accorde une place plus importante aux programmes moteurs pour expliquer les acquisitions). Du point de vue des apprentissages moteurs, le modèle des deux schémas de Schmidt (1975) est probablement le plus consensuel. Schmidt modélise l'implication d'un schéma de rappel dont la fonction est de récupérer le programme moteur généralisé en mémoire et d'un schéma de reconnaissance qui constitue une forme de mémoire des conséquences sensorielles du mouvement à produire (mémoire qui se constitue sur la base des expériences passées). Le dialogue entre ces deux schémas et la connaissance du résultat permettent l'installation progressive d'habiletés motrices. Pour comprendre les transformations développementales, les constructivistes se

saisissent des concepts des théories prescriptives. Dans cette perspective, les modifications motrices observées traduisent de nouvelles capacités de codage des propriétés du corps, des objets et de l'environnement. La représentation du but de l'action évolue, et avec elle la planification, la programmation et l'exécution de l'action. Les capacités à intégrer les rétroactions visuelles et proprioceptives, expliquent aussi les transformations observées.

Comme nous l'avons décrit précédemment les recherches menées dans le champ des neurosciences vont conduire à découvrir un mécanisme de simulation mentale de l'action motrice (Jeannerod, 2001). Cette théorie prédit notamment la capacité du sujet à produire une imagerie motrice mentale. L'imagerie mentale motrice a été d'abord identifiée par Coopers et Shepard (1975). En demandant à des sujets de réaliser une tâche de rotation mentale de mains droites et gauches photographiées, les chercheurs se sont aperçus que les sujets avaient recours à une main « fantôme » pour réaliser cette tâche, comme s'ils déplaçaient mentalement leur propre main pour réaliser cette tâche de jugement. D'autres chercheurs ont précisé l'implication du système moteur du sujet au cours de cette tâche en montrant que le temps de réponse et le nombre d'erreurs étaient associées positivement à l'incongruité de la position de la main sur le plan biomécanique. Sur le plan développemental, les études sont rares et récentes mais elles ont permis de montrer que la capacité à simuler l'action émerge entre 5 et 7 ans. Cette capacité nouvelle pourrait influencer sur les capacités à acquérir de nouvelles habiletés motrices dans la mesure où l'examen mental du mouvement simulé constituerait un bon moyen de corriger l'action en cours d'exécution (Puyjarinet, Soppelsa & Connan, 2020).

1.4.Développement moteur et réussite scolaire

La motricité joue un rôle incontestable sur la réussite scolaire, le développement cognitif et social. Une méta-analyse conduite par Macdonald, Milne, Orr et Pope en 2018 indique une relation significative entre les compétences motrices des enfants (d'âges préscolaire et scolaire) et leur réussite académique en lecture et en mathématiques. Cette association significative concerne aussi bien la motricité globale que la motricité fine, mais les effets sont globalement plus robustes concernant la motricité fine. Par ailleurs, les auteurs observent que les programmes d'intervention en motricité menés dans le cadre d'études quasi-expérimentales impactent positivement la réussite académique en mathématiques et en lecture ; cependant, les méthodologies utilisées ne permettent généralement pas d'identifier les mécanismes en jeu dans cette relation ni le sens de cette relation. Plusieurs études longitudinales ont néanmoins montré une relation significative positive entre les scores de motricité globale et fine évalués en

maternelle, et les résultats en mathématiques et en lecture obtenus ultérieurement à l'école primaire (Kurdek & Sinclaire, 2001 ; Son & Meisels, 2006)

Quelques études montrent que de bonnes performances en motricité globale sont associées à un meilleur fonctionnement cognitif et social (Piek, Baynam, & Barrett, 2006 ; Westendorp et al., 2014). Les recherches qui s'intéressent aux compétences en motricité fine sont majoritaires et concernent différents domaines. Les compétences en motricité fine sont associées positivement à la réussite en lecture (Cameron, Cottone, Murrah, & Grissmer, 2016), en expression écrite (Carlson, Rowe, & Curby, 2013), en orthographe (Pontart et al., 2013), en raisonnement mathématique (Pitchford et al., 2016) ou en arithmétiques (Asakawa, Murakami, & Sugimura, 2019). Des relations positives sont aussi enregistrées entre les performances en motricité fine et le développement cognitif (Martzog, Stoeger & Suggate, 2019 ; Van der Fels et al., 2015). Les relations établies entre motricité fine et développement cognitif sont aussi observées en cas de trajectoire développementale atypique. A partir de l'évaluation des compétences mesurées à 8 mois d'intervalle de 2027 enfants âgés de 3 à 5 ans présentant un trouble développemental (*i.e.*, trouble du développement intellectuel, trouble du spectre autistique, trouble du langage, trouble spécifique des apprentissages) Kim, Carlson, Curby et Winsler (2016) montrent que la motricité fine est prédictive du développement des habiletés cognitives. En outre, selon le type de trouble dont sont atteints les enfants, l'impact de la motricité globale et de la motricité fine sur les compétences cognitives et sociales diffère quelque peu. Ainsi pour les enfants présentant un trouble du développement intellectuel et pour ceux présentant un trouble spécifique d'apprentissage, l'amélioration de la motricité globale n'a pas contribué à l'amélioration des aptitudes cognitives et sociales. Ces résultats sont en contradiction avec ceux de Westendorp et al. (2014). Les auteurs attribuent ces divergences aux outils utilisés pour mesurer la motricité globale et aux différences d'âge des populations étudiées. En revanche, chez ces deux types de populations au développement troublé, la qualité de la motricité fine prédit de manière significative et positive l'amélioration des compétences cognitives ultérieures.

Différents mécanismes explicatifs des liens entre motricité et réussite scolaire peuvent être convoqués. La revue de questions menée par Erickson, Hillman et Kramer en 2015 souligne qu'un programme de pratique physique exerce un effet significatif bénéfique sur la structure cérébrale de l'enfant (*i.e.*, augmentation du volume de matière grise et de matière blanche). Une pratique physique significative se traduit aussi par une augmentation de l'activité cérébrale de l'enfant associée à une amélioration des performances cognitives notamment sur le plan des fonctions exécutives. Cette amélioration de la structure et du fonctionnement cérébral par la

pratique physique serait bénéfique *a fortiori* si l'on considère l'hypothèse d'un redéploiement neuronal (Anderson & Penner-Wilger, 2013). L'observation du développement cérébral et de sa plasticité laisse penser que les zones cérébrales dédiées à certaines fonctions (dans l'histoire de l'espèce ou dans l'histoire précoce du sujet) vont être réutilisées au service d'autres fonctions nouvelles. Ainsi Anderson et Penner-Wilger expliquent-ils les relations comportementales et neurophysiologiques observées entre les représentations mentales des mains et des doigts (aussi appelées gnosie digitale) et les représentations des nombres. En effet, les mêmes structures cérébrales sont activées lorsque le sujet réalise des tâches de reconnaissance digitale et lorsqu'il manipule mentalement des quantités (Dehaene et al., 1996) et des corrélations significatives ont été enregistrées au cours du développement entre la capacité à se représenter ses mains et la capacité à manipuler des quantités (Marinthe, Fayol & Barrouillet, 2001). Dans cette perspective, une stimulation précoce des zones cérébrales dédiées aux représentations manuelles pourrait faciliter le redéploiement neuronal vers les fonctions numériques. Les relations entre motricité et réussite scolaire peuvent aussi être envisagées sous l'angle des mécanismes cognitifs impliqués lors d'un apprentissage et du processus de mémorisation. Comme nous l'avons précédemment souligné dans le paragraphe 1.1, le courant de la cognition incarnée accorde au système sensori-moteur un rôle majeur dans l'élaboration des connaissances. Par conséquent, l'enrichissement du répertoire sensori-moteur et des expériences sensori-motrices pourrait faciliter l'émergence des connaissances académiques. Enfin, en psychologie du développement comme en psychologie cognitive, une approche fonctionnelle des relations entre motricité et réussite scolaire peut être envisagée si l'on considère que tout apprentissage nécessite une action sur l'environnement (qu'il s'agisse d'oculomotricité pour observer, d'articuler pour énoncer ou de motricité globale pour se déplacer dans l'espace etc...) alors une motricité efficiente ne constituera pas une charge extrinsèque problématique au moment de l'apprentissage (Bara & Tricot, 2017). Deux grands exemples peuvent illustrer cette idée i) une motricité manuelle efficiente permet plus rapidement de produire le tracé des lettres ce qui facilite l'installation des premières habiletés en littéracie ii) l'habileté à représenter avec des doigts les nombres et leurs transformations sans difficulté pourrait faciliter la conceptualisation du nombre, les mains représentant ici un outil de conceptualisation accessible et disponible dans toutes situations.

Quelles que soient les hypothèses explicatives avancées, les liens observés entre motricité et réussite scolaire devraient inviter les chercheurs comme les professionnels de l'éducation à mieux considérer le rôle de l'environnement et les occasions d'action qui sont données à

l'enfant de développer sa motricité. Macdonald et al. (2018) constatent et regrettent qu'en milieu scolaire, la priorité soit souvent donnée aux apprentissages académiques dès les premières années d'école élémentaire (mathématiques, lecture et écriture) et que le temps alloué aux activités physiques ou de motricité fine soit moindre. Fastame (2020) préconise de développer des outils d'observation à utiliser en contexte éducatif et de développer des programmes d'interventions pour renforcer le fonctionnement moteur et la réussite scolaire des élèves au développement atypique. Cette proposition peut être étendue à l'ensemble des enfants scolarisés qu'ils aient ou non un développement atypique tant les inégalités scolaires et les différences développementales peuvent être importantes au sein d'une classe dite ordinaire ou d'un dispositif d'inclusion (Kim et al., 2016 ; MacDonald et al., 2020).

Considérant l'importance de la motricité pour la réussite scolaire, il m'a semblé nécessaire d'étudier les environnements d'apprentissage contemporains et de comprendre comment les professionnels de l'éducation envisagent la place du système sensori-moteur dans les apprentissages scolaires. C'est en m'intéressant à l'acquisition de l'écriture manuscrite en milieu scolaire que le besoin d'étudier l'environnement d'apprentissage s'est manifesté.

2. L'acquisition de l'écriture manuscrite cursive chez l'enfant : notions théoriques fondamentales.

L'acquisition d'une écriture fluide, rapide et lisible est essentielle pour la réussite scolaire et la prévention des difficultés à l'école, non seulement parce qu'elle semble jouer un rôle décisif dans le renforcement des compétences en lecture et en écriture (Berninger et al., 2002; Medwell & Wray, 2008), mais aussi parce que les élèves ayant de faibles capacités d'écriture sont désavantagés tout au long de leur scolarité, en particulier lors des évaluations écrites (Rosenblum, Goldstand & Parush, 2006). En France, le système éducatif et culturel privilégie toujours fortement l'écriture cursive (Bara et al., 2016) cependant la production écrite peut aussi se faire sur support numérique (clavier, téléphone portable, tablette) soit de façon manuscrite (au stylet ou au doigt sur un écran) soit à partir d'un clavier.

2.1. Les caractéristiques du geste d'écriture manuscrite cursive

Les mouvements qui composent les gestes de l'écriture manuscrite présentent des aspects topocinétiques et morphocinétiques. La composante topocinétique permet l'agencement de formes dans l'espace graphique (respect du cadre de la feuille, déplacement sur une ligne, espace entre les lettres et les mots, retour à la ligne) alors que la composante morphocinétique

détermine l'ensemble des trajectoires qui guident la formation de chacune des lettres. Ces deux composantes assurent ainsi des aspects complémentaires du mouvement d'écriture, sur la base d'une construction progressive de représentations visuelles des lettres et de représentations motrices spécifiques à chacune des lettres. Chez le scripteur expert, alors que la composante topocinétique relève plutôt d'un mode de contrôle « rétroactif » basé sur les feedbacks sensoriels, la composante morphocinétique relève plutôt d'un mode de contrôle « proactif », basé sur les programmes moteurs (Zesiger, 1995). Au cours du processus d'apprentissage, ce sont d'abord les aspects morphocinétiques qui sont abordés puis lorsque les formes des lettres sont maîtrisées les aspects topocinétiques vont être progressivement acquis pour permettre une bonne liaison entre les lettres, un bon espacement entre les mots et un bon positionnement sur la ligne (Albaret, Kaiser & Soppelsa, 2013).

Le geste d'écriture cursive présente par ailleurs des caractéristiques de séquentialité et de continuité. En cursive, le tracé produit est caractérisé par un ordre spécifique des traits appelé ductus et qui se traduit par une certaine "grammaire de l'action " (Goodnow & Levine, 1973). Cette stricte séquentialité s'observe aussi lors d'exercices de copie de formes géométriques (Goodnow & Levine, 1973 ; Vinter & Marot, 2003), d'écriture d'idéogrammes (Flores d'Arcais, 1994), de caractères latins (Parkinson et al., 2010 ; Simner, 1981 ; Viviani & Stucchi, 1992) ou de caractères romains (Velay & Longcamp, 2013). Si certaines règles sont communes à tous les types de production graphique, comme (a) commencer à gauche et (b) commencer par le haut, d'autres sont spécifiques à certains systèmes d'écriture et sont introduites pour faciliter la fluidité du mouvement, comme (c) produire des boucles et des cercles dans le sens inverse des aiguilles d'une montre en écriture cursive et (d) pour les droitiers, produire des traits horizontaux de gauche à droite (Goodnow & Levine, 1973). Ces régularités spatio-temporelles sont acquises avec l'apprentissage formel de l'écriture manuscrite (Wong & Kao, 1991). En France, la séquentialité de l'ordre des traits en écriture cursive semble s'établir progressivement chez les enfants, principalement au cours du CP (Vinter & Chartrel, 2010). Il convient de rappeler que la séquentialité de l'ordre des traits est considérée comme un élément facilitateur dans le processus d'encodage de la mémoire (Parkinson et al., 2010).

Le mouvement d'écriture, comme le mouvement de dessin, est également caractérisé par un principe de continuité, qui limite le nombre de pauses produites au cours du geste (Goodnow & Levine, 1973). Pour le scripteur expert, par exemple, l'écriture harmonieuse produite dans un mouvement continu implique la mise en œuvre de stratégies optimales, qui auront nécessité, notamment, de rassembler en mémoire un certain nombre de petites unités (les traits) pour

former des unités de plus haut niveau (lettres, syllabes ou mots). Ce processus de découpage est censé permettre de déclencher les programmes moteurs correspondant aux unités de haut niveau, ce qui facilite ensuite le processus d'automatisation (Lambert & Espéret, 1997 ; Kandel, Hérault, Grosjacques, Lambert, & Fayol, 2009). Cette économie cognitive se traduit par une réduction du nombre de pauses intra-mots. Paz-Villagràn, Danna et Velay (2014) ont proposé de distinguer deux types de pauses : les arrêts et les levers de crayon (respectivement, stop et lift dans la littérature anglo-saxonne). Les levers sont caractérisés par le fait que le stylo n'est plus en contact avec le papier. Les arrêts font plutôt référence à une discontinuité de l'activité graphomotrice alors que le crayon est toujours en contact avec la surface graphique (la vitesse de tracé est alors nulle). Ces arrêts sont traditionnellement interprétés en psychologie comme l'indicateur d'une activité cognitive (Foulin, 1995). Ce n'est que récemment que la recherche a commencé à étudier les arrêts, afin de comprendre leur signification et leur trajectoire développementale pour les enfants avec et sans troubles d'apprentissage (Brun-Hénin, Velay, Beecham & Cariou, 2013 ; Maldarelli, Kahrs, Hunt & Lockman, 2015 ; Paz-Villagràn, Danna & Velay, 2014 ; Prunty, Barnett, Wilmut & Plumb, 2014). Si les arrêts sont trop nombreux ou trop longs, ils peuvent s'avérer être la conséquence d'un faible niveau d'attention visuelle (Maldarelli et al., 2015) ou de difficultés motrices (Paz-Villagràn et al., 2014 ; Prunty et al., 2014). Les chercheurs ont observé une réduction significative de la durée moyenne des arrêts entre l'âge de 8 et 14 ans (Zesiger, 1992, Prunty et al., 2014 ; Alamargot, Plane, Lambert, & Chesnet, 2010). De plus, Zesiger (1992) a noté qu'entre 8 et 12 ans ainsi qu'à l'âge adulte, 80 à 90% des arrêts sont situés à la jonction entre deux traits et que les arrêts intra traits sont rares. Cette capacité progressive à contrôler le mouvement sur la base d'une représentation interne permettrait aux enfants de produire un mouvement d'écriture relativement rapide et continu à la fin de l'école primaire.

2.2. L'acquisition du geste d'écriture manuscrite : modèles et repères

Au cours du premier chapitre, nous avons vu que lors d'un apprentissage moteur, le contrôle et la modification des mouvements sont rendus possibles par la prise en compte i) des différents feedbacks sensoriels qui interviennent pendant la production motrice mais également par ii) la connaissance que l'apprenant obtient concernant la réussite ou l'échec de son mouvement par rapport à son intention initiale (*i.e.*, connaissance du résultat) (Schmidt, 1975). Selon la théorie plus contemporaine des modèles internes de l'action, les informations sensorielles jouent un rôle essentiel dans l'apprentissage et le contrôle moteur (Wolpert & Flanagan, 2001 ; Wolpert & Kawato, 1998). Cette théorie distingue deux modèles internes du mouvement : le modèle

inverse et le modèle direct. Le modèle inverse génère les commandes motrices appropriées permettant d'atteindre le mouvement désiré. Celles-ci sont alors transmises aux effecteurs musculaires afin que le mouvement soit réalisé, mais également au modèle direct sous la forme d'une copie d'efférence. Le modèle direct utilise alors cette copie d'efférence afin de prédire les conséquences sensorielles du mouvement à venir. Cette prédiction des conséquences sensorielles alimente un comparateur qui reçoit également les feedbacks sensoriels issus du mouvement en cours. Le résultat de la comparaison entre le retour sensoriel réel et le retour sensoriel prédit permet de détecter si une « erreur » s'est produite pendant la réalisation du geste. Si tel est le cas, les corrections nécessaires sont apportées pour ajuster les commandes motrices. En conséquence, ces modèles directs jouent un rôle important pour corriger rapidement les mouvements en cours d'exécution mais aussi dans l'apprentissage moteur en transformant les erreurs détectées entre les informations sensorielles réelles et les informations sensorielles prédites en signaux moteurs correspondants (Wolpert & Ghahramani, 2000).

La progression développementale observée dans le contrôle du geste graphomoteur au cours de l'enfance et de l'adolescence laisse supposer que l'automatisation du geste d'écriture reposerait sur la capacité des enfants à construire, mémoriser et utiliser des modèles internes de l'action.

- Avant 5-6 ans, les traits qui composent les premiers essais d'écriture ou de dessin sont effectués avec des mouvements balistiques. Les mouvements sont rapides et l'enfant est alors assez peu capable d'intégrer les différentes informations visuelles et proprioceptives qui lui parviennent pour corriger son geste en cours d'exécution (Meulenbroek & van Galen, 1988).
- Entre 6 et 8 ans, le traitement des feedbacks sensoriels joue un rôle important dans la réalisation du geste graphique. La dépendance aux informations sensorielles mobilise fortement les ressources attentionnelles des scripteurs qui seront alors principalement allouées au contrôle du geste graphomoteur au détriment des autres aspects de la production écrite (orthographe et rédaction) (Alamargot, 2007). Lors des premières étapes d'un apprentissage moteur, le contrôle du geste s'effectuerait essentiellement à partir de l'utilisation des informations visuelles mais peu des informations proprioceptives (Fleishman & Rich, 1963). En effet, la sensibilité proprioceptive ne serait pas pleinement mature avant l'âge de 7 ans (Laszlo & Bairstow, 1984) et les informations proprioceptives ne seraient pas encore mémorisées dans une représentation interne servant de référence pour l'exécution du mouvement (Fleishman & Rich, 1963).

- Vers l'âge de 10 ans et jusqu'à 14 ans, un équilibre s'opère entre les deux modes de contrôle proactif et rétroactif : l'écriture s'automatise, devient fluide et rapide, parfois au détriment de la lisibilité (Thibon, Gerber et Kandel, 2018 ; Zesiger et al., 2000).

L'écriture est une habileté motrice particulièrement complexe car elle comporte simultanément des aspects topocinétiques et morphocinétiques. La composante topocinétique permet l'agencement de formes dans l'espace graphique (respect du cadre de la feuille, déplacement sur une ligne, espace entre les lettres et les mots, retour à la ligne) alors que la composante morphocinétique détermine l'ensemble des trajectoires qui guident la formation de chacune des lettres. Ces deux composantes assurent ainsi des aspects complémentaires du mouvement d'écriture, sur la base d'une construction progressive de représentations visuelles des lettres et de représentations motrices spécifiques à chacune des lettres. Pour Zesiger (1995), chez le scripteur expert, la composante topocinétique relève plutôt d'un mode de contrôle « rétroactif » basé sur les feedbacks sensoriels tandis que la composante morphocinétique relève plutôt d'un mode de contrôle « proactif », basé sur les programmes moteurs. Au cours du processus d'apprentissage, ce sont d'abord les aspects morphocinétiques qui sont abordés puis lorsque les formes des lettres sont maîtrisées les aspects topocinétiques vont être progressivement acquis pour permettre une bonne liaison entre les lettres, un bon espacement entre les mots et un bon positionnement sur la ligne (Albaret, Kaiser & Soppelsa, 2013).

2.3. Le rôle des feedbacks sensoriels dans l'acquisition du geste d'écriture

Lors d'une activité d'écriture manuscrite, les feedbacks visuels et proprioceptifs ont des rôles différents et complémentaires (Danna & Velay, 2015). Le feedback proprioceptif (associant kinesthésie et perception tactile) renseigne sur les caractéristiques spatiales (trajectoire et longueur de trajectoire), cinématiques (vitesse, fluidité) et dynamiques (pression) des mouvements d'écriture. Il joue par conséquent un rôle déterminant pour prendre en charge les aspects morphocinétiques de l'écriture. En revanche, le feedback visuel est particulièrement important pour les aspects topocinétiques du mouvement d'écriture : il permet de contrôler la position des mots entre eux ou sur la ligne, la position des lettres au sein d'un mot ou encore la position des segments au sein d'une lettre.

Il existe un certain nombre d'études sur le contrôle moteur et l'utilisation du feedback dans l'écriture manuscrite des adultes et des enfants (pour une revue, Danna & Velay, 2015), cependant très peu d'entre elles concernent les enfants de maternelle (sauf Chartrel & Vinter,

2008). Le rôle des informations sensorielles dans le contrôle du geste d'écriture a été exploré en faisant varier la disponibilité des feedbacks sensoriels lors de tâches d'écriture (Alamargot & Morin, 2015 ; Chartrel & Vinter, 2006 ; Guilbert et al., 2018). Chartrel et Vinter (2006) ont ainsi montré qu'en l'absence de vision, le geste d'écriture est davantage impacté chez les enfants (augmentation de la vitesse d'écriture, de la taille du tracé, de la fluidité et de la pression exercée sur le stylo) que chez les adultes (seulement une augmentation de la pression). Bien que les scripteurs experts recourent moins aux informations sensorielles pour contrôler leur geste que les scripteurs novices, celles-ci continuent de participer à l'exécution des programmes moteurs. Par exemple, Guilbert et al. (2018) ont fait varier la disponibilité des feedbacks visuels (écrire la main cachée derrière un écran) et proprioceptifs (écrire sur un support lisse ou rugueux) lors d'une tâche d'écriture de lettres et de pseudo-mots auprès d'élèves de CE1, de CM2 et d'adultes. Quel que soit l'âge des participants, l'absence de retour visuel entraîne des modifications, tant du point de vue du mouvement (vitesse et amplitude) que de la trace produite (lisibilité). La réduction des informations proprioceptives induite par la surface lisse perturbe d'autant plus le geste lorsque les participants ne voient pas leur main et la trace produite. Ces perturbations sont cependant plus importantes pour les enfants que pour les adultes. Si les feedbacks continuent de participer au contrôle du geste graphomoteur chez les experts, ils ne sont cependant plus utilisés dans une fonction de guidage pas à pas de l'action mais dans une fonction d'ajustement et de correction des mouvements exécutés (Marquardt, Gentz, & Mai 1999 ; Wolpert & Flanagan, 2001). Finalement, remarquons que la modification (suppression, ajout ou distorsion) du feedback en situation d'apprentissage scolaire n'a pas été étudiée et la prise en compte des feedbacks dans les pratiques d'enseignement du geste d'écriture est relativement méconnue.

2.4. L'importance de la connaissance du résultat ou feedback extrinsèque

Une fois le mouvement exécuté, la connaissance du résultat (aussi appelé feedback extrinsèque) va permettre au scripteur de modifier les prochains gestes. Il semble important de préciser qu'un feedback sur le résultat peut provenir de différentes sources (un environnement numérique, l'enseignant, le parent, un pair, la tâche, le sujet apprenant lui-même) et qu'il peut avoir des effets positifs ou négatifs sur l'apprentissage (Hattie & Timperley, 2007). La typologie de Panadero & Lipnevitch (2022) identifie différentes fonctions (impacter l'apprentissage ou la performance, motiver le sujet, faciliter l'auto-régulation) et différents formats (immédiat ou différé, adaptatif ou non). L'efficacité des feedbacks proposés varie en fonction de leur

temporalité (un feedback immédiat est plus bénéfique qu'un feedback tardif) et par la nature de l'information fournie à l'apprenant (plus l'information est riche et précise, plus l'impact du feedback sera positif). Cependant, l'effet des feedbacks sur l'apprentissage ne peut pas être simplement conceptualisé comme un renforcement dans la mesure où une information donnée sur la performance du sujet est parfois acceptée, modifiée ou rejetée (Kulhavy, 1977). Panadero et Lipnevitch (2022) considèrent qu'on ne peut modéliser les effets des feedbacks qu'en considérant les caractéristiques du sujet apprenant. Dans le domaine des apprentissages moteurs et en comparant des sujets d'âges différents, les travaux de Sullivan, Katak, et Burtner (2008) confirment que les feedbacks n'ont pas le même effet selon les caractéristiques des apprenants ; les auteurs préconisent d'examiner les bénéfices des feedbacks en fonction du niveau initial des apprenants dans le domaine d'apprentissage concerné.

Dans le domaine de l'écriture manuscrite, le scripteur peut estimer lui-même l'adéquation entre la qualité du tracé produit (et/ou du geste) et le modèle à réaliser, il peut aussi la recevoir d'un pair, d'un enseignant ou d'une application pour tablette. Le feedback fournit par autrui peut être immédiat (*e.g.*, si l'enseignant est à côté de l'enfant au moment de la réalisation du geste), il peut alors porter sur le geste lui-même et sur sa conséquence en termes de trace produite ou peut être différé et dans ce cas il ne portera que sur la trace laissée sur le papier. Il faut par ailleurs observer que la connaissance du résultat peut être également délivrée explicitement par l'enseignant sous forme de feedback verbal (*e.g.*, la lettre doit monter plus haut) ou visuel (*e.g.*, l'enseignant signale une erreur en l'entourant). Soulignons avec Panadero et Lipnevitch que le but d'un apprentissage est d'amener l'apprenant à devenir autonome quant à sa capacité à recueillir et à traiter l'information sur le résultat de son action. Sur ce point, la capacité de l'enfant à s'auto-évaluer en situation d'écriture a été assez peu investiguée. Dans le champ de la rééducation, le fait d'engager l'enfant dysgraphique à s'auto-évaluer présente un intérêt avéré (Puyjarinet, 2019) mais cela ne signifie pas que le jeune scripteur qui ne présente pas de trouble d'écriture recourt spontanément à l'auto-évaluation.

2.5. Relation perception -action, apprentissage implicite et acquisition du geste d'écriture.

Les chercheurs qui s'intéressent à la composante graphomotrice de l'écriture admettent généralement que l'organisation spatio-temporelle des tracés et la taille des programmes moteurs se modifient sous l'influence conjointe de la maturation de la motricité et de l'apprentissage formel de l'écriture principalement organisé en contexte scolaire (Alamargot &

Morin, 2019 ; Bonneton-Botté, Guilbert et Bara, 2019). Des recherches ont aussi montré qu'il était toutefois possible d'obtenir une modification de la grammaire de l'action par le biais d'une observation répétée ou d'apprentissage implicite chez l'adulte (Babcock & Freyd, 1988 ; Vinter & Perruchet, 1999 ; Weeks & Anderson, 2000) comme chez l'enfant (Vinter & Perruchet, 2000, 2002). S'intéressant aux modalités d'apprentissage, Vinter et Chartrel (2010) ont démontré le bénéfice d'un entraînement visuel (présentation visuelle répétée sur un écran du tracé dynamique d'une lettre) sur la qualité du tracé de lettres cursives produites par des enfants âgés de 5 ans et demi. Constatant la supériorité de l'entraînement visuel sur l'entraînement moteur, les auteurs supposent que les sujets du groupe entraînement visuel ont extrait de la présentation dynamique, l'information relative à la trajectoire du tracé. Dans cette expérience, l'apprentissage de la trajectoire se réalisait par l'observation et sans que l'attention des sujets ne soient orientée sur cette propriété du modèle présenté. L'idée du principe d'auto-organisation dans l'élaboration des représentations cognitives (Perruchet, Vinter & Pacton, 2007) permettrait selon les auteurs d'appréhender ce résultat comme l'effet d'un apprentissage implicite. Dans cette conception, le sujet confronté à des régularités environnementales n'aurait pas besoin d'être doté d'une intention d'apprendre pour élaborer des représentations cognitives isomorphes au monde réel. Ce modèle de l'apprentissage ne semble pas en contradiction avec les propositions de Karmiloff-Smith (1992) qui conçoit le développement comme une succession de redescriptions représentationnelles à l'intérieur de domaines de connaissances spécifiques. Dans ce modèle, des informations, directement transmises par l'environnement ou extraites par l'enfant suite à une confrontation répétée à certaines régularités environnementales, sont utilisées pour mettre en œuvre des procédures puis transformées en connaissances de plus en plus explicites et accessibles à la conscience. Ainsi, au cours du développement, les informations deviendront connaissances d'abord implicites (les procédures graphiques pour le dessin et l'écriture sont différentes) puis explicites mais non conscientes (l'enfant peut trier des productions relevant du dessin ou de l'écriture mais sans pouvoir justifier son tri) pour finalement devenir, pour certaines d'entre elles, explicites et verbalisables (Karmiloff-Smith, 1992). L'existence d'apprentissage implicite au cours duquel la simple observation incidente d'une caractéristique du mouvement d'écriture impacterait la programmation motrice de ce même mouvement souligne l'influence de la perception visuelle sur les caractéristiques spatio-temporelles du mouvement d'écriture. Comme le soulignent Parkinson et al. (2010) les interactions entre perception et action sont bidirectionnelles : la perception d'une séquence motrice engage le codage de l'action, celui-là en retour affecte la perception en créant une attente du résultat visuel que produira cette même action. Cette

conception fait écho au rôle du schéma de reconnaissance de Schmidt (1975) qui modélise le rôle des informations extéroceptives dans le processus de perfectionnement des programmes moteurs. Ces dix dernières années, les données empiriques se sont multipliées pour tenter de comprendre le lien entre la perception de l'action et les informations provenant du système moteur. Ces recherches ont abouti à l'élaboration d'une théorie motrice de la perception qui défend l'idée qu'une même représentation motrice serait utilisée pour percevoir une action ou exécuter cette même action (Liberman & Mattingly, 1985 ; Rizzolatti, 2005 ; Jeannerod, 1994). Dès l'âge de 7 ans, Bidet-Ildei, Méary et Orliaguet (2006) observent une préférence visuelle pour des actions qui respectent la régularité spatio-temporelle caractéristique du mouvement biologique. Selon eux, différents mécanismes peuvent être évoqués pour expliquer ces résultats : soit il existerait une forme de résonance entre les systèmes perceptifs et le système moteur, soit le sujet produirait une simulation interne du mouvement observé, soit enfin il existerait un système miroir permettant la mise en relation de la perception et de l'action. Cette dernière hypothèse entre en résonance avec la découverte des neurones miroirs qui présentent une activation lorsqu'une action est réalisée et lorsque cette même action réalisée par autrui est observée par le sujet (Rizzolatti, 2005). S'il est acquis aujourd'hui que le sujet observe et interprète un mouvement en utilisant son système moteur, le degré d'influence du système moteur sur la perception visuelle a été moins étudié. La question se pose de savoir si le niveau de développement moteur ou le degré d'expertise motrice dans un domaine agit comme une contrainte au cours d'une tâche perceptive. Ainsi pour Louis-Dam et al. (2000) et pour Bidet-Ildei et al. (2006), le niveau de perception des caractéristiques spatio-temporelles d'un mouvement biologique dépend du niveau de développement moteur du sujet. Certaines données issues de recherches en neurosciences vont aussi dans ce sens. Pour exemple, Calvo-Merino, Glaser, Grezes, Passingham, et Haggard (2006) analysent l'activité cérébrale de sujets en train d'observer des actions faisant ou non partie de leur répertoire moteur (danse classique versus capoeira versus contrôle non expert en danse). Ils montrent que les profils de réponses cérébrales des observateurs dépendent de leur expertise motrice dans le domaine observé. Les auteurs observent des activations bilatérales plus importantes dans le cortex prémoteur, le sillon intrapariétal, le lobe pariétal supérieur droit et le sillon temporal supérieur postérieur gauche lorsque des danseurs experts regardent des mouvements sur lesquels ils ont été entraînés comparativement à des mouvements sur lesquels ils n'ont pas été entraînés.

Appliqué au domaine de l'apprentissage de l'écriture manuscrite, ce champ de recherche ouvre de nouvelles perspectives. Ainsi, certains auteurs se questionnent-ils sur le rôle des

représentations motrices dans la perception et l'identification des lettres. Velay, Longcamp et Zerbato-Poudou (2004) citent l'exemple du Ku-sho, une écriture dans l'air réalisée avec le doigt, mise en œuvre par les japonais lorsqu'ils n'arrivent plus à retrouver la signification d'un idéogramme en situation de lecture. Dans cette situation, la connaissance motrice de la séquence ordonnée des traits permet une activation de la connaissance conceptuelle. Ce résultat n'est pas sans rappeler celui déjà cité précédemment de Parkinson et al. (2010) montrant que la mémoire de l'ordre des traits facilite chez le sujet adulte l'identification de cette même lettre en situation de lecture. Les données cliniques permettent aussi d'éclairer le rôle du mouvement et des représentations motrices sur la représentation de l'écrit en montrant comment des patients alexiques sont en mesure de reconnaître une lettre dès lors qu'ils sont autorisés à l'écrire ou à la tracer du doigt (Bartolomeo, Bachoud-Lévi, Chokron, & Degos, 2002). Pour Velay et al. (2004), l'ensemble de ces données, permet de considérer que la représentation des lettres repose sur un réseau plurimodalitaire dont l'une des composantes serait de nature sensori-motrice : *« Ce réseau se mettrait en place pendant l'apprentissage simultané de la lecture/écriture. En effet, pendant cette période, les enfants qui apprennent la lettre « a » par exemple associent sa forme visuelle avec le son [a] et le mouvement qui permet d'écrire le « a » »* (Velay et al., 2004 ; p.73).

Longcamp et al. (2005) constatent que les enfants de deuxième année d'école maternelle qui ont appris à écrire les lettres manuellement les reconnaissent mieux visuellement et les mémorisent mieux à long terme que les enfants qui les ont appris en les tapant sur un clavier d'ordinateur. Pour Bara et Gentaz (2004, 2007, 2010), un entraînement au geste moteur de l'écriture et une exploration haptique de lettres en relief dans le sens de l'écriture, permet d'améliorer la perception visuelle des lettres et le décodage. Ces études alimentent donc l'hypothèse de l'influence du système moteur sur la perception visuelle.

Les travaux qui se sont intéressés aux relations qui existent entre perception des lettres et motricité d'écriture chez l'enfant proposent le plus souvent aux sujets d'observer un modèle d'écriture statique, généralement dans l'objectif de vérifier l'impact positif de l'activité motrice sur ces capacités de lecture. Une étude déjà mentionnée précédemment, celle de Chartrel et Vinter (2010) a montré que la présentation du tracé dynamique de la lettre lors d'un entraînement avait un effet bénéfique sur les performances graphomotrices des enfants âgés de 5 ans et demi lorsqu'il s'agissait ensuite de reproduire les lettres présentées. Pour expliquer l'effet bénéfique du modèle dynamique de la lettre, les auteurs supposent que la trajectoire tracée est une information traitée par le sujet au cours de l'observation puis transférée lors de la production motrice. Cette interprétation reste hypothétique et des recherches

complémentaires nous semblent nécessaires pour savoir ce que les enfants perçoivent et connaissent les caractéristiques du mouvement d'écriture cursive avant même d'apprendre à écrire.

2.6. Potentialités et limites des outils numériques et de l'intelligence artificielle pour apprendre à écrire.

Les Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain (EIAH) peuvent soutenir les apprentissages en permettant une instruction individuelle (Berninger et al., 2015 ; Bonneton-Botté et al., 2020 ; Simonet, Anquetil, & Bouillon, 2017) et en étayant le processus d'apprentissage et d'enseignement via des feedbacks en temps réel fournies par l'environnement informatique (Van Der Kleij, Feskens, & Eggen, 2015). Comme nous l'avons vu précédemment, l'habileté à écrire en manuscrit est longue et complexe à acquérir, en quoi les technologies numériques pourraient-elles faciliter cet apprentissage ?

En permettant l'écriture manuscrite, les tablettes équipées de stylet associées à des applications dotées d'intelligence artificielle présentent un intérêt certain pour soutenir l'enseignement et l'apprentissage de la langue écrite (Bonneton-Botté et al., 2019). Cependant, les résultats des études sur les bénéfices des tablettes pour l'écriture cursive sont assez rares et contradictoires. Certaines recherches réalisées sur des temps courts (quelques heures) ont montré que la différence de friction entre les supports papier et tablette perturbe les stratégies graphomotrices des enfants et des adultes (Alamargot & Morin, 2015 ; Gerth et al., 2016) tandis que d'autres études observent des résultats positifs sur l'apprentissage du tracé de lettres au stylet (Jolly, Palluel-Germain & Gentaz, 2013) ou au doigt (Patchan & Puranik, 2016). Une revue critique sur l'efficacité des tablettes à l'école met en évidence un manque d'études rigoureuses mesurant les résultats d'apprentissage, et d'évaluations impliquant l'utilisation de la technologie des tablettes par les praticiens et leurs élèves sur une période de temps relativement soutenue (Haßler, Major, & Henessy, 2015).

L'intelligence artificielle (IA) est un ensemble de techniques basé sur des algorithmes qui permet à l'élève d'avoir un retour sur son apprentissage et d'avoir un parcours d'apprentissage adapté à son niveau grâce à un système de tutorat intelligent. Utilisée en classe, cette même IA peut aussi guider l'enseignant par des outils d'aide à la décision. Elle peut collecter un large volume de données pour les analyser, facilitant ainsi l'acquisition de compétences tout en respectant le rythme de chaque élève. Pour exemple, considérant le niveau en orthographe et en graphomotricité d'un élève, une IA pourrait lui proposer de travailler des graphèmes complexes

mais sur des mots relativement courts dans un premier temps. La capacité de ces dispositifs technologiques à personnaliser les parcours d'apprentissage (Van Der Kleij et al., 2015) se double d'une capacité à fournir à l'apprenant des rétroactions (ou feedbacks) sur ses productions. Pour Hattie et Timperley (2007), le feedback se définit comme « *une information fournie par un agent (e.g., enseignant, pair, parent, soi, livre, un environnement informatique comme la tablette) concernant un aspect de sa performance* » (2007, p. 81). Quel que soit le domaine d'apprentissage considéré, les revues de questions et méta-analyses sur les EIAH soulignent le caractère bénéfique des feedbacks sur les apprentissages (Kuguet & De Nisi, 1996 ; Van der Kleij et al., 2015).

Si les applications intelligentes pour tablette offrent des opportunités pour soutenir l'apprentissage, les dispositions des professionnels de l'éducation à l'égard des nouvelles technologies pourraient constituer un frein, en termes d'acceptabilité, à l'utilisation des tablettes comme outil d'enseignement de l'écriture (Ferrière et al., 2012 ; Zhai et al., 2022). Cette disposition des enseignants à l'égard des environnements numériques s'est reflétée dans la réaction défavorable des médias en France suite à la décision du ministère finlandais de l'Éducation de rendre les cours d'écriture cursive non obligatoires et d'offrir l'apprentissage du clavier à la place, tout comme aux États-Unis (PBS Learning Media, 2015). Cela a suscité une controverse parmi les professionnels de l'éducation en France. De telles réactions fortes rappellent que le processus de conception de tels dispositifs devrait toujours être culturellement situé : Une étude française conduite sur l'enseignement de l'écriture cursive a révélé que les enseignants lui accordent une grande valeur et la plupart d'entre eux estiment que les outils informatiques pédagogiques ne doivent pas remplacer l'enseignement de l'écriture cursive (Baraud et al., 2017). Plus généralement et sur un plan international, une revue de questions réalisée sur l'intelligence artificielle en éducation, montre que les attitudes des enseignants peuvent osciller entre rejet et excès de confiance (Zhai et al., 2021). Selon les auteurs, les premiers rejettent généralement les nouvelles technologies par méconnaissance, les seconds présentent des attentes non réalistes ce qui peut aussi les conduire à une forme de déception.

La conception d'une technologie d'innovation numérique à visée pédagogique nécessite donc, pour être finalisée et efficace, que des études soient conduites dans le champ de la psychologie pour évaluer l'utilité, l'acceptabilité et l'utilisabilité de l'outil par les usagers (les enseignants et les élèves). Pour Tricot et al. (2003), l'utilité d'un environnement informatique pour les apprentissages humains (EIAH) renvoie à l'adéquation entre les objectifs d'apprentissage (de l'enseignant, du concepteur) et les objectifs réellement atteints ; l'utilisabilité renvoie à la

maniabilité de l'EIAH tandis que l'acceptabilité désigne la valeur de la représentation mentale (opinion, croyance et attitude positives ou négatives) associée à un EIAH. L'évaluation de ses trois dimensions d'un EIAH peut se faire au cours de la conception, en fin de conception (pour la maquette et le bêta-testing) et *a posteriori* (menée sur l'outil finalisé et réalisé) cependant certains auteurs (Nanard & Nanard, 1998) préconisent de mener l'évaluation en amont du processus de conception pour intégrer dès le début du processus de conception, les valeurs et besoins des futurs utilisateurs. Ainsi, en plus d'être utile et utilisable, un environnement numérique doit être acceptable au regard des besoins des institutions, des apprenants et des enseignants (Boissiere, Fau & Pedro, 2013 ; Ferrière et al., 2012 ; Tricot et al., 2003 ; Amadiou & Tricot, 2014). Dans le cas contraire, des dispositifs utiles et bien conçus peuvent ne pas trouver leur place pour des raisons d'acceptabilité (Amadiou & Tricot, 2014). Par conséquent, la compréhension des conditions d'acceptabilité des enseignants pour l'utilisation d'une tablette numérique pour apprendre à écrire est une question clé dans le processus de conception des outils d'enseignement-apprentissage à l'école élémentaire.

2.7. Conclusion et perspectives de recherche pour une psychologie de l'éducation incarnée

La conception de la cognition certainement la plus répandue aussi bien en psychologie que dans le champ de l'éducation est héritée d'une philosophie dualiste qui d'une part se méfie des sens (Aristote, 344-322 Avant J-C) et d'autre part attribue à l'esprit une forme de supériorité quant à la capacité à produire de la connaissance (Descartes, 1596-1650). Les pratiques d'enseignement contemporaines et *a fortiori* la forme scolaire sont généralement empreintes de ces conceptions. Dans les programmes de l'Éducation nationale, le corps est présenté comme un instrument pour apprendre au cours de l'école maternelle mais pas au-delà et la contribution du corps aux apprentissages n'y est jamais réellement explicitée. Le bulletin officiel du 24 juin 2021 dédié à l'école maternelle évoque le corps à différentes reprises pour rappeler la nécessité d'apprendre à contrôler ou à maîtriser sa motricité (p.13). La motricité de l'enfant est généralement présentée à la fois comme un besoin physiologique de l'enfant mais aussi comme un potentiel facteur de perturbation pour l'apprentissage, une expression motrice et émotionnelle dont il faut tenir compte pour mieux la canaliser. Le paragraphe 2 du bulletin officiel intitulé « Agir, s'exprimer, comprendre à travers l'activité physique » met l'accent sur l'importance de l'activité physique pour l'éducation à la santé, le respect de soi et des autres. La motricité est associée à des temps spécifiques d'activités artistiques et sportives avec des préconisations précises : « *Le besoin de mouvement des enfants est réel. Il est donc impératif*

d'organiser une séance quotidienne (de trente à quarante-cinq minutes environ, selon la nature des activités, l'organisation choisie, l'intensité des actions réalisées, le moment dans l'année, les comportements des enfants, etc.) » (BO, 2021 ; p.16). Le 27 Juillet 2022, ces préconisations d'étendent à l'école primaire avec la mise en place de 30 minutes d'activités physiques quotiennes à compter de septembre 2022 qui ont vocation à lutter contre la sédentarité et favoriser le bien-être de l'enfant (MENJ, note de service du 27/07/2022). Une recherche du terme « corps » dans les programmes de 2015 des cycles 2, 3 et 4 indique que l'évocation du corps est restreinte aux domaines des activités artistiques et sportives (MENJ, BO, 2015). Ainsi, qu'il s'agisse de l'école primaire ou maternelle, le corps n'est jamais présenté aux enseignants et aux parents comme un vecteur essentiel d'accès aux savoirs fondamentaux. En conséquence, la norme sociétale produite par ces instructions induit qu'un enfant qui se conduit comme un élève pratique une activité physique régulière et apprend en restant assis, en verbalisant et en écrivant, le langage apparaissant comme le moyen ultime d'accéder aux savoirs fondamentaux que sont la lecture, l'écriture ou le calcul. En psychologie, l'approche computationnelle aussi riche et productive soit elle, a produit un modèle de la connaissance qui ne laisse que peu de place au corps comme support de la cognition. L'émergence d'un modèle de cognition incarnée et située et l'importance de la simulation de l'action pour connaître et se remémorer m'ont conduit à me questionner d'une part sur le rôle des environnements scolaires d'apprentissage et d'autre part sur le rôle du système perceptif et moteur pour les apprentissages fondamentaux que sont l'écriture et les premières habiletés numériques. Les travaux qui sont présentés dans les chapitres suivants font état de résultats obtenus et se veulent une contribution à la réflexion qui doit être menée conjointement par la psychologie et les acteurs de la communauté éducative pour faire interroger la forme scolaire traditionnelle et explorer de possibles variations.

3. Le rôle du contexte dans les apprentissages scolaires

3.1. Une écologie de l'apprentissage qui impacte le développement

3.1.1. Les outils conceptuels pour penser les relations entre développement et apprentissage

L'apprentissage est l'ensemble des mécanismes qui permet l'acquisition de savoirs et de savoir-faire. Apprendre dans le domaine moteur, écrit Schmidt (1982), c'est apprendre les propriétés méconnues de son corps, et l'on pourrait ajouter dans une perspective écologique, apprendre les propriétés méconnues de son corps lorsqu'il interagit avec les éléments du milieu qui le contient. La psychologie du développement renvoie à l'étude du changement, elle tente de saisir

les moyens par lesquels un sujet acquiert ou transforme ces connaissances. S'il est reconnu que l'environnement joue un rôle majeur dans ce processus d'acquisition ou de transformation des connaissances, l'étude systématique de l'écologie de l'apprentissage scolaire par la psychologie reste rare et relativement méconnue probablement du fait de l'influence Piagétienne. Cette lacune est probablement due aussi à la complexité méthodologique de l'approche écologique : mesurer le rôle du milieu et du contexte dans un apprentissage appelle le déploiement d'une démarche comparative qui n'est matériellement pas simple à mettre en œuvre. Prendre en compte l'écologie d'un apprentissage consiste selon Bril (2002) à analyser les éléments du milieu dans lequel se déroulent les acquisitions (en décrivant notamment l'environnement physique et social, les pratiques et valeurs qui gouvernent l'éducation).

A la jonction entre les préoccupations de la psychologie et de l'anthropologie, le rôle de l'environnement conçu comme berceau des acquisitions a été théorisé notamment par Super et Harkness (1986) grâce au concept de niche de développement. La niche de développement ou niche écologique émerge d'une interaction entre trois dimensions : l'environnement physique et social, les croyances (par exemple relative à l'éducation, au développement ou aux apprentissages) aussi appelées ethnothéories, et les habitudes et techniques de transmission. De l'interaction entre ces trois composantes émergent les spécificités d'un milieu et les potentialités de transformation du sujet. Pour opérationnaliser le concept de niche de développement, Reed et Bril (1996) proposent le concept d'espace d'actions encouragées qui est l'actualisation de la niche de développement, à un moment précis et pour un sujet donné. Si l'espace d'action libre représente l'ensemble des potentialités d'action d'un sujet dans un environnement, l'espace d'action encouragée représente, la mise à disposition, l'organisation d'activités, d'objets (au sens large), de lieux qui peuvent orienter et augmenter les potentialités d'action du sujet et par conséquent ses capacités d'action. C'est à partir d'une description et d'une comparaison des espaces d'actions encouragées que Bril (2012) analyse l'écart développemental observé entre les jeunes enfants Africains et Européens au niveau du développement postural (accès à la marche), les mères Africaines suscitant plus fréquemment les expériences sensori-motrices chez leur bébé notamment au travers de rituels culturellement valorisés et partagés (massage, étirement, manipulation, portage). Les espaces d'action encouragées permettent de comprendre comment l'environnement humain et matériel dans une culture ou un contexte donné s'organise pour rendre possible les occasions d'action (Reed & Bril, 1996). La notion de possibilité réfère au concept d'affordance de Gibson (1979). Si l'environnement offre des possibilités, le sujet a à s'en saisir. L'affordance désigne la perception par le sujet de ce que l'environnement offre

comme possibilité d'actions dans une situation donnée. Concernant l'espèce humaine, les êtres humains sont des vecteurs déterminants de la transmission des affordances. Le jeune enfant se développe et apprend dans son milieu familial mais aussi très rapidement, l'école maternelle étant proposée dès l'âge de trois ans (voire deux ans par exemple en France), en milieu scolaire. Nous envisagerons l'école, et plus particulièrement le système scolaire français (*i.e.*, à comprendre ici comme un système d'interactions entre des acteurs, des politiques, des instructions officielles), comme un élément déterminant de l'espace d'actions encouragées de l'enfant. A travers le prisme de l'espace d'actions encouragées, trois études ont été menées afin d'analyser certains aspects du contexte scolaire français qui pourraient impacter le développement et les apprentissages des élèves français. Ma démarche n'a pas consisté à engager une méthodologie comparative et systématique des niches de développement comme le firent des chercheurs de la psychologie culturelle mais à se référer aux outils conceptuels de la psychologie culturelle pour caractériser les espaces d'actions encouragées en milieu scolaire des populations auprès desquelles nous avons mené des recherches quasi-expérimentales ou des recherches interventionnelles. Il s'agira à la fois de souligner la nécessaire contextualisation des résultats de recherches de la psychologie de l'éducation et de montrer que c'est cette volonté de contextualisation qui a permis de faire émerger les problématiques qui ont structuré mon parcours de recherche.

L'espace d'actions encouragées possède selon Bril (2002) quatre caractéristiques i) une action peut être plus moins encouragée ou prohibée (*e.g.*, utiliser une tablette pour apprendre, écrire en cursif, utiliser ses doigts pour calculer) ii) certaines affordances sont plus ou moins disponibles dans l'environnement (*e.g.*, la variabilité des outils scripteurs disponibles conditionne la variété des informations proprioceptives traitées par l'enfant) iii) en fonction des sociétés, des règles sur les rôles à tenir par les protagonistes sont définies (*e.g.*, la conception du rôle d'enseignant peut limiter l'acceptabilité des outils numériques dotées d'intelligence artificielle) iv) L'organisation de l'espace d'actions encouragées varie en fonction de l'âge du sujet et de son niveau de développement ou de sa maîtrise de telle ou telle habileté (*e.g.*, le recours aux doigts toléré à l'école maternelle peut ne plus l'être à l'école élémentaire ; la diversité des outils scripteurs proposée en maternelle peut évoluer à partir de l'école élémentaire). S'il y a adéquation entre la zone proximale de développement de l'enfant et l'espace d'actions encouragées alors il peut y avoir de nouvelles possibilités d'action et l'opportunité d'exercer de nouvelles habiletés. La notion zone proximale de développement ou encore de zone proche de développement renvoie à la disparité entre le niveau de

développement de l'enfant évalué par sa capacité à résoudre des problèmes en autonomie et le niveau de développement qu'il peut atteindre lorsqu'il collabore avec un pair ou un adulte (Vygotski, 1985).

Dans le domaine des habiletés grapho-motrices associées à l'écriture cursive, deux études ont été menées en France afin i) de mieux connaître les représentations et pratiques des enseignants concernant les difficultés d'acquisition de l'écriture cursive chez les élèves de cours préparatoire et d'objectiver leurs conceptions en associant à une démarche de questionnaire, une évaluation des performances de leurs élèves (Bonneton-Botté & De La Haye, 2009) et ii) d'identifier les pratiques et représentations des enseignants concernant plus spécifiquement la place de la motricité dans l'acquisition de l'écriture cursive qui débute au cours de la grande section et s'achève généralement à l'école élémentaire (Bonneton-Botté, Beucher-Marsal, Bara, Muller, Le Corf, Quéméneur, & Dare, 2019). Cette dernière étude produite avec des enseignantes a été menée en amont d'un processus de conception d'une application intelligente pour tablette dédiée à l'écriture manuscrite. Elle visait à mieux connaître l'environnement matériel des enseignants (notamment du point de vue du numérique), leurs contraintes professionnelles et leurs besoins en matière d'enseignement de la cursive.

3.1.2. L'acquisition de la cursive au CP : pratiques et représentations des enseignants, pour quels espaces d'actions encouragées ? (Étude 1)

Cette première étude (Bonneton-Botté & De La Haye, 2009), menée dans le cadre d'un groupe d'innovation et de recherche financé par l'IUFM, est une recherche participative de type recherche action qui a impliqué des enseignants-chercheurs, des formateurs, des enseignants de premier cycle, des conseillères pédagogiques. L'objectif principal était de caractériser les espaces d'actions encouragées dédiés à l'acquisition du geste d'écriture cursive et plus spécifiquement d'identifier des pratiques et des représentations associées à la difficulté d'acquisition du geste d'écriture chez des élèves de cours préparatoire. Le questionnaire proposé à 33 enseignant.es de première année d'école élémentaire était composé de 16 questions. Les questions correspondaient à 3 blocs correspondant i) à l'identité du répondant et à son parcours professionnel ii) aux pratiques de classe et aux outils utilisés iii) aux représentations liées à l'acquisition et aux difficultés d'acquisition du geste d'écriture cursive.

La déclaration des pratiques indique que 50 % des enseignants ne déterminent pas une progression³ personnelle pour la mise en œuvre de cet apprentissage. Ce sont les enseignants qui ont la plus grande expérience du cours préparatoire qui tendent à recourir plus fréquemment à une progression (Chi-deux = 3,59, ddl1, $p < .06$) et ceux qui ont recours à une progression sont aussi ceux qui ont les durées moyennes hebdomadaires d'apprentissage les plus longues ($F = 4,76$; $p < .04$). Sur la question de la durée hebdomadaire allouée à cet apprentissage, une analyse descriptive révèle une grande diversité de réponses (de 15 minutes à 1h30). 35% des enseignants déclarent recourir à un outil pédagogique ou à un manuel pour guider sa mise en œuvre. Les outils scripteurs utilisés ont été, dans 80,6% des réponses, jugés « traditionnels » dans la mesure où la tenue de l'outil scripteur varie peu entre les outils (stylos, feutres, craies, crayon graffite) et « originaux » dans 9,7% des cas (outil pointu non encreur, doigt, plume, pinceau, éponge).

A la question : « Comment réalisez-vous vos évaluations ? ». Tout d'abord, une grande majorité déclare évaluer l'écriture (93,5 %). 57,7% d'entre eux évaluent la qualité en se basant sur la production graphique (forme, taille, lisibilité) tandis que 27,6 % se basent sur le geste (sens du tracé, fluidité, rapidité) et la production graphique. 3,4% des enseignants ne se basent que sur le geste et 17,2% ont répondu à cette question en orientant leur réponse sur le rythme d'évaluation (en précisant le rythme : évaluation quotidienne, trimestrielle...).

Nous examinerons les caractéristiques des espaces d'action que suggèrent ces données à partir des propositions de Bril (2002) notamment pour comprendre ce qui semble encouragé ou prohibé.

L'absence de progression personnelle pour la moitié des enseignants associée à de faibles durées d'enseignement peut laisser supposer que les attentes concernant l'apprentissage de l'écriture des enseignants sont assez peu explicites, différenciées et organisées pour tenir compte de la diversité des besoins des élèves et de leurs différences développementales. En l'absence de progression et lorsque les durées d'enseignement sont relativement courtes, certaines composantes des habiletés grapho-motrices risquent inéluctablement de ne pas être enseignées ou suffisamment entraînées chez certains élèves. Au cours préparatoire (CP), la possibilité pour les élèves d'expérimenter une diversité d'outils scripteurs et par conséquent d'exercer ses habiletés grapho-motrices en variant le contexte d'exercice est assez faible si l'on en juge par le nombre d'outils scripteurs traditionnels utilisés en CP. Enfin, l'analyse des

³ La progression est un document qui formalise l'organisation d'un enseignement. Structurée en séquences, elles-mêmes composées de séances, elle permet de faire apparaître les moyens mis en œuvre pour différencier les enseignements et pour tenir compte de la diversité des besoins et des rythmes d'acquisition dans la classe.

pratiques d'évaluation qui se fonde majoritairement sur la qualité de la production graphique indique que c'est la qualité de la trace écrite (sa conformité au modèle) qui est encouragée et recherchée plutôt que la fluidité ou la vitesse du geste graphique. Les réponses des enseignants révèlent une centration sur la forme à produire plutôt que sur le mouvement à produire ce qui impacte nécessairement la nature des feedbacks qui sont apportés aux élèves au cours du processus d'apprentissage.

Nous avons cherché à comprendre quand et sur quels critères, les enseignants établissaient l'existence d'une difficulté d'acquisition de l'écriture cursive. En premier lieu, 64 % des enseignants ont déclaré identifier les difficultés des élèves dès le premier trimestre ce qui peut paraître relativement précoce dans le processus d'apprentissage si l'on considère que l'apprentissage débute tout juste. Lorsqu'il est demandé aux enseignants d'identifier les difficultés les plus fréquentes, 72,4 % évoquent les difficultés à respecter le sens du tracé des lettres cursives (*i.e.*, la grammaire de l'action), 31% identifient des problèmes avec les liaisons et la fluidité du tracé, 24,1% pointent la tenue de l'outil, 27,6% le respect de la taille des lettres et des contraintes spatiales (ligne ou interligne).

A la question « Pourriez-vous identifier trois causes possibles expliquant ces difficultés », trois catégories de réponses ont émergé à partir d'une catégorisation réalisée *a posteriori*. Une première série de réponses identifie des causes « intrinsèques » à l'enfant (son environnement, ses capacités développementales) c'est-à-dire sur lesquelles les enseignants ne peuvent influencer directement (fatigue, crispation, mauvaise vision, niveau socio-culturel, problème psychologique, immaturité motrice et/ou posturale, problème de latéralité). Elles constituent 52,7% des réponses. La deuxième catégorie de réponses cible plutôt des causes extrinsèques (manque d'entraînement, mauvaise habitude, difficulté dans la correspondance graphème-phonème). Ce type de réponses, observées dans 16,66% des cas, identifie plutôt des causes sur lesquelles les enseignants seraient en mesure d'agir directement. Enfin, 22, 22% des réponses procèdent d'un raisonnement tautologique c'est-à-dire que les causes des difficultés sont les difficultés elles-mêmes (exemple, à la question « Selon vous, quelles sont les causes des difficultés précédemment évoquées ? », l'enseignant répond : non-respect du sens d'écriture). Enfin, 8,33% déclarent ne pas savoir.

En résumé, dans cette étude menée auprès d'enseignants de CP, plusieurs indicateurs (l'absence de progression personnelle, les faibles durées d'enseignement explicite de la cursive, la faible variabilité des outils scripteurs, les évaluations centrées sur la trace et non sur le geste, l'attribution causale externe en cas de difficulté) laissent entrevoir que, concernant

l'enseignement de l'écriture cursive, les actions encouragées sont relativement normées (écrire avec un stylo à bille bleu, le même interlignage pour l'ensemble des élèves, exigence d'une conformité du tracé produit au modèle...) ce qui limite probablement la possibilité de tenir compte de la diversité des rythmes du développement et des temporalités d'apprentissage au sein d'une classe. Cette première étude laisse entrevoir un espace d'actions qui n'encourage que peu en cours préparatoire l'exploration de différents supports et outils. Le mode d'évaluation majoritairement basé sur la trace, implique d'orienter l'attention de l'enfant sur la performance finale et non sur le geste ou sur les sensations proprioceptives qui ont conduit à cette trace. Cette photographie de l'enseignement de l'écriture cursive au XXIème siècle par les enseignants des cours préparatoires renvoie à des pratiques culturelles qui nécessiteraient d'être questionnées par les acteurs eux-mêmes : « *Les traditions ou pratiques éducatives évoquées ici sont des séquences de comportements mises en œuvre habituellement par les membres d'une communauté et si parfaitement intégrées dans la culture au sens large du terme qu'elles ne nécessitent pas de rationalisation individuelle particulière, et ne sont plus nécessairement conscientes* » (Super & Harkness, 1986, p. 555).

L'identification des pratiques et représentations des enseignants dans un domaine donné permet d'adapter la formation des enseignants, mais aussi de concevoir des dispositifs d'apprentissage voire de remédiation adaptés aux besoins des élèves (Do, 2007). Les résultats obtenus dans cette étude ont orienté notre attention sur la question du sens du tracé des lettres cursives qui apparaît comme une préoccupation significative des enseignants.

Des difficultés perçues aux difficultés objectivées

Dans le prolongement de ce questionnaire, une étude complémentaire (Bonneton-Botté & De La Haye, 2009) a été menée dans les classes de cette même population d'enseignants de CP (n=33), nous avons cherché à objectiver les difficultés perçues d'une part en demandant aux enseignants de situer les performances en écriture de leurs élèves sur une échelle allant de 1 à 3 (faible, moyenne, bonne) et d'autre part en évaluant les performances des élèves en écriture et en cherchant plus spécifiquement à préciser le nombre d'élèves concernés par des difficultés avec le sens⁴ de l'écriture cursive. 141 élèves de cours préparatoire, 65 filles et 70 garçons, scolarisés dans 8 classes différentes ont été rencontrés entre Avril et Juin 2006. Leur âge moyen était de 6 ans 8 mois (de 6 ans 1 mois à 8 ans). Parmi eux, 113 étaient droitiers et 22 gauchers (selon la main utilisée lors de la passation). Les élèves sont issus des écoles dans lesquelles

⁴ Nous entendons par respect du sens du tracé la capacité de l'apprenti scripteur à prendre en compte la direction et l'ordre imposé par l'enseignant dans l'agencement des traits qui composent la lettre.

nous avons rencontré les enseignants ayant répondu au questionnaire. Nous avons analysé les performances des élèves de cours préparatoire à l'aide du BHK, une échelle d'évaluation rapide de l'écriture (Charles, Soppelsa & Albaret, 2004). Cette échelle permet de calculer un indice de lisibilité (sur la base de 13 critères comme la taille des lettres, la forme des lettres...), un indice de rapidité (nombre de lettres tracées en 5 minutes) et propose un étalonnage récent d'élèves francophones scolarisés du CP au CM2. La tâche consiste pour les enfants à recopier un texte qu'ils ont sous les yeux. Lorsque 5 minutes se sont écoulées, l'expérimentateur note où en est arrivé l'enfant (mesure de rapidité). La qualité de la production est évaluée sur la copie des 5 premières lignes du texte (mesure de lisibilité). Nous avons également analysé le sens du tracé des lettres, à l'aide d'une grille d'observation du geste que nous avons élaborée. Comme le score de lisibilité, la qualité de la grammaire de l'action est évaluée à partir des cinq premières lignes du test BHK. Le nombre de lettres tracées dans le sens non conforme à celle de la grammaire de l'action attendue en écriture cursive. Le score moyen obtenu par l'échantillon aux BHK ($m = 10,3$; $ety = 5,08$) se situe dans la fourchette basse de l'étalonnage avec en revanche une production moyenne marquée par une rapidité élevée ($m = 78,9$; $ety = 29,4$). Six enfants présentant des scores inférieurs à deux écart-types de la moyenne de l'étalonnage ont été retirés de l'échantillon pour l'analyse des erreurs de sens. Sur les 135 enfants restants, le nombre d'erreurs de sens moyen est de 0,71 ($ety = 1,71$). Sur les 135 enfants, 41 sujets réalisent au moins une erreur de sens sur les 5 premières lignes du texte, ce qui constitue 30% de l'échantillon. Parmi eux, 12,6 réalisent deux erreurs de sens ou plus. Nous avons cherché à savoir si ces erreurs traduisaient d'autres difficultés. L'analyse de variance réalisée sur les trois groupes d'élèves constitués à partir du nombre d'erreurs de sens réalisé (0, 1 ou 2 et plus) montre une différence significative de la vitesse d'écriture ($F(2,132) = 3,98$; $p < .02$). Les enfants qui réalisent une erreur de sens ou plus sont significativement plus lents que les enfants qui n'en réalisent aucune. En revanche, les productions ne se distinguent pas lorsque l'analyse est réalisée sur le score de lisibilité ($F(2,132) = 0,1$; ns). La corrélation calculée à partir du classement des enseignants et des performances en lisibilité et en vitesse est significative (respectivement, $r = .39$; $p < .001$ et $r = -.19$; $p < .03$). Pourtant la corrélation observée entre le jugement des enseignants et les notes au BHK laisse penser que cette détection précoce s'apparente à une bonne capacité d'anticipation des performances des élèves dans ce domaine. Ainsi et pour reprendre les conclusions de Fayol (2007) dans le domaine de la lecture, ces résultats tendent à montrer, qu'en ce qui concerne l'apprentissage de l'écriture également, les enseignants sont globalement de bons experts.

En résumé, les enseignants en classe de CP sont sensibles à la problématique du sens de l'écriture, ils le considèrent comme un possible indicateur de difficultés ultérieures en écriture. Cette étude a permis de montrer que le respect du sens d'écriture est objectivement difficile pour certains élèves et que cela impacte significativement leur vitesse d'écriture.

3.1.3. La place du numérique pour l'écriture dans les espaces d'actions encouragées (étude 2)

Ces vingt dernières années, les contextes scolaires d'apprentissage ont considérablement évolué à travers notamment l'arrivée des technologies numériques. Comment ces nouveaux environnements numériques d'apprentissage impactent-ils les espaces d'actions encouragées et a fortiori les trajectoires de développement et les apprentissages réalisés ?

Comme cela a été décrit au paragraphe 2.6, les applications intelligentes pour tablettes en classe offrent des possibilités nouvelles pour l'élève d'apprendre par l'action, de bénéficier de feedbacks immédiats sur les caractéristiques et les conséquences de ses actions. Certains dispositifs permettent une instruction au un-par-un (« adaptative learning ») et rendent plus aisée la réponse aux besoins spécifiques de chacun des élèves du groupe classe. Les possibilités de médiation sont donc potentiellement augmentées : l'enseignant peut revoir en temps réel la procédure de l'élève qui a écrit un mot par exemple. Par ailleurs, les algorithmes de certains logiciels et applications analysent en temps réel les productions des élèves et selon les besoins peuvent mettre en œuvre un étayage augmenté. Le dispositif numérique peut donc adapter l'activité en temps réel pour rester dans la zone proximale de développement de l'élève et ainsi favoriser les apprentissages (Bonneton-Botté et al., 2019). Si l'affordance est la capacité à saisir les invariants relationnels entre l'apprenant et l'environnement (Gibson, 1979) jusqu'à présent les êtres humains étaient ceux qui prenaient en charge l'étayage. Désormais les « agents numériques » (*i.e.*, certaines innovations qui relèvent de l'intelligence artificielle) sont en capacité de prévoir, anticiper, guider, encourager l'apprenant au cours du processus d'apprentissage à partir d'informations auxquelles l'être humain ne peut pas toujours avoir accès. C'est le cas par exemple d'une application qui serait en mesure de réagir à une trop forte pression appliquée au stylo par le scripteur débutant ou d'une application capable lorsque l'élève a produit certaines erreurs de réduire le degré de difficulté de la tâche. Jamais un médiateur humain n'avait pu à ce point interagir avec certaines composantes du système cognitif humain : les algorithmes de certains environnements numériques appréhendent des comportements imperceptibles à l'œil humain, qui relèvent de processus de bas niveaux ou de haut niveaux : dans le cas de l'écriture manuscrite, l'analyse du nombre de pauses, de leur

nature et de leur position devient possible (*i.e.*, pour rappel, la littérature différencie les « stop » qui recouvrent les arrêts du stylo lorsque la pointe reste en contact avec le support et les « lift ou saut » qui concernent les pauses au cours desquelles la pointe du stylo est maintenue en l'air). En conséquence, ces intelligences artificielles sont en mesure, au cours du processus d'apprentissage de prendre en charge certains obstacles inhérents au processus d'apprentissage et de les anticiper comme jamais aucun humain n'aura été en capacité de le faire. Cependant, les quelques travaux qui ont été récemment menés pour mesurer le bénéfice de ces environnements numériques sur les apprentissages aboutissent régulièrement à des résultats contradictoires (Bara & Tricot, 2017). Nous avons aussi préalablement souligné que les attitudes des enseignants peuvent constituer un frein à leur utilisation en milieu scolaire et que le processus de conception d'un outil devrait idéalement intégrer en amont de la conception une analyse des besoins des utilisateurs afin de faciliter l'utilité, l'utilisabilité et l'acceptabilité de l'outil conçu. Réalisée dans le cadre du projet *intuiscript*, l'étude que nous allons présenter dans cette section présentait deux objectifs :

- Le premier objectif était de décrire le plus précisément possible les difficultés rencontrées par les professeurs des écoles lorsqu'ils enseignent l'écriture cursive. Nous avons cherché à comprendre comment les enseignants comprennent et mettent en œuvre certaines préconisations institutionnelles liées à l'enseignement de la cursive.
- Le deuxième objectif était de caractériser les dispositions des professeurs des écoles à l'égard des outils numériques au début du projet *Intuiscript* (et plus précisément leurs dispositions à l'égard des tablettes). Nous avons cherché à caractériser l'environnement numérique des enseignants et à décrire l'usage qu'ils font du numérique lorsqu'il s'agit d'enseigner l'écriture manuscrite.

Le projet *IntuiScript* est à l'origine d'une recherche coopérative et industrielle qui rassemble des chercheurs en informatique, en didactique et en psychologie, des maîtres formatrices, des conseillers pédagogiques et des inspecteurs de l'éducation nationale. Il semble important de préciser le contexte et l'histoire de cette recherche. L'ESPE de Bretagne s'est vu octroyer une mission d'accompagnement sur le terrain d'un contrat de recherche nommé « *IntuiScript* »⁵.

⁵ *Intuiscript* est une réponse à un appel à projet dont les partenaires sont l'université Rennes 2, l'entreprise Script&Go, l'INSA (équipe IntuiDoc), le laboratoire Loustic (Laboratoire d'Observation des Usages des technologies de l'information et de la communication) et Microsoft. Une fois le contrat obtenu, la région et

IntuiScript est un cahier numérique qui est destiné à accompagner l'enfant de la Moyenne Section au début de l'école élémentaire (cycle 1 et début de cycle 2, soit maternelle et première année de primaire). Cette application propose des modules d'entraînement ou de préparation à l'écriture. Chaque exercice offre à l'enfant un feedback qualitatif en temps réel de sa production et adapte la suite de l'exercice à ses possibilités en lui proposant par exemple d'enchaîner deux puis trois lettres quand d'autres élèves moins avancés continuent de s'entraîner sur des primitives graphiques (tracés de rond, diagonales, boucles...). De son côté, l'enseignant peut visualiser les productions de ses élèves, rejouer à volonté un tracé, appréhender les progrès réalisés et planifier des scénarios pédagogiques différenciés.

En intégrant le projet, j'ai mené une première investigation afin de comprendre comment les enseignants s'approprient trois exigences institutionnelles complexes relatives à l'acquisition de l'écriture (MEN, 2006, 2008, 2015) i) identifier les élèves capables de commencer à apprendre l'écriture cursive, ii) assurer une maîtrise du processus d'écriture manuscrite en veillant à être présent auprès de chaque enfant, iii) gérer la diversité au sein de la classe. Compte tenu de la complexité de ces recommandations et d'un processus d'apprentissage qui implique à la fois des composantes cognitives, motrices et perceptives, nous avons émis l'hypothèse que les obstacles professionnels rencontrés par les enseignants seront révélés dans les questionnaires à travers une absence de réponse ou de consensus dans les pratiques pédagogiques déclarées, comme déjà souligné dans d'autres pays (Labrecque, Morin et Montésinos-Gelet, 2013). Le deuxième objectif de cette étude était d'identifier quelques critères d'acceptabilité pour un outil numérique (*i.e.*, application intelligente pour tablette et stylet) dont la visée serait l'enseignement-apprentissage de l'écriture cursive en contexte français. Pour cela, les usages (y compris les équipements) et les représentations liées aux outils numériques dédiés au domaine de l'écriture manuscrite ont été étudiés. 164 enseignants de grande section de maternelle (troisième année d'école maternelle en France) ont participé à cette étude en répondant à un questionnaire (soit 21% des 766 enseignants qui ont reçu le questionnaire ; 162 femmes et 2 hommes présentant en moyenne 9 années d'expérience d'enseignement en école maternelle). Le questionnaire était structuré en trois blocs de questions 1) le premier bloc investiguait les critères utilisés par les enseignants pour estimer qu'un élève est prêt à entrer dans l'écriture cursive 2) Le deuxième bloc visait à préciser les outils et gestes professionnels

l'Académie de Bretagne ont souhaité que les DASEN et l'ESPE soient régulièrement consultés lors de l'avancée du projet. Le cahier numérique est aujourd'hui commercialisé sous l'appellation « Kaligo ».

des enseignants de grande section lorsqu'ils ont à enseigner l'écriture manuscrite avec un focus particulier sur les modalités de différenciation et de prise en charge des difficultés d'élèves 3) le troisième bloc permettait de mesurer l'usage des outils numériques chez ces enseignants et visait à préciser leur représentation quant à l'enseignement de l'écriture cursive sur tablette équipée de stylet.

Pour juger de la capacité d'un élève à entrer dans l'apprentissage de la cursive (*i.e.*, les enseignants avaient à choisir et à hiérarchiser trois réponses parmi plusieurs propositions), la majorité des enseignants ont choisi en premier lieu comme indicateur « le plaisir de l'élève pour les activités d'écriture ». L'importance accordée ici à la motivation pourrait faire référence à la composante sémantique de l'écriture dans les programmes scolaires actuels de l'école maternelle (MEN, 2015). Ce choix majoritaire pourrait traduire pour l'enseignant le fait que l'élève a bien fait le lien entre lecture et écriture avant de lui proposer d'entrer dans l'apprentissage systématique de l'écriture cursive. Les second et troisième choix les plus représentatifs concernaient l'aisance graphomotrice et la bonne connaissance des gestes associés aux lettres. Ces deux critères traduisent l'attention portée à la composante motrice de l'activité d'écriture. Cette même attention portée à la composante motrice lors de l'entrée dans l'apprentissage de l'écriture a également été observée au Québec (Labrecque et al., 2013). Finalement, les connaissances liées à la composante symbolique (*i.e.*, nom des lettres, compréhension précoce du principe alphabétique, reconnaissance des mots, décodage, connaissance des graphèmes) ne semblent pas être des indicateurs privilégiés par les enseignants. Comme les réponses favorisent largement la composante sémantique (le plaisir d'écrire) par rapport aux composantes motrice et symbolique, il semblerait que la recommandation ministérielle faite en 2015 de ne pas isoler ces trois composantes ne soit pas facilement mise en œuvre, autrement dit qu'il s'agisse d'une contrainte professionnelle complexe. Au regard des récents développements scientifiques, il semblerait nécessaire de développer chez les enseignants une meilleure perception du rôle des connaissances symboliques et de leur relation à la composante motrice de l'écriture. Un outil numérique présenterait une utilité pédagogique certaine s'il permettait d'accompagner la prise de décision de l'enseignant lorsqu'il s'agit d'identifier quels élèves sont prêts à entrer dans l'apprentissage formel du geste d'écriture. A titre d'exemple, comme le développement des compétences en écriture est graduel et séquentiel, Puranik et Lonigan (2009) recommandent qu'aucun enseignement formel de l'écriture n'ait lieu tant que l'enfant gribouille encore et qu'il n'est pas assez avancé dans l'écriture des prénoms. Dans notre étude, " l'écriture du prénom " n'a pas été proposée aux enseignants comme critère de jugement de l'aptitude à débiter

l'apprentissage formel. Cependant, seuls 10% des enseignants ont choisi le critère "distinguer les signes qui appartiennent/ne font pas partie de l'alphabet" comme premier choix pour décider qu'un élève peut commencer formellement à apprendre à écrire.

Une question proposait aux enseignants de préciser quels critères moteurs pouvaient être utilisés pour identifier les élèves capables d'entrer dans l'apprentissage de la cursive. Un quart des enseignants s'appuie sur « la tenue du stylo », un autre quart s'appuie sur « la qualité de la motricité fine ». A ces derniers, nous avons demandé de préciser ce qu'ils entendaient par « motricité fine ». L'importante variété de réponses et l'absence de réponse (pour un tiers des répondants) a permis de révéler un manque de connaissances explicites de ce que recouvre cette notion. Dans la lignée des résultats obtenus par Labrecque et al. (2013) au Québec, cette absence de consensus traduit le fait que les pratiques ne sont pas suffisamment guidées par des connaissances scientifiques récentes et précises. Par exemple, « la tenue du stylo » est la réponse la plus fréquemment citée (plus de 70% des enseignants ont choisi ce critère en premier, second ou troisième choix) comme un indicateur de la capacité motrice d'un élève à commencer l'apprentissage de l'écriture cursive alors qu'aucune donnée empirique ne vient actuellement étayer ce fait (Schwellnus, Cameron, & Carnahan, 2012). Cette préoccupation majeure pour la tenue du stylo et le recours normatif aux outils scripteurs (cf. étude 1) pourraient constituer un frein à l'utilisation d'un stylet pour tablette avec des scripteurs débutants.

Le deuxième bloc de questions visait à préciser les outils et gestes professionnels des enseignants de grande section lorsqu'ils enseignent l'écriture manuscrite avec un focus particulier sur les modalités de différenciation et de prise en charge des élèves en difficulté. Les directives françaises de 2006, 2008 et 2015 inscrites dans les programmes de l'école maternelle recommandent la présence de l'enseignant pour surveiller l'ordre, la direction et la lisibilité des tracés produits afin d'apporter des corrections immédiates si nécessaire. Cette recommandation renvoie au rôle déterminant de la connaissance du résultat au cours d'un apprentissage moteur (Schmidt & Lee, 2005). L'individualisation de l'enseignement pour l'ensemble du groupe classe n'étant pas possible, nous avons demandé aux enseignants de préciser dans quelles phases du processus d'enseignement de la cursive (*i.e.*, découverte du geste, expérimentation libre, entraînement, institutionnalisation, évaluation), ils estimaient que leur présence était absolument nécessaire. La première réponse de la grande majorité des enseignants (70%) a été la découverte du geste, l'institutionnalisation (*i.e.*, moment de fin de séance généralement mené en collectif et dédié à l'explicitation des savoirs enseignés) est la seconde réponse la plus fréquente (10%). L'entraînement, l'expérimentation libre et l'évaluation ont rarement été

retenus. Le fait que l'évaluation ne soit que rarement mentionnée traduit l'absence de considération pour le geste ou le tracé dynamique dans le processus d'évaluation et renseigne partiellement sur la nature des feedbacks fournis. La validation par l'enseignant est donc très probablement effectuée sur la base des traces laissées par l'enfant, résultat que nous avons déjà observé dans notre première étude. Ces choix sont probablement propres aux contraintes professionnelles des enseignants (*e.g.*, effectif des classes) mais pourraient aussi indiquer un manque de formation ou d'accès aux connaissances scientifiques relatives à l'acquisition du geste d'écriture et au rôle des feedbacks dans les apprentissages moteurs.

Une autre recommandation institutionnelle analysée concernait la capacité des enseignants à gérer la diversité en classe. Dans un premier temps, il a été demandé aux enseignants s'ils géraient la diversité dans le processus d'apprentissage de l'écriture cursive, puis si la réponse était affirmative, de préciser (sous la forme d'une réponse libre) comment ils géraient les difficultés rencontrées par les élèves dans cet apprentissage en précisant les aides qu'ils proposaient habituellement. Les réponses obtenues à cette dernière question ont été catégorisées. Si plus de 85% des répondants ont déclaré prendre en charge les difficultés, les méthodes adoptées étaient souvent peu claires puisque 10% d'entre eux n'ont pas répondu à la demande de précision et que 28% d'entre eux ont énoncé une action professionnelle sans plus de détails (*e.g.*, différencier, aider). Ces résultats nous conduisent à penser que la gestion de la diversité des rythmes d'apprentissage et des difficultés des élèves au cours de l'apprentissage de l'écriture est complexe et difficile professionnellement pour les enseignants français, mais ce fait n'est pas spécifique au contexte scolaire français (Graham et al., 2008 ; Labrecque et al, 2013). Lorsque des précisions sont apportées, 19 % des enseignants proposent des activités de motricité fine ou globale tandis que les activités perceptives visuelles (discriminer des formes) n'ont été mentionnées que par une seule enseignante. Le plus souvent (24%), les enseignants aident les élèves en difficulté en diversifiant les supports (sable, farine, semoule, ardoise effaçable) utilisés pour entraîner le geste. La plupart des solutions ont en commun de réduire le degré de friction entre l'outil et la surface graphique ou permettent de produire des traces directement avec le doigt ce qui pourrait avoir pour effet de modifier les feedbacks proprioceptifs traités lors de l'exécution. Certaines pratiques ont aussi pour effet de supprimer la trace laissée par le stylo ce qui pourrait diminuer le coût attentionnel lié au traitement du feedback visuel et de faciliter au contraire une centration du scripteur sur ces ressentis proprioceptifs. Patchan et Puranik. (2016) ont montré l'intérêt d'un entraînement au doigt plutôt qu'au stylet sur tablette ou au stylo sur papier, ce qui renforce l'idée que diminuer le degré de

friction ou supprimer le stylo serait temporairement bénéfique à l'apprentissage. La diversification des supports a également été observée de la même manière par Baraud et al. (2017). La variabilité dans l'apprentissage moteur a été interprétée comme un élément positif et nécessaire à l'apprentissage moteur (Bernstein, 1996 ; Schmidt & Lee, 2005). Le changement de supports et d'outils (sable, farine, semoule, bloc d'écriture effaçable, doigts, crayons, etc.) au cours de l'apprentissage offre aux enfants la possibilité d'explorer les composantes perceptives, toniques et posturales associées aux habiletés d'écriture manuscrite (Bara et al., 2011 ; Bara & Bonneton-Botté, 2016).

Une analyse de l'équipement, de l'usage et des représentations des outils numériques a été conduite à partir des réponses obtenues au troisième bloc de questions. Les enseignants ont d'abord été invités à préciser le matériel numérique disponible en classe parmi une liste de propositions (tableau interactif, ordinateur, vidéoprojecteur, diaporama, tablette numérique pour les enseignants, tablette numérique pour les élèves). Trente et un répondants ont déclaré ne pas avoir d'équipement. Il a été demandé aux répondants disposant d'un équipement s'ils l'utilisaient pour enseigner l'écriture manuscrite : 5,5% n'ont pas répondu et 76,2% ont déclaré ne pas utiliser de matériel numérique pour enseigner l'écriture manuscrite. Vingt-neuf répondants (18,3%) ont déclaré utiliser des dispositifs numériques : neuf utilisaient un tableau interactif, sept un ordinateur, neuf des vidéoprojecteurs ou des diaporamas, trois avaient leur propre tablette numérique et un seul proposait des tablettes numériques aux élèves. L'absence d'équipement et de recours aux technologies numériques chez les enseignants de dernière année de maternelle traduit le fait que les espaces d'actions encouragées de l'école maternelle française n'intègrent que très peu cet outil.

Nous avons cherché à savoir comment les enseignants établissent une différence entre l'écriture sur papier et sur une tablette équipée d'un stylet en posant la question suivante : " Il existe actuellement des applications permettant d'apprendre à écrire sur des tablettes avec un stylet. Du point de vue de l'enfant, pensez-vous qu'il y ait une différence entre le tracé sur papier et le tracé laissé sur tablette ?". En cas de réponse positive, les enseignants étaient invités à expliquer cette différence. Onze pour cent des répondants n'ont pas répondu, 37% ne considèrent pas qu'il y ait une différence entre les deux supports et 52% (n=84) considèrent qu'il y en a une. Si la moitié environ des enseignants perçoit une différence entre les deux supports, la plupart d'entre eux ne peut préciser la nature de cette différence (74%). 6% des répondants considèrent que le support tablette est plus motivant. Certains considèrent que l'écriture sur tablette numérique est

plus difficile (8%) et d'autres soulignent la problématique disparition de la trace lorsque la tablette s'éteint (12%).

En résumé, l'écriture sur tablette en grande section ne fait pas partie actuellement des actions dites « encouragées ». Des études investiguant la possibilité et les limites pour les élèves d'apprendre avec ces outils doivent être menées. Ces recherches renvoient à l'étude de l'utilisabilité des tablettes équipées d'un stylet par le jeune enfant. L'utilisation anecdotique des outils numériques par les enseignants français de maternelle pour enseigner l'écriture cursive montre d'une part qu'il y a un problème d'équipement des classes en France et de formation et d'autre part qu'il y a de nombreuses recherches à conduire pour explorer et faire connaître les limites et les possibilités offertes par les EIAH. A titre d'exemple, il semble qu'ils pourraient être utilisés pour la composante perceptive de la motricité de l'écriture - rarement abordée par les répondants - car ils offrent aux apprenants la possibilité de rejouer leur modèle avec un modèle visuel dynamique (Bonneton-Botté et al., 2018 ; Jolly et al., 2013 ; Vinter & Chartrel, 2010).

La majorité des enseignants interrogés perçoit une différence entre le support papier et le support numérique. Cette différence perçue, qui semble surtout intuitive car difficile à expliciter, est négative pour certains enseignants soit parce qu'ils observent que la surface de l'écran rend l'écriture plus difficile comme cela a déjà été mis en évidence dans certaines études (Alamargot & Morin, 2015 ; Patchan & Puranik, 2016), soit parce qu'ils considèrent que la non permanence de la trace écrite (*i.e.*, sa disparition lorsque la tablette est éteinte) est problématique pour les jeunes enfants. Cette perception renvoie probablement au fait que les enfants de maternelle réalisant leurs premières productions écrites souhaitent généralement qu'elles soient lues par l'enseignant, le parent ou affichée dans la classe. Il est important pour l'enfant (et probablement pour l'enseignant) d'emporter sa production à la maison, de la faire lire et de la regarder avec ses parents. Pour les différents membres de la communauté éducative (*i.e.*, élèves, enseignants, parents, ATSEM), il s'agit très probablement d'un moment déterminant pour lier les trois éléments de l'écriture, à savoir les composantes sémantique, symbolique et motrice. Ainsi, du point de vue de l'acceptabilité, même si écrire sur une tablette numérique s'avère motivant et positif (Berninger et al., 2015 ; Jolly et al., 2013), il semble qu'un outil numérique pour l'enseignement/apprentissage de l'écriture cursive devrait au moins présenter les deux caractéristiques suivantes : (i) des caractéristiques statiques et dynamiques de la production accessibles à tout moment par l'enseignant/enfant, et (ii) des productions

pouvant être projetées, imprimées ou envoyées pour que la trace écrite acquière sa fonction de communication.

3.2. Apport des études sur les contextes scolaires d'apprentissage

Les études sur les contextes d'apprentissage en milieu scolaire m'ont permis d'identifier des questions vives qui correspondent à un besoin sociétal et d'établir un lien entre mes activités de recherche et d'enseignement: mieux connaître les enseignants (leurs représentations, leurs pratiques, leur environnement social et matériel) permet d'identifier des points d'obstacle à la transformation des pratiques professionnelles et de la forme scolaire et à l'introduction des outils numériques dans les espaces d'actions encouragées. Il se dégage de ces résultats la nécessité de mieux former des enseignants en intégrant notamment la capacité de choisir des applications à visée éducative parmi l'offre foisonnante existante. Certaines applications fréquemment utilisées, généralement parce qu'elles sont gratuites, n'ont pas été évaluées et pourraient ne pas faciliter le processus d'apprentissage. Les formations doivent aussi présenter les spécificités des EIAH comme un outil, qui vient non pas remplacer un autre outil (ici le crayon et le papier) mais qui peut enrichir les possibilités d'actions et d'exploration de ses actions : observer collectivement des tracés dynamiques projetés en classe, avoir des indications sur le degré de pression que l'on applique sur l'instrument ou le support, obtenir des feedbacks immédiats liés aux caractéristiques spatio-temporelles du tracé réalisé ; voilà quelques exemples d'innovations technologiques qui pourraient contribuer à transformer les pratiques d'enseignement de l'écriture manuscrite et à impacter le processus d'apprentissage.

En conclusion, les études 1 et 2, ont permis d'identifier des questions de recherche à l'interface des préoccupations des enseignants et des chercheurs :

- Alors que la littérature scientifique montre un lien fort entre action et perception, la perception visuelle du geste de tracé n'est pas exploitée en classe par les enseignants (étude 4)
- Les pratiques des enseignants en matière d'enseignement de l'écriture sont créatives et ont tendance au moins au cycle 1 à diversifier les outils et les supports ce qui a pour effet de modifier les feedbacks au cours de l'exécution mais la plus-value de ces pratiques n'a pas été objectivée (étude 5, 6 et 7)
- Les potentialités du numérique au service de l'écriture manuscrite ne sont pas exploitées et globalement l'usage des tablettes au cycle 1 n'est pas plébiscité par les enseignants. Les applications intelligentes pourraient offrir une assistance aux enseignants et

contribuer à lever certaines contraintes professionnelles : en tenant compte de la diversité des rythmes de développement et d'apprentissage, en facilitant l'évaluation dynamique des tracés des élèves, en permettant d'accéder à des informations généralement inaccessibles sur le mouvement lui-même (pression, nature des pauses, vitesse, sens d'écriture). Les résultats ont guidé la construction d'un cahier des charges pour des applications dédiées à l'écriture manuscrite (étude 8 et 9).

4. Perception et production du mouvement d'écriture manuscrite par l'enfant

4.1. La connaissance par l'enfant des caractéristiques du geste d'écriture (étude 3)

Comme nous l'avons mentionné précédemment, l'acquisition du geste d'écriture est fortement déterminée par des enseignements explicites menés en contexte scolaire. Cependant, de nombreux apprentissages se réalisent aussi de façon implicite ou statistique grâce à une exposition régulière à certains stimulus. Treiman (2019) définit l'apprentissage statistique comme « *la capacité d'extraire des patrons de notre environnement sans que ceux-ci nous aient été explicitement signalés ou que nous ayons reçu à leur propos, un enseignement explicite, un renforcement ou encore une rétroaction* » (Treiman, 2019 ; p. 740). Dans le domaine de connaissance que constitue l'orthographe, les travaux de Treiman indiquent que les scripteurs pré-phonologiques (*i.e.*, les enfants qui n'ont pas encore compris que les mots écrits codent une forme sonore) identifient par apprentissage statistique les caractéristiques visuelles des mots et les relations entre les unités visuelles (les lettres) et linguistiques (sons). Plusieurs études ont montré que les scripteurs pré-phonologiques produisent plus fréquemment certaines lettres au cours de leurs essais d'écriture. Le choix de ces lettres n'est pas lié au hasard mais à la fréquence d'apparition de ces mêmes lettres dans la langue du scripteur (Treiman, Kessler, Boland, Clocksin & Chen, 2018 ; Treiman, 2019). De la même façon, nous avons cherché à préciser l'émergence des connaissances relatives au geste d'écriture cursive (Bonneton-Botté, De La Haye, Marec-Breton, & Bara, 2012 ; Bonneton-Botté, Bara, De La Haye-Nicolas, Marec-Breton, Gonthier, 2018). Des enfants pré-scripteurs de 3ème année de maternelle (nous entendons ici par pré-scripteur le fait de ne pas avoir débuté l'apprentissage formel de l'écriture manuscrite cursive ; n= 45) et scripteurs de 2ème année (n=52) et de 5ème année d'élémentaire (n= 44) ont été invités à détecter la présence d'irrégularités (des stops intra-trait inhabituels

dans une lettre et des erreurs de direction dans le tracé des segments qui composent les lettres) dans un mouvement d'écriture cursive présenté visuellement. La situation proposée était une tâche de jugement. Confrontés à des vidéos d'une main en train d'écrire des pseudo-mots, les enfants devaient juger si la façon d'écrire leur semblait bizarre ou non (la consigne était : « tu vas voir une main qui écrit des mots, ce sont des mots qui n'existent pas, qui ne veulent rien dire. Parfois la main écrit de façon bizarre, parfois elle écrit normalement, regarde bien et dis-moi lorsque tu penses qu'elle écrit de façon bizarre »). Chaque fois qu'un enfant jugeait un item comme bizarre, l'expérimentateur lui demandait de justifier sa réponse.

Les vidéos des tracés des pseudo-mots présentaient de façon aléatoire soit une absence d'anomalie (5 items contrôles) soit des arrêts inhabituels (5 items avec des stops intra-trait), soit des violations de la grammaire des règles d'action (5 items avec des modifications de l'ordre et de la direction des tracés intra-lettres canoniques). Compte tenu de l'influence réciproque de l'action et de la perception et de la place de l'écriture cursive dans le système éducatif français, quatre hypothèses ont été formulées :

1) Parce que la continuité est caractéristique du mouvement humain (comme le dessin par exemple ; Goodnow & Levine, 1973) et que les stops intra-trait sont rares dans l'écriture cursive d'adultes compétents (Paz-Villàgran et al, 2014), les enfants dès la 3ème année de maternelle devraient être capables de détecter une irrégularité (la présence anormale de stops intra-trait) dans un mouvement d'écriture cursive même s'ils ne maîtrisent pas encore cette habileté graphomotrice.

2) Contrairement à la continuité, la séquence ordonnée des traits est spécifique à l'écriture manuscrite (Goodnow & Levine, 1973 ; Parkinson et al, 2010 ; Velay & longcamp, 2013 ; Wong & Kao, 1991) et est enseignée généralement au cours de la 1ère et de la 2ème année. Nous avons donc supposé que les pré-scripteurs ne détecteront pas une anomalie de la séquence ordonnée des traits qui composent les lettres d'un mot contrairement aux élèves qui ont débuté l'apprentissage formel de l'écriture cursive.

3) En tenant compte de l'influence combinée de la maîtrise motrice (Louis Dam et al., 2000 ; Bildet-Ildei et al., 2006), d'un processus d'apprentissage implicite (Chartrel & Vinter, 2010) qui a pu se produire lors de l'exposition aux tracés d'écriture cursive et de l'apprentissage explicite permis par le contexte scolaire, nous nous attendions à ce que la capacité à détecter les irrégularités augmente avec le niveau scolaire.

4) Pour les enfants qui démontrent une capacité à détecter des irrégularités, des observations antérieures (Kandel et al, 2000 ; Chartel & Vinter, 2010 ; Parkinson et al., 2010) nous conduisent à penser qu'ils ne parviendront pas nécessairement à expliquer ou à verbaliser

leur décision ; en d'autres termes, nous nous attendons à observer une capacité à détecter des irrégularités sans capacité de les verbaliser explicitement, quel que soit le niveau scolaire.

La figure 1 présente les scores de détection en fonction du niveau de l'élève et de la condition (contrôle, stop, direction).

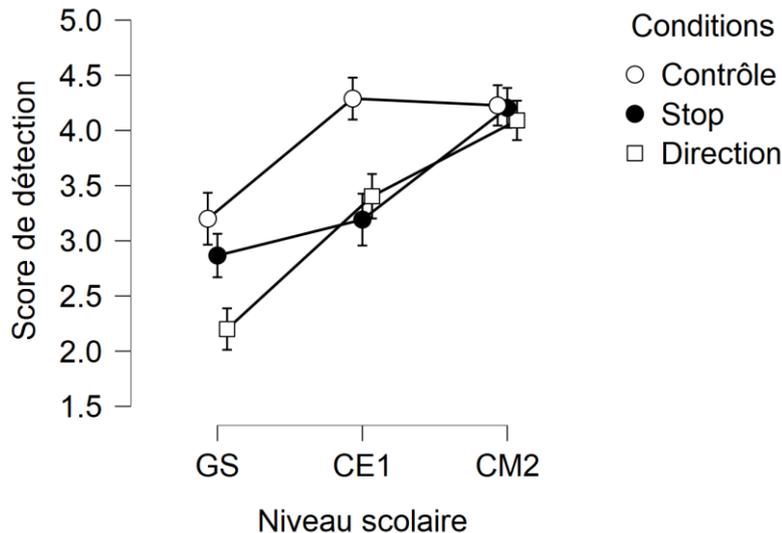


Figure 1 : Score de détection (moyenne et écart-type) en fonction de la condition (normal, stop, direction).

Une analyse de variance a été réalisée avec le niveau scolaire et les conditions expérimentales (contrôle, stop et direction) comme variables indépendantes et le score de détection comme variable dépendante. L'effet principal du niveau scolaire est significatif, $F(2, 138) = 36,93, p < .001, \eta^2p = .35$, indiquant que le nombre de réponses réussies augmente significativement en fonction du niveau scolaire. L'effet principal de la condition est également significatif, $F(2, 276) = 8,86, p < .001, \eta^2p = .06$; les tests post hoc indiquent que la condition Contrôle présente significativement plus de réponses réussies que les deux autres conditions. Enfin, l'interaction bidirectionnelle entre le niveau scolaire et la condition expérimentale est significative, $F(4, 276) = 2,98, p = .020, \eta^2p = .04$, indiquant que la perception des caractéristiques de l'écriture manuscrite dans les trois conditions diffère en fonction du niveau scolaire (cf. figure 1). Les tests post hoc révèlent que les scores dans la condition Contrôle et dans la condition Direction augmentent de la grande section au CM2 (tous les $ps \leq .01$) ; les scores dans la condition « stop » sont stables de la maternelle à la 2e année ($p = .962$) mais ont augmenté de manière significative entre la 2e année et la 5e année ($p < .001$). Les élèves de maternelle ont obtenu des résultats équivalents dans les conditions « contrôle » et « stop » ($p = 0,967$) et significativement inférieurs dans la condition « direction ». Les élèves de CE1 ont obtenu des performances

significativement plus élevées dans la condition « contrôle » que dans les conditions « stop » et « direction », qui ne diffèrent pas entre elles. Enfin, les élèves de CM2 (5e année) ont obtenu des résultats comparables dans toutes les conditions (tous les $p > 0,90$).

L'analyse des justifications a donné lieu à une catégorisation des réponses (bonne, mauvaise ou absence de justification) puis au calcul d'un ratio (nombre de bonnes justifications sur nombre de bonnes détections). Une bonne justification décrit précisément l'irrégularité liée à la pause anormale ou à une mauvaise direction du tracé. Toute autre réponse est jugée mauvaise (généralement les enfants répondaient « parce qu'il n'est pas bien dessiné, il n'est pas joli...»). Pour s'assurer que les résultats sont indépendants de la performance de détection réelle de l'enfant, cette analyse a été limitée aux enfants produisant au moins une justification correcte par condition (maternelle : $n = 38$; 2e année : $n = 43$; 5e année : $n = 40$). Des tests t à un échantillon ont été effectués pour vérifier si la proportion d'explications correctes était significativement inférieure à un, indiquant que les décisions correctes n'étaient pas nécessairement accompagnées d'explications correctes. Une analyse de variance mixte a été utilisée pour déterminer si la proportion d'explications correctes diffère en fonction du niveau scolaire et de la condition expérimentale. La figure 2 présente les fréquences de bonnes justifications en fonction du niveau scolaire et de la condition.

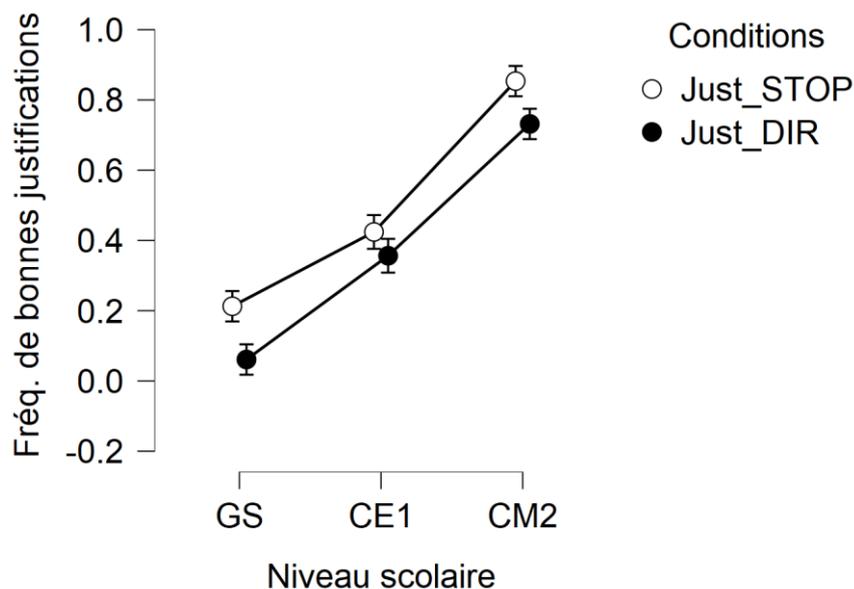


Figure 2 : Fréquence de bonnes réponses justifiées en fonction des conditions (stop et direction) et du niveau scolaire (GS, CE1 et CM2). Les barres représentent les écarts-types.

D'un point de vue descriptif, la figure 2 indique que le taux de justifications correctes augmente régulièrement en fonction du niveau scolaire ; il ne dépasse 50 % qu'en CM2 et n'atteint jamais 100 %. Les explications correctes des plus jeunes participants sont rares, surtout dans la condition « direction ». Des tests *t* à un échantillon ont confirmé que les détections correctes n'étaient pas nécessairement accompagnées d'explications correctes, quels que soient les groupes d'âge et les conditions expérimentales : la proportion moyenne de justifications correctes est restée significativement inférieure à un dans tous les cas (tous les *ps* \leq .001).

L'analyse de variance a révélé un effet principal du niveau scolaire, $F(2, 118) = 49,98, p < .001, \eta^2p = .46$, la proportion de justifications correctes augmentant régulièrement avec le niveau scolaire. L'effet principal de la condition est également significatif, $F(1, 118) = 14,58, p < .001, \eta^2p = .11$, ce qui indique que la condition Stop a suscité plus de justifications correctes que la condition Direction. Enfin, l'interaction bidirectionnelle entre le niveau scolaire et la condition n'était pas significative, $F(2, 118) = 0,07, p = 0,936, \eta^2p = 0,00$. Les tests post hoc ont confirmé que la proportion de justifications correctes augmente significativement pour chaque niveau scolaire successif dans les deux conditions.

Cette recherche cherchait à identifier si l'écriture cursive, à l'instar d'autres domaines de connaissances, conduit à la construction de connaissances chez des enfants pré-scripteurs et scripteurs. Pour répondre à cette question, nous avons étudié leur capacité à détecter la conformité d'un tracé en cursif aux règles de production motrice générales (continuité du mouvement) et spécifiques (ordre et direction des traits) (Goodnow & Levine, 1973). La formulation de nos deux premières hypothèses nous a conduit à penser que les connaissances sur la continuité et la séquentialité du mouvement ne seraient pas les mêmes pour les élèves selon leur niveau de scolarité. A quel moment les participants sont-ils capables de détecter une discontinuité anormale ? Étant donné que la continuité du mouvement est une caractéristique générale de la production motrice (Goodnow & Levine, 1973) et que les stops intra-traits sont inhabituels dans l'écriture manuscrite des adultes experts (Paz-Villagràn et al., 2014), nous avons supposé que nos participants, même ceux qui ne maîtrisaient pas encore la compétence d'écriture cursive, seraient sensibles à cette caractéristique de continuité du mouvement.

En comparant les trois conditions, nous avons observé que les élèves de maternelle sont plus performants à la tâche de détection lorsqu'ils sont confrontés à une écriture « normale » ou lorsque le mouvement d'écriture présente une discontinuité anormale. L'idée de représentations cognitives isomorphes au monde réel (Perruchet, 2008) nous amène à supposer qu'en France, pays attaché à l'écriture cursive (Bara, Morin, Alamargot, & Bosse, 2016 ; Bara, Morin, Montésinot-Gelet, & Lavoie, 2011), les enfants régulièrement exposés au mouvement

d'écriture découvrent progressivement et implicitement que le geste d'écriture cursive est caractérisé par sa continuité. La continuité étant notamment une règle qui caractérise les mouvements de dessin (Goodnow & Levine, 1973), ils ont donc probablement une représentation de ce que doit être la continuité d'une séquence motrice avant même que l'écriture cursive ne fasse partie de leur répertoire moteur. Cette connaissance, qui semble difficile à verbaliser, a déjà été identifiée chez l'adulte par Orliaguet, Kandel, et Boë (1997). Si les adultes de leur étude étaient capables de prédire l'identité de la lettre qui suit la lettre /L/ à partir d'informations sur le mouvement de la trace, les participants ont cependant rapporté qu'ils avaient l'impression de répondre au hasard. Dans notre étude, de nombreux élèves de maternelle ont montré qu'ils étaient sensibles à la caractéristique de continuité du mouvement (80 % des élèves de maternelle ont identifié plus de la moitié des items « contrôle » comme étant corrects ; seuls 42 % ont identifié à tort plus de la moitié des items « stop » comme corrects), mais le statut implicite de l'information peut les avoir empêché d'explicitement la violation de cette caractéristique. Nous observons néanmoins qu'en maternelle, un tiers des détections correctes de discontinuité sont associées à une justification correcte, montrant que l'information sur la continuité et la discontinuité peut, dès cet âge, faire l'objet d'un traitement conscient. Bien que notre étude ne les explique pas, l'existence de ces différences inter-individuelles est intéressante d'un point de vue développemental. Il est possible que certains enfants aient eu une exposition plus riche au geste d'écriture cursive dans leur environnement personnel ou scolaire, ou que leur apprentissage de l'écriture cursive ait déjà commencé dans leur environnement familial.

Contrairement à la continuité, la séquence ordonnée des traits est très spécifique au mouvement d'écriture cursive (Goodnow & Levine, 1973 ; Parkinson et al., 2010 ; Velay & Longcamp, 2013 ; Wong & Kao, 1991) et est acquise plus tard dans le développement, généralement au cours de la 1^{ère} et 2^{ème} année (Bonneton-Botté, De La Haye, Marec-Breton, & Bara, 2012). Nous avons donc supposé que la perception de la séquentialité du mouvement d'écriture émergerait plus tard que celle de la continuité du mouvement. La comparaison des résultats des trois conditions et l'analyse des justifications données par les enfants dans les conditions Stop et Direction soutiennent cette hypothèse.

La spécificité de la caractéristique de séquentialité du tracé en cursive est apparue clairement lors de l'analyse des résultats obtenus auprès des élèves de maternelle. Lorsque nous leur avons présenté une violation de l'ordre et de la direction des traits, ils ont rapporté la plupart du temps que rien n'était inhabituel dans le mouvement observé. Le score moyen de détection de 2 indique qu'ils ont répondu en moyenne trois fois sur cinq que le tracé est normal, ce qui correspond presque exactement à leur taux de réponse dans la condition Contrôle. Contrairement à la

condition Stop, les quelques enfants qui ont détecté des irrégularités de direction ont rarement été en mesure de produire une explication correcte pour leur réponse. La capacité à détecter les irrégularités de direction augmente considérablement en 2e année, rattrapant les performances observées pour la condition Stop. La détection était équivalente pour les deux conditions en 5ème année. Cependant, notre analyse qualitative des justifications des élèves a montré que ces deux conditions n'étaient pas en fait équivalentes, car la justification est toujours plus facile dans la condition Stop. Nous pouvons donc supposer que la connaissance par les enfants de l'ordre et de la direction des traits propres à l'écriture cursive dépend davantage d'un apprentissage secondaire et explicite acquis principalement à l'école.

Si l'apprentissage explicite joue très probablement un rôle dans l'acquisition de cette connaissance, elle n'est pas la seule explication possible. L'étude de Vinter et Chartrel (2008) a montré que la 2e année correspond également à la période de développement au cours de laquelle le contrôle rétroactif s'établit. Durant cette période, le feedback visuel est déterminant pour le contrôle de toute production motrice. L'analyse des informations visuelles relatives au mouvement et à la trace qui en résulte pourrait constituer les bases développementales de représentations utiles au contrôle de la production motrice ultérieure, qualifiées par Schmidt (1975) de "schémas de reconnaissance" (ou modèle direct dans le modèle de Wolpert & Flanagan, 2001). L'augmentation statistiquement significative, de la maternelle au CE1, de la détection des irrégularités dans l'ordre des traits pourrait donc s'expliquer à la fois par l'enseignement explicite à l'école de cette nouvelle grammaire de l'action et par cette nouvelle possibilité développementale de comparer les conséquences sensorielles du mouvement avec les schémas de reconnaissance des traces maîtrisées.

En résumé, cette recherche montre que la connaissance de la continuité et de séquentialité du geste d'écriture et de son tracé ne suivent pas les mêmes trajectoires développementales. La continuité semble faire essentiellement partie d'un domaine général de connaissances, à savoir le mouvement, alors que la séquentialité appartient à un domaine spécifique de connaissances, à savoir l'écriture (Karmiloff-Smith, 1992). Le processus de construction de la connaissance de ces deux caractéristiques est donc différent. La connaissance de la continuité apparaît plutôt dans le développement et est globalement plus fréquente que celle de la séquentialité. Une étude complémentaire auprès d'élèves de 1ère année permettrait de mieux préciser la relation entre la connaissance de la séquentialité et le début du processus d'apprentissage formel.

Notre troisième hypothèse supposait qu'une augmentation du niveau scolaire (correspondant au développement du contrôle moteur avec l'âge et à un apprentissage explicite à l'école) serait associée à une augmentation de la capacité à détecter les caractéristiques du mouvement de

l'écriture cursive. Notre objectif était de comparer les profils de réponse d'élèves de maternelle, qui n'avaient pas encore reçu d'enseignement formel de l'écriture cursive, d'élèves de CE1, dont l'apprentissage de l'écriture cursive était encore en cours, et d'élèves de CM2, qui étaient considérés comme ayant achevé le programme scolaire en ce qui concerne l'écriture cursive. Conformément à cette prédiction, nous avons montré que, pour chacune des caractéristiques étudiées, l'augmentation du niveau scolaire s'accompagne d'une augmentation de la détection de l'irrégularité du geste d'écriture et de son tracé et de la capacité des enfants à bien expliquer leur réponse. Cependant, il est impossible d'attribuer cette modification des profils de réponse à un facteur en particulier, car de nombreux facteurs potentiels sont impliqués. Ces augmentations du niveau scolaire correspondent à de nombreuses avancées développementales perceptives, cognitives et motrices : i) la capacité à utiliser la vision de manière prospective pour planifier et guider les actions de lecture et d'écriture (Maldarelli et al., 2015 ; Norton & Wolf, 2012) ; ii) la création de représentations multimodales de lettres suivies de syllabes puis de morphèmes (Kandel & Perret, 2015) ; iii) le répertoire moteur croissant à partir duquel le sujet peut explorer visuellement un mouvement (Calvo-Merino et al., 2006 ; Velay & Longcamp, 2013) ; iv) les possibilités nouvelles de simuler le mouvement (Puyjarinet et al., 2020).

Dans notre dernière hypothèse, nous avons supposé que, pour les élèves français, la capacité à détecter des irrégularités dans un mouvement d'écriture cursive ne serait pas nécessairement explicable ou verbalisable aux trois niveaux scolaires examinés. L'existence d'une connaissance implicite des règles motrices, difficilement verbalisable, a déjà été montrée chez l'adulte pour différents domaines moteurs (Kandel et al., 2000 ; Orliaguet et al., 1997 ; Parkinson et al., 2010). Dans l'étude de Parkinson et al. par exemple, les adultes utilisent l'ordre des traits pour reconnaître rapidement une lettre dans une situation de lecture mais ils n'ont aucune conscience de cette stratégie. Nos résultats sont conformes à cette hypothèse : en moyenne, la proportion d'explications correctes était, de manière fiable, inférieure à un, et il a fallu attendre la 5^e année pour enregistrer une majorité d'explications correctes pour les deux conditions expérimentales. Pour tous les niveaux scolaires, il a toujours semblé plus difficile de donner une bonne justification lorsque l'irrégularité concerne l'ordre des traits. Comme nous l'avons mentionné plus haut, le processus d'apprentissage et la construction progressive des règles motrices pourraient expliquer ces différences. Néanmoins, comprendre pourquoi certains sujets, quel que soit leur âge, sont capables de percevoir et de verbaliser des règles motrices alors que d'autres ne le sont pas, reste un défi pour les recherches futures. Pour poursuivre ces recherches, une perspective possible serait de mener cette étude dans des pays qui favorisent culturellement

l'écriture script afin d'étudier la sensibilité des enfants à la continuité ou à la discontinuité d'une écriture cursive. Par ailleurs, il serait pertinent d'examiner la connaissance des mouvements d'écriture chez les élèves qui utilisent principalement les technologies de l'information et de la communication.

Pour Vinter et Chartrel (2010), la présentation d'une trace dynamique de la lettre lors d'une séance d'enseignement a eu un effet bénéfique sur les performances d'écriture manuscrite d'enfants âgés de cinq ans et demi. Dans leur conclusion, ils suggèrent que les participants ont traité l'information de la trajectoire tracée pendant l'observation et l'ont ensuite transférée pendant la production motrice.

En conclusion, ces résultats montrent que, lors d'une séance d'enseignement, des informations dynamiques relatives à la continuité d'un mouvement d'écriture cursive peuvent être extraites par des élèves de 3ème année de maternelle et traitées consciemment, du moins en partie. Ce résultat joue en faveur de l'accès à un modèle dynamique des lettres et des mots à écrire au cours de l'apprentissage, ce qu'une application pour tablette pourrait offrir. Ces résultats questionnent aussi les pratiques d'enseignement contemporaines : d'une part, l'étude 2 a montré que dans leur pratique les enseignants n'exploitent pas l'observation du mouvement d'écriture pour expliciter les caractéristiques du mouvement et d'autre part, les enseignants dès la petite section manipulent des étiquettes avec les élèves plus qu'ils n'écrivent ce qui ne permet pas aux jeunes enfants de découvrir les caractéristiques du mouvement d'écriture.

5. Apprendre à écrire : études en contexte scolaire

Étudier les méthodes d'enseignement et l'efficacité des apprentissages en contexte scolaire à partir des pratiques effectives des enseignant.es s'est imposé comme une démarche adaptée permettant de répondre à des besoins sociétaux. La connaissance des lettres est un indicateur déterminant des capacités ultérieures des jeunes enfants en lecture, en écriture ou en orthographe (Hammill, 2004; Pennington et Lefly, 2001; Schatschneider, Fletcher, Francis, Carlson et Foorman, 2004) aussi les recherches qui vont suivre s'inscrivent-elles dans le courant des sciences interventionnelles, et ont pour objectif majeur de contribuer à mesurer l'efficacité de méthodes d'apprentissage en contexte scolaire dans le champ de la littéracie. L'identification des pratiques d'enseignement efficaces constitue un enjeu important pour la réduction des inégalités (Piasta & Wagner, 2010).

La connaissance des lettres fait référence à quatre sous-compétences en interaction qui affectent le cours de l'acquisition de la littératie (Foulin, 2005 ; Puranik, Lonigan & Kim, 2011) : l'enfant

devra être capable de reconnaître la forme des lettres, de les nommer, de connaître le son qu'elle produise et de les tracer.

5.1.Faut-il enseigner le sens du tracé des lettres en capitale ? (Étude 4).

Guidés par les manuels scolaires (Amigues & Zerbato-Poudou, 2009), certains enseignants de moyenne section accordent un temps conséquent à enseigner l'ordre et la direction des traits qui composent les majuscules en caractère d'imprimerie même s'il n'existe pas dans les instructions de l'éducation nationale un ductus officiel des caractères d'imprimerie. Cette pratique est-elle pertinente pour des allographes dont l'usage est voué à disparaître ? Les règles de production motrices s'expriment dans les productions graphiques en général et cela dès le plus jeune âge (Goodnow & Levine, 1973). La séquence ordonnée de mouvements s'observe aussi bien lors des tâches de copies de formes géométriques (Goodnow & Levine, 1973; Vinter & Marot, 2003) que lors de l'écriture d'idéogrammes (Flores d'Arcais, 1994) ou de caractères latins (Parkinson et al., 2010; Simner, 1981). Les explications concernant l'organisation de ces règles sont multiples (Thomassen & van Galen, 1992), elles seraient liées à des contraintes biomécaniques, à des aspects cognitifs en lien avec la signification attribuée à la production, ou à une économie de programmation. Ces règles dépendraient également de caractéristiques propres aux sujets (droitier/gaucher) et du type de forme à produire. Ces régularités vont se modifier avec l'apprentissage formel de l'écriture. Si, pour écrire leurs premières lettres, les enfants utilisent en général les mêmes règles de production motrice que celles qu'ils utilisent pour dessiner (Ninio & Liebllich, 1976), on constate un changement dans le sens du tracé des cercles au fur et à mesure que les enfants progressent dans l'apprentissage de l'écriture (Meulenbroek, Vinter, & Mounoud, 1993; Teulings, 1979). Les études sur l'hébreu (qui s'écrit de droite à gauche) suggèrent que ce changement dans l'ordre préférentiel du tracé des mouvements circulaires serait la conséquence de l'apprentissage de l'écriture puisqu'aucun changement de ce type n'est observé lors de l'apprentissage de l'écriture en hébreu (Goodnow, Friedman, Bernbaum, & Lehman, 1973). Pour Vinter et Marot (2003) la manière dont s'organise la séquence de mouvements pour produire les traces graphiques serait révélatrice de l'activité mentale du sujet. Notamment cela permettrait d'analyser si les patterns sont produits à un niveau local (la planification est réalisée sur la base des segments qui constituent la représentation graphique) ou global (la planification concerne la figure dans sa globalité). Le passage d'une planification locale de l'action à une planification plus globale semble s'effectuer vers 5-6 ans (Vinter, 1994).

En France, dès la moyenne section (B.O, 2008, 2015), les enfants sont invités à découvrir l'écrit et les gestes de l'écriture des lettres capitales (le plus souvent des prénoms de la classe). L'écriture en capitale permet de découvrir activement les relations entre phonèmes et graphèmes à un âge où l'écriture cursive n'est pas encore possible sur le plan neuromoteur. Cependant, l'objectif ultime de l'école est bien l'acquisition d'une écriture cursive (*e.g.*, être capable d'écrire une phrase en cursive à la fin de la grande section). Sur le plan biomécanique, le tracé des capitales est en effet beaucoup plus simple : les lettres sont essentiellement formées de segments horizontaux, verticaux, et obliques seules quelques lettres requièrent un mouvement circulaire (comme le S par exemple). Si les instructions officielles ne précisent pas la façon d'enseigner les capitales d'imprimerie, il existe une pratique fréquente de l'enseignement systématique et explicite de l'ordre des traits à l'intérieur de la capitale. Zerbato-Poudou (2007) suggère en effet d'introduire un enseignement des règles de production afin d'amener les élèves à produire des tracés de lettres capitales lisibles. Le respect des règles faciliterait le tracé de traits bien droits, de sommets pointus et de lettres non déformées, pour l'auteur, il faut pour cela notamment encourager principalement la production de traits descendants. Dans une étude réalisée avec Florence Bara (Bara & Bonneton-Botté, 2016) nous avons enregistré les productions du mot MAISON par 15 élèves de moyenne section (8 garçons et 7 filles âgés en moyenne de 4 ans et deux mois) après qu'ils ont travaillé avec leur enseignante pendant 6 semaines sur les règles de production des lettres en capitale d'imprimerie en respectant les préconisations de Zerbato-Poudou (2007). Au moment du test final, un modèle du mot en capitale est disponible sans indication sur le sens de production. L'enfant écrit le mot sur une feuille blanche posée sur une tablette digitalisante qui enregistre les coordonnées du tracé de l'enfant. Le recueil de données intervient quelques jours après une séance d'apprentissage sur le mot MAISON. Le mot choisi nous permet d'avoir un large panel de mouvements, trois lettres ont plusieurs segments verticaux et obliques (M, A et N), une lettre est composée d'un seul segment vertical (I), et deux lettres nécessitent des mouvements circulaires (S et O). Une analyse qualitative (ressemblance des lettres au modèle par la méthode des juges) et quantitative (nombre de segments tracé/ nombre de segments dans le modèle ; nombre de segments respectant les règles de production enseignées) a été réalisée afin d'objectiver la capacité des élèves de moyenne section à respecter l'ordre et la direction des traits enseignés et pour mesurer la qualité des productions. Nous avons comparé le nombre de segments tracés par les enfants au nombre de segments qu'ils devaient théoriquement produire, nous avons analysé l'adéquation entre le sens de production préconisé pour les traits et le sens de production effectivement suivi, les caractéristiques des tracés (vitesse, fluidité, nombre et

durée des pauses) ont été analysées à partir du logiciel ductus (Guinet et Kandel, 2010). Concernant la qualité des tracés, deux enseignantes ont eu à juger les productions sur une échelle de 0 (lettre non identifiable) à 5 (lettre parfaitement réalisée pour un enfant de cet âge).

L'analyse des données va révéler que l'enseignement systématique de l'ordre et de la direction des traits a été très peu suivi par les élèves. L'analyse des productions montre que les enfants privilégient en réalité un tracé continu et une progression de la gauche vers la droite, en particulier pour les lettres composées de plusieurs segments (M/A/N). C'est le cas pour la lettre M par exemple, qui est tracée de façon continue et sans lever de crayon en partant du premier segment gauche par 12 élèves sur 15. Pour les lettres au tracé curviligne (S et O), les constats sont divisés. Le tracé attendu (du haut vers le bas) du S est relativement bien respecté (12 élèves sur 15). En ce qui concerne la lettre O, la direction suivie dépend du point de départ choisi par l'enfant, la moitié des enfants partent du haut de la lettre et la trace dans le sens anti-horaire comme le feraient des enfants plus âgés, l'autre moitié débute son tracé en bas de la lettre en suivant un sens horaire. Pour la lettre I, moins de la moitié des enfants (7/15) la trace du haut vers le bas comme cela leur a été préconisé. Nous souhaitons préciser l'idée selon laquelle le respect de l'ordre et de la direction des traits enseignés serait un gage de qualité d'écriture. Un coefficient de Bravais-Pearson a été calculé entre le nombre de segments tracés dans le sens préconisé et le score qualitatif alloué par les enseignantes aux productions de l'enfant. Le coefficient de corrélation n'est pas significatif ($r = .07$, $p = .83$). De la même façon, le nombre de segments tracés dans le sens préconisé ne corrèle pas avec les indices de fluidité de l'écriture (vitesse, nombre de pics d'accélération, nombre de pauses ; $.03 < r < .16$; tous les $p > .10$).

Cette étude partait d'un double constat. L'écriture en capitale d'imprimerie enseignée en moyenne section et qui présente un intérêt certain pour la découverte des relations phonèmes graphèmes, ne fait pas l'objet de préconisations précises dans les instructions officielles. Parallèlement, plusieurs ouvrages et la plupart des sites internet qui conseillent les enseignants recommandent d'enseigner systématiquement l'ordre et la direction des traits des capitales d'imprimerie, avançant le plus souvent que c'est à cette condition que le tracé sera plus lisible et que l'enfant développera une écriture fluide. Cette étude a permis de montrer que chez des élèves de moyenne section, l'ordre et de la direction des traits enseignés n'étaient pas suivis par la majeure partie des élèves, sans que cela n'impacte ni la fluidité ni la qualité de la production. Les enfants produisent donc le plus souvent et spontanément des tracés continus et orientés vers la droite. Comment comprendre ces observations ? En premier lieu, ce choix pourrait découler de contrainte d'exécution motrice et répondrait à une recherche d'économie dans la

programmation du geste. Le nombre important de levers de crayon préconisé dans la méthode d'apprentissage augmente la fréquence des actions topocinétiques (Pour le troisième segment du M, aller chercher dans l'espace de la feuille le point de départ d'un segment et calculer correctement pour que celui-ci rejoigne le point de fin du précédent segment) ce qui n'est pas simple pour un enfant de 4 ans en moyenne qui n'a pas ou peu accès au traitement des informations visuelles en cours d'action.

En conclusion, cette étude, qui nécessiterait certes d'être reconduite sur un plus grand nombre de lettres et avec un plus grand nombre d'enfants, souligne d'ores et déjà la nécessité d'une plus grande coopération entre les chercheurs et les praticiens pour interroger l'efficacité et le sens de certaines pratiques d'enseignement.

5.2. Apprendre les lettres à partir de la motricité globale a-t-il un intérêt ? (Étude 5)

La loi du 11 février 2005 et la loi pour la refondation de l'école du 8 juillet 2013 ont engagé un processus de transformation de la société et du système scolaire en engageant l'ensemble des acteurs à développer des pratiques inclusives et à garantir l'accès à l'éducation et à l'apprentissage pour tous. Ce processus engagé conduit aujourd'hui le système scolaire à mettre en œuvre « une accessibilité pédagogique ». Cette notion nous offre « *la possibilité de rompre avec l'opposition capable/incapable pour distinguer la personne typique, de celle atypique nécessitant d'être soutenue dans ses potentialités* » (Erbersold, 2020). Du côté des chercheurs en psychologie de l'éducation, le concept d'accessibilité pédagogique conduit à questionner la diversité des trajectoires d'apprentissage et à envisager l'ensemble des possibles qui ouvrent la voie de la réussite scolaire.

De nombreuses recherches ont montré l'existence d'un lien entre la représentation visuelle des lettres et leur représentation motrice. Ce lien pourrait s'établir à partir de l'écriture manuscrite. Longcamp et al. (2005) montrent qu'il est, pour des jeunes enfants, plus facile de reconnaître des lettres lorsqu'ils ont été invités à les tracer préalablement plutôt que lorsqu'ils les ont produites à partir d'un clavier. Les études en neuroimagerie révèlent que la simple perception de lettres active des réseaux de neurones moteurs semblables à ceux qui sont activés lors du tracé de lettres (James & Atwood, 2009 ; James & Gauthier, 2006 ; Longcamp, Anton, Roth et Velay, 2003). Bara et ses collègues (Bara, Gentaz et Colé, 2007; Bara, Gentaz, Colé et Sprenger-Charolles, 2004) ont démontré que l'exploration haptique des lettres est supérieure à

l'exploration visuelle pour améliorer la reconnaissance des lettres, l'écriture manuscrite et le décodage de pseudo-mots. Pour préparer à la lecture, l'écriture manuscrite doit cependant être accessible au jeune enfant sur le plan neuromoteur car elle exige un développement suffisant de la motricité fine. Rappelons que la motricité fine parfois appelée dextérité correspond à des « petits mouvements musculaires nécessitant une coordination étroite œil-main » (Luo, Jose, Huntsinger, & Pigott, 2007, p. 596). Dans l'étude de Longcamp et al. (2005) citée précédemment, les effets bénéfiques de l'écriture manuscrite sur la reconnaissance des lettres ne concernaient que les enfants dont l'âge était supérieur à 50 mois. De bonnes performances en motricité fine sont régulièrement associées à de meilleures compétences en écriture. Tseng et Show (2000) constatent que les scripteurs rapides présentent une coordination des membres supérieurs plus rapide et une dextérité plus importante que les scripteurs lents. Dans une étude mesurant la variation de l'inclinaison du stylo au cours d'une tâche d'écriture avec ou sans modèle, Rosenblum (2015) observe que les enfants dont les mouvements du stylo sont irréguliers (*i.e.*, les auteurs mesurent le coefficient de variation des mouvements du stylo) ont de faibles performances en écriture. Cette irrégularité traduirait selon l'auteure, des difficultés dans le contrôle des mouvements fins des doigts. Par ailleurs, il semble exister une hétérogénéité développementale importante des rythmes de développement de la motricité fine puisque Schneck et Henderson (1990) observent qu'à l'âge de 5 ans, 20% des enfants présentent des tenues primitives du stylo (prise palmaire).

Partant de ces résultats et après avoir observé les pratiques d'enseignants qui consistent à faire écrire dans l'air (Bonneton-Botté et al., 2019), nous avons cherché à savoir si la connaissance des lettres pouvait être développée au moins partiellement à partir de la motricité globale, la motricité globale référant ici à toute action motrice qui mobilise le corps dans sa globalité (Bara & Bonneton-Botté, 2018). Dans cette étude, nous avons demandé à des élèves de dernière année d'école maternelle de produire des lettres avec le bras en les traçant dans l'air et de marcher sur des lettres tracées au sol. Comme le développement de la motricité globale se produit plus tôt que le développement de la motricité fine (Cratty, 1979), nous avons supposé que les mouvements en motricité globale devraient être particulièrement utiles pour les jeunes enfants qui ne peuvent pas encore utiliser les mouvements de motricité fine requis pour l'écriture manuscrite ou pour des enfants présentant des besoins éducatifs particuliers et pour qui l'écriture manuscrite au stylo n'est pas encore accessible. Dans cette recherche, nous avons comparé deux programmes d'entraînement visant à acquérir des connaissances sur les lettres de l'alphabet (nom, forme et ductus de la lettre). Un programme fondé sur la production de

lettres en motricité globale a été comparé à un programme plus traditionnel basé sur l'exploration visuelle des lettres. Nous avons supposé que la motricité globale, en permettant de construire une représentation motrice des lettres, permettrait, mieux qu'avec une simple exploration visuelle, de développer une meilleure connaissance des lettres.

Les programmes d'entraînement ont été mis en œuvre par 8 enseignantes volontaires qui ont reçu une formation préalable sur l'enseignement des lettres de l'alphabet, sur la démarche expérimentale et sur la nécessité de suivre précisément un protocole expérimental.

Avant le début des programmes et pour composer deux groupes d'élèves aux niveaux comparables, diverses habiletés ont été mesurées. Dans le domaine de la littéracie, la reconnaissance des lettres (donner le nom des lettres visuellement présentées) et la conscience phonémique (mettre en correspondance des mots qui finissent ou commencent par le même son) ont été évaluées. Les compétences visuo-spatiales, visuo-motrices, la planification et la mémoire ont été évaluées à partir du test de la figure complexe de Rey-Osterrieth (Rey, 1959). Lors des tests statistiques préliminaires, aucune différence n'a été trouvée entre les deux groupes d'élèves sur aucune mesure (tests t de Student, tous $ps > 0,25$). 72 élèves âgés en moyenne de 5 ans et 4 mois (31 filles et 41 garçons) ont été répartis aléatoirement à l'intérieur de chaque classe soit sur le programme motricité globale soit sur le programme exploration visuelle. Avant le programme, aucune classe n'avait débuté l'enseignement des lettres en cursive. Le programme consistait à travailler deux lettres au cours de séances hebdomadaires de 45 minutes. 12 lettres fréquentes en langue française ont été travaillées au cours des 6 semaines d'entraînement : -a-, -i-, -r-, -n-, -t-, -v-, -b-, -l-, -d-, -m-, -p-, and -f-. Pour éviter un effet enseignant, les deux programmes ont été mis en œuvre dans chaque classe par le même enseignant avec une répartition aléatoire des élèves dans les ateliers. Deux semaines avant et après le programme, des pré et post-tests ont été proposés à chaque enfant dans le cadre d'une passation individuelle assurée par une expérimentatrice. Ces tests permettaient de mesurer la connaissance pour chaque enfant des 12 lettres étudiées. Un test de reconnaissance demandait à l'enfant de pointer une lettre nommée parmi 10 lettres cibles (score max =12). La connaissance du nom des lettres a été mesurée en présentant 12 cartes sur lesquelles étaient inscrites les 12 lettres étudiées et en demandant à l'enfant de nommer chaque lettre. Chaque carte ayant été présentée deux fois dans un ordre aléatoire, le score maximum était de 24. L'habileté à tracer les lettres a été mesurée à partir de différentes tâches : une tâche d'écriture des 12 lettres sous dictée (score max=12) et une tâche d'écriture des lettres en situation de copie (la copie se fait sur une feuille blanche posée sur une tablette digitalisante WACOM intuos 2

reliée à un ordinateur). Pour cette dernière tâche, les lettres produites ont donné lieu à une cotation du sens de tracé des segments qui composent la lettre (1 point accordé par lettre tracée avec le bon ductus), à une évaluation à l'aveugle de la qualité de la lettre produite par deux enseignantes (les enseignantes devaient accorder un score de 0 à 5 en fonction de la qualité du tracé ; l'accord inter-juges a été mesuré par le coefficient kappa pondéré de Cohen, $k = 0,87$). Enfin une analyse des caractéristiques cinématiques du tracé a pu être réalisée grâce au logiciel Ductus (Guinet & Kandel, 2010). Les caractéristiques du mouvement de tracé ont été évaluées à partir de la vitesse du tracé, de la fluence mesurée par le nombre de pics d'accélération et décélération, du nombre et de la longueur des pauses réalisées.

Le programme dit « traditionnel » d'exploration visuelle (PEV) des lettres proposait à chaque séance d'explorer c'est-à-dire de parcourir visuellement les deux lettres étudiées et projetées au tableau. Le modèle projeté indiquait par des flèches et des points le ductus de la lettre et les enfants étaient encouragés à parcourir visuellement le tracé de la lettre en respectant ce ductus. Cette activité était complétée d'une activité de discrimination visuelle (identifier la lettre étudiée parmi 8 lettres présentées au tableau dont trois lettres intruses) et une tâche de reconnaissance visuelle de la lettre placée à l'intérieur d'un mot. Dans cette dernière tâche, il ne s'agissait pas pour l'enfant de lire la lettre mais d'indiquer les mots contenant la lettre cible.

Le programme visuo-moteur impliquant la motricité globale (PVM) proposait aux enfants deux types d'activité. Dans la première activité, l'enseignante tournant le dos aux enfants traçait dans l'air la lettre cible avec sa main et son bras. Les enfants étaient invités à reproduire ce tracé de la même façon en gardant d'abord les yeux ouverts. Dans un second temps, afin de centrer l'attention des enfants sur les informations proprioceptives, ils étaient invités à reproduire ce tracé en gardant les yeux fermés. Au cours d'une seconde activité, les enfants étaient invités à explorer la lettre avec l'ensemble du corps en marchant sur la lettre étudiée tracée au sol à la craie. Comme dans la première activité et pour les mêmes raisons, les enfants réalisaient ce parcours une première fois avec les yeux ouverts, et une seconde fois avec les yeux fermés guidés par un camarade qui leur tenait la main.

Quel que soit l'atelier proposé à l'enfant (PEV ou PVM), chaque séance commençait pour l'ensemble de la classe par une présentation du nom et du son des 2 lettres étudiées et s'achevait par une tâche de reconnaissance (reconnaître les lettres étudiées parmi des lettres distractrices) et une tâche d'écriture sur feuille blanche des deux lettres étudiées, la consigne étant d'écrire ces lettres de mémoire en essayant de respecter le ductus (grammaire de l'action attendue).

Les résultats obtenus à partir d'analyses de variance montrent que la reconnaissance des lettres augmente significativement plus avec le programme visuo-moteur. En revanche, la connaissance du nom des lettres et la capacité à les écrire sous dictée progressent de façon comparable pour les deux types de programmes. En ce qui concerne la tâche de copie, la qualité des tracés évaluée par une méthode inter-juges montre que les lettres tracées par le groupe PVM sont jugées comme étant de meilleures qualités que celles tracées par le groupe PEV. Les mesures réalisées à partir du mouvement de tracé indiquent que le ductus est significativement mieux respecté par le groupe « visuo-moteur ». Le nombre et la durée moyenne des pauses ainsi que la vitesse de tracé des lettres ne varient pas significativement d'un programme à l'autre. Seule la fluidité se distingue : les élèves du groupe PVM produisent un mouvement significativement moins fluide que les élèves du groupe « exploration visuelle ». En résumé, le programme visuo-moteur s'est traduit par une meilleure reconnaissance des lettres, une meilleure connaissance du sens de tracé des lettres étudiées et des lettres mieux tracées en post-test. L'indice de fluidité montre que les élèves du groupe PVM n'ont pas progressé du point de vue de l'automatisation du mouvement contrairement au groupe PEV. La connaissance du nom des lettres, la capacité à les écrire sous dictée ainsi que certaines caractéristiques cinématiques du mouvement ont progressé de façon comparable pour les deux programmes.

Le résultat probablement le plus intéressant de cette étude concerne l'amélioration significative de la reconnaissance des lettres après un programme en motricité globale par comparaison à un programme principalement centré sur l'exploration visuelle des lettres. Le temps passé à explorer les lettres visuellement étant plus important dans le cadre du programme exploration visuelle, nous aurions pu intuitivement penser observer un résultat inverse. La motricité globale a donc significativement contribué à construire une représentation visuelle de la lettre. Le lien étroit entre perception et motricité et le rôle bénéfique de la motricité (*i.e.*, exploration tactile, écriture) pour la reconnaissance visuelle des lettres ont été soulignés à plusieurs reprises chez l'enfant (Gentaz et al., 2009 ; Longcamp et al., 2005; Labat, Ecalle, & Magnan, 2010) mais jamais ce même mécanisme n'avait été identifié dans le cas de la motricité globale. Pour expliquer ces résultats, les auteurs convoquent généralement la théorie incarnée de la cognition qui modélise les relations étroites entre systèmes visuels et moteurs dans les activités de lecture et d'écriture (James & Atwood, 2009; James & Gauthier, 2006; Longcamp, Anton, Roth, & Velay, 2003). Dans cette perspective, les traces sensori-motrices de la lettre renforcent les traces visuelles, ces traces multisensorielles favorisent le processus de mémorisation en facilitant l'encodage et le rappel. L'ensemble des résultats semblent par ailleurs montrer que le

renforcement du lien entre représentation visuelle et motrice des lettres s'est traduit par une production de lettres de plus grande qualité et par un meilleur respect de la direction des traits qui composent les lettres au détriment de l'automatisation du mouvement. Les enfants du groupe visuel ont donc réalisé des tracés de lettres moins précis (du point de vue de la forme de la lettre et de la direction des traits) qui a pu faciliter un contrôle proactif du mouvement comme l'indique d'ailleurs le nombre de pics d'accélération-décélération qui décroît significativement pour les élèves de ce programme.

Ces résultats permettent d'entrevoir quelques perspectives de recherches complémentaires et des pistes de réflexion pour l'enseignement. Tout d'abord, considérant la nécessité de penser des situations pédagogiques accessibles à tous, la possibilité de travailler certaines propriétés des lettres (reconnaissance et production de la forme et ductus) en motricité globale avec des enfants dont le développement de la motricité fine est retardé ou empêché pourrait s'avérer intéressant. Cette perspective de recherche sera développée dans le cadre du projet KALIGO +, projet qui a pour objectif la création d'un environnement informatique d'assistance à l'enseignement de l'écriture pour des élèves au développement troublé (élèves avec handicap moteur ou avec trouble de la coordination motrice). En second lieu, ces résultats doivent nous permettre d'engager une réflexion sur la conception des séquences d'enseignement de la lecture et de l'écriture. Le geste d'écriture est une habileté complexe qui engage des processus de haut niveau et de bas niveau et qui demande à l'enfant de coordonner simultanément les dimensions topocinétiques et morphocinétiques du mouvement. L'écriture dans l'air ou le déplacement du corps représente un moyen de diminuer une part de la charge essentielle inhérente à l'activité d'écriture tout en poursuivant l'objectif de construire des traces multisensorielles des lettres : l'enfant n'a pas à tenir le stylo, à gérer la trace dans l'espace de la feuille, et n'a pas par conséquent à mobiliser certaines compétences visuo-spatiales ou de motricité fine. La centration sur la forme motrice de la lettre, l'ordre et la direction des traits constitueraient alors la charge essentielle de la tâche dans la théorie de la charge cognitive (Sweller, 1988). Concevoir des situations accessibles pour la mémoire de travail de jeunes enfants ou d'enfants au développement atypique est l'une des propositions de la théorie de la charge cognitive (Puma & Tricot, 2021). Charge aux chercheurs en psychologie du développement de vérifier ce qui constitue à chaque étape du développement (et pour chaque type de tâche) une contrainte pour l'apprentissage et d'expérimenter en contexte scolaire pour identifier les trajectoires d'apprentissage optimales au regard des spécificités développementales des apprenants. C'est

dans cette perspective qu'avec Florence Bara nous avons entrepris d'étudier le rôle de la trace visuelle dans l'activité d'écriture cursive.

5.3. Faire écrire sans laisser de trace présente-t-il un intérêt ? (Étude 6).

La chapitre 2 a permis de présenter les modèles d'acquisition du geste d'écriture et de souligner le rôle essentiel des feedbacks sensoriels et de la connaissance du résultat pour la mise en place d'une écriture lisible, rapide et fluide. Le scripteur expert allie un mode de contrôle proactif fondé sur les programmes moteurs et un contrôle rétroactif fondé sur le traitement des informations sensorielles visuelles et proprioceptives au cours du déroulement de l'action (Wolpert & Flanagan, 2001). Les feedbacks visuels et somato-sensoriels ont des rôles différents et complémentaires (Danna & Velay, 2015). Le feedback proprioceptif (associant kinesthésie et perception tactile) renseigne sur les caractéristiques spatiales (trajectoire et longueur de trajectoire), cinématiques (vitesse, fluidité) et dynamiques (pression) des mouvements d'écriture. Le feedback visuel est particulièrement important pour les aspects topocinétiques du mouvement d'écriture : il permet de contrôler la position des mots entre eux ou sur la ligne, la position des lettres au sein d'un mot ou encore la position des segments au sein d'une lettre. Il existe un certain nombre d'études sur le contrôle moteur et l'utilisation du feedback dans l'écriture manuscrite des adultes et des enfants (pour une revue, Danna & Velay, 2015), cependant très peu d'entre elles concernent les enfants de maternelle (sauf Chartrel & Vinter, 2008). Les études 1 et 2 ont permis de montrer que les enseignants de maternelle déclarent modifier parfois le retour d'information en demandant aux élèves, notamment en difficulté, d'écrire dans le sable, dans l'air ou sans encre mais l'impact de la suppression de la trace sur la dynamique du geste d'écriture est finalement assez méconnu. Les innovations technologiques et numériques offrent l'opportunité de modifier les feedbacks en ajoutant des informations visuelles, verbales ou sonores, en supprimant la trace visuelle et ces modifications pourraient contribuer à améliorer certaines caractéristiques du tracé et/ou du geste d'écriture (Bonneton-Botté et al., 2020 ; Danna & Velay, 2015; Patchan & Puranik, 2016). Comme la suppression de l'information visuelle sur la trace est fréquemment proposée par les enseignants au cours de l'apprentissage de l'écriture manuscrite (en particulier à l'école maternelle, ou au cours préparatoire pour les élèves en difficulté comme moyen de remédiation), il nous a semblé nécessaire de conduire une recherche pour mieux identifier les caractéristiques de l'écriture qui sont affectées lors de cette suppression de l'information visuelle. Les résultats d'une telle étude pourraient nous permettre d'une part de questionner les méthodes d'enseignement en vigueur

voire de contribuer à les transformer, d'autre part, d'envisager de concevoir des exercices sur tablette avec suppression de la trace du stylet.

L'écriture peut s'évaluer à travers la qualité de la trace ou à travers la qualité du geste qui produit la trace (Rosenblum, Weiss, & Parush, 2003). La qualité de la trace fait référence le plus souvent à la taille du tracé et la lisibilité des lettres, tandis que la qualité du geste est jugée à travers plusieurs caractéristiques dynamiques du geste (pauses, vitesse, fluidité).

L'objectif de cette étude (Bara & Bonneton-Botté, 2021) est d'examiner l'effet de la réduction du feedback visuel lié à la trace sur les caractéristiques dynamiques du geste d'écriture manuscrite chez de très jeunes enfants qui commencent à apprendre les lettres (5 ans ou dernière année de maternelle). D'un point de vue développemental, les recherches montrent que les premiers mouvements d'écriture manuscrite sont plutôt balistiques c'est-à-dire qu'ils sont programmés et exécutés en ne tenant pas ou peu compte du feedback sensoriel lors de la production du mouvement. Cette difficile intégration du feedback a pour effet de produire des mouvements lents et irréguliers lorsqu'ils doivent produire une trace qu'ils ne maîtrisent pas bien, comme c'est le cas des lettres. De nombreux retours au modèle sont nécessaires. Les segments qui composent les lettres sont généralement composés de nombreux traits et de nombreuses pauses. Le nombre de traits, la vitesse moyenne et la fluidité sont couramment utilisés comme indicateurs de l'automatisation de l'écriture manuscrite (Thibon et al., 2018). Au tout début de l'apprentissage, nous pouvons supposer qu'une forme de compétition s'opère entre les traitements issus des feedbacks visuels relatifs à la connaissance du résultat et ceux issus des feedbacks proprioceptifs relatifs aux mouvements. Conformément aux attentes des enseignants qui évaluent la trace (cf. étude 1 et 2), l'enfant va probablement accorder une large part de son attention à la trace visuelle laissée sur le support au détriment d'autres caractéristiques liées à la dynamique du geste d'écriture. Cette considération pour la trace peut contribuer à la lenteur du geste, à son manque de fluidité et à la présence de nombreuses retouches. Dans cette étude, nous avons fait le choix de réduire partiellement le feedback visuel en supprimant la trace visuelle mais en préservant la vision du stylo et des repères spatiaux utiles à la composante topocinétique de l'activité (position sur la page, saut de ligne...). Nous avons supposé que la réduction du feedback visuel améliorerait la vitesse et la fluidité au détriment de la qualité de la production. La suppression temporaire du feedback visuel chez les jeunes enfants pourrait favoriser un contrôle proactif qui aiderait à écrire avec plus de fluidité, au risque cependant d'être moins précis et moins lisible. 64 enfants (29 filles et 35 garçons) âgés en moyenne de 5 et 4 mois et scolarisés en dernière année de maternelle ont été rencontrés dans

leur école. Pour l'ensemble de la population, l'enseignement de la cursive avait été initié 4 mois auparavant. Les enfants ont eu à écrire en situation de copie 12 lettres cursives (a, i, r, b, f, m, d, n, t, v, l, p) de différents niveaux de complexité motrice une fois à l'aide d'un stylo encreur et une fois avec un stylo non encreur. Ces lettres fréquemment choisies au début de l'apprentissage par les enseignants varient quant à l'axe de projection, à la longueur de la trajectoire, le nombre de segments et à leurs directions (Thibon et al., 2018). L'ordre de passation des lettres était aléatoire, la moitié des enfants a commencé avec le stylo encreur, l'autre moitié avec le stylo non encreur (Stylo Intuos). Le modèle était laissé à l'enfant jusqu'à ce qu'il ait fini son tracé. Aucune contrainte de temps ou de vitesse n'a été donnée aux enfants. Les deux sessions étaient espacées d'une semaine. Les enfants ont écrit sur une page blanche (A4) elle-même posée sur une tablette digitalisée. Les données sont traitées à partir du logiciel Ductus (Guinet & Kandel, 2010). Les enfants ont pu découvrir les tâches grâce à deux lettres (e et h), cet essai leur a permis de découvrir le stylo non encreur. Ces deux essais n'ont pas fait partie des analyses. Avant la tâche d'écriture, nous avons cherché à déterminer le taux de reconnaissance des 12 lettres par les enfants à partir d'une tâche de désignation (taux de reconnaissance en pourcentage A: 100 I:98 R: 71,8, B: 37,5, F: 70,3. M: 90,6; D: 64%; N:92,2; T: 84,4; V:64, L: 70; P: 60,9).

Le logiciel Ductus permet de calculer la longueur de la trajectoire tracée, la vitesse, la fluidité, les temps de pause crayon en l'air (lift) et leur durée. La trajectoire (cm) correspond à la longueur de la trajectoire de la pointe du stylo sur la surface de la tablette lors du tracé de la lettre. La vitesse est le rapport entre la trajectoire et le temps (cm/s). Les temps de pause crayon en l'air correspondent au moment de l'écriture d'une lettre où le stylet n'est pas en contact avec la surface. Certains levers de crayon entre les segments sont normaux et sont directement induits par le type de lettre (e.g., le lever de crayon avant de tracer la barre horizontale dans le t) tandis que certains levers révèlent des difficultés dans la programmation du mouvement et correspondent fréquemment au fait de regarder le modèle. La durée moyenne des traits (ms) correspond au rapport entre le nombre de traits et la durée totale des traits. La fluidité correspond au nombre de pics d'accélération et de décélération au sein d'un trait. La qualité de l'écriture a été jugée par deux enseignants, qui ont noté chaque lettre de 0 (non reconnaissable) à 5 (parfaitement écrite pour un enfant de cet âge). Chaque production de l'enfant dans la condition de feedback réduit a été enregistrée sur l'ordinateur et ensuite imprimée sur un papier pour être évaluée par les enseignants. Les productions des enfants dans les deux conditions

expérimentales ont été présentées dans un ordre aléatoire (sujet/condition/lettre). Après évaluation, l'accord inter-enseignants est élevé (coefficient kappa pondéré de Cohen, $\kappa = .87$).

Concernant le tracé de lettres en condition visuelle ordinaire, les résultats obtenus s'accordent avec les recherches antérieures. Les enfants ont écrit une lettre en moyenne avec 1,72 cm/sec en condition normale d'écriture et 2,86 cm/sec avec un feedback visuel réduit. Ces résultats sont en accord avec l'étude de Vinter et Chartrel (2009) qui a été menée avec des enfants du même âge, et qui a trouvé, en fonction de la condition, une vitesse moyenne comprise entre 1,24 cm/sc et 2,40 cm/sec. Ces vitesses relativement élevées comparativement à celles d'enfants plus âgés (Thibon et al., 2018) confirment le fait que les jeunes enfants ont tendance à produire des mouvements balistiques rapides lors des premiers tracés avec peu d'intégration du feedback visuel pendant le mouvement. Nos résultats confirment aussi la relation entre la complexité motrice de la lettre et les caractéristiques dynamiques : plus les lettres sont jugées complexes et plus elles sont tracées lentement avec une faible fluidité, de nombreux traits et de nombreuses pauses (Thibon et al., 2018).

Quels ont été les effets de la suppression de la trace ?

Puisque l'intégration du feedback sensoriel est difficile pour les jeunes enfants, nous avons essayé de savoir si la suppression du feedback visuel sur la trace pouvait conduire à des améliorations de certaines caractéristiques du mouvement. Les capacités limitées de la mémoire de travail limitent le traitement et pour les jeunes enfants, il peut être difficile de traiter tous les éléments à la fois (Maxwell, Master & Eves, 2003). Il pourrait y avoir, selon les tâches proposées aux enfants, une compétition entre le traitement de la qualité de la trace qui correspond aussi au respect de la forme à tracer (caractéristique sur laquelle les enseignants insistent largement lors des séances d'apprentissage et qu'ils évaluent le plus) et le traitement des aspects dynamiques du mouvement.

Dans notre étude, la suppression de la trace a diminué le nombre moyen de levers de stylo, a augmenté la vitesse moyenne de tracé et a amélioré la fluidité. Cependant, elle a augmenté la taille des lettres (longueur de la trajectoire) et a réduit leur qualité. Ainsi, conformément à nos hypothèses, nous avons observé que la suppression de la trace a eu des effets différents selon la mesure considérée (aspects statiques vs dynamiques de l'écriture manuscrite). D'une part, la suppression de la trace contribue à améliorer le geste mais d'autre part, elle détériore la qualité de la trace. Nos résultats révèlent aussi que l'impact de la réduction du feedback visuel est dépendant du type de lettre. Le feedback visuel utilisé pendant la production du mouvement est

très important pour les aspects topocinétiques de l'écriture manuscrite (*i.e.*, disposition spatiale des traits entre eux) comparativement aux aspects morphocinétiques (forme de la lettre). Comme le feedback visuel est nécessaire pour le contrôle de l'arrangement spatial, sa réduction a un impact plus important sur certaines lettres que sur d'autres. Pour une lettre de faible complexité comme /l/ (une boucle et deux traits), la modification du feedback améliore les caractéristiques dynamiques sans trop détériorer la qualité de la forme comparativement à la lettre /f/ qui, en l'absence de trace, n'a pas été reconnaissable dans 43% des cas.

La suppression de la vision pendant l'écriture semble promouvoir un contrôle proactif qui aide les jeunes enfants à écrire plus rapidement et avec plus de fluidité, mais au risque d'être moins précis et moins lisible. Ces résultats reproduisent ceux obtenus chez les enfants plus âgés et les adultes (Chartrel & Vinter, 2006 ; Alamargot Morin, 2015, Guilbert et al, 2019) : en l'absence de vision, la vitesse du stylo et la longueur de sa trajectoire augmentent. Quelle que soit la privation d'informations sensorielles (visuelles et/ou proprioceptives), les participants ont eu tendance à compenser en amplifiant leur mouvement (censé maximiser le feedback proprioceptif) et en augmentant la vitesse. Dans une étude où le feedback proprioceptif a été perturbé par la granularité du support d'écriture, la diminution de la lisibilité des tracés a également été constatée par Guilbert et al. (2019). En écrivant sur la surface lisse d'une tablette, les participants ont produit des lettres moins lisibles que lorsqu'ils écrivaient sur une surface granuleuse. Ces résultats nous indiquent que la vision et la proprioception contribuent au contrôle de l'écriture manuscrite de façon complémentaire.

La détérioration de la qualité de la lettre peut aussi s'expliquer par la méconnaissance du résultat. Dans cette expérience, l'enfant trace la lettre sans voir la trace. Il n'a qu'un seul essai et n'a donc pas la possibilité de s'améliorer en ajustant le geste au fur et à mesure que le résultat est produit pour un essai suivant. Il a été démontré que cette connaissance des résultats est très importante pour l'apprentissage moteur (Salmoni et al., 1984). Les études sur l'apprentissage moteur global chez l'adulte soulignent que le type de focalisation de l'attention modifie la performance et l'apprentissage. La focalisation externe concerne le résultat du mouvement alors que la focalisation interne concerne le mouvement lui-même. Ces études tendent à montrer que les instructions induisant une focalisation externe de l'attention ont des effets plus bénéfiques sur la performance et l'apprentissage qu'une focalisation interne (Wulf, 2013). Cependant, ces études se sont concentrées sur des mouvements en motricité globale (lancer, pointer) présentant une forte composante topocinétique, de telles études n'ont pas été conduites pour l'écriture manuscrite chez le scripteur débutant. Rappelons que l'écriture est une habileté motrice

spécifique qui articule des composantes à la fois topocinétique et morphocinétique, cette habileté nécessite aussi un haut niveau de motricité fine et de coordination. Dans une prochaine étude, nous envisagerons le bénéfice, au cours d'essais répétés, de la production de tracé de lettres avec i) suppression de la trace visuelle au cours de l'activité ii) report de la connaissance du résultat à la fin de chaque essai. Il s'agira en quelque sorte de vérifier que le fait de désynchroniser temporellement le moment de la production de la trace et la connaissance du résultat apporterait un intérêt dans le processus d'apprentissage. Cette proposition s'inscrit dans le projet KALIGO+, un projet dédié à l'acquisition de l'écriture chez des enfants en situation de handicap (cf. Perspective présentée au chapitre 10).

6. Le numérique au service de l'écriture : conception et évaluation d'applications intelligentes pour tablette.

Les projets d'innovation¹ Intuiscript et Kaligo-Français cycle 2 ont été l'occasion d'envisager les potentialités d'applications intelligentes destinées aux tablettes équipées d'un stylet dont l'objectif est d'accompagner l'enseignement et l'apprentissage du geste d'écriture et de l'orthographe lexicale lors d'une activité manuscrite. Pour ces deux projets, mon rôle a consisté à coopérer au sein d'équipes pluri-catégorielles (ingénieurs, chercheurs, développeurs, enseignants et inspecteurs) pour l'élaboration d'un cahier des charges de l'application et à prendre en charge une étude d'impact en contexte scolaire.

6.1. Evaluation d'une application pour tablette ? L'exemple du projet Intuiscript (étude 7).

Le projet Intuiscript a eu pour ambition de produire une solution intelligente pour tablette équipée d'un stylet permettant d'assister l'enseignement du geste graphomoteur et de soutenir les apprentissages des élèves de maternelle et de cours préparatoire en respectant notamment le rythme des acquisitions propres à chacun. Au regard des projets de recherche que j'ai menés

¹ INTUISCRIPT : Cahier numérique de l'écolier, AAP E-education / PIA Partenaires du projet: IRISA/INSA Rennes (Intuidoc), Script&Go, Microsoft LOUSTIC, l'Académie de Rennes, ESPE, Région Bretagne.

P2IA C2 Kaligo français : une solution d'assistance pédagogique à l'enseignement du français au cycle 2. MEN- Appel à projets Partenariat d'innovation intelligence artificielle. Porteur : Learn&Go. Partenaires : IRISA /INTUIDOC ; IRISA /EXPRESSION ; LOUSTIC ; INSPE ; Académies de Rennes, Caen, Nancy-Metz.

antérieurement, Intuiscript a été l'occasion de découvrir la coopération au service de la recherche et du développement entre plusieurs partenaires et la démarche conception centrée utilisateur : Learn and Go, une entreprise privée chargée de développer et commercialiser l'application, les équipes INTUIDOC et EXPRESSION du laboratoire IRISA chargées de développer les moteurs d'analyse de l'écriture manuscrite, l'académie de Rennes, chargée d'accompagner la création de contenus et de participer à la conception centrée utilisateur, la plateforme LOUSTIC et le laboratoire LP3C chargés d'étudier les aspects ergonomiques et moi-même pour le LP3C et l'université de Bretagne occidentale, chargée de i) concevoir un cahier des charges des modules d'apprentissage en coordination avec l'académie, les laboratoires de recherche et les développeurs et ii) de superviser une expérimentation pour valider l'efficacité de l'application en contexte scolaire.

A partir d'une présentation dynamique de modèles d'écriture, l'application, aujourd'hui commercialisée sous l'appellation Kaligo cycle 1, permet aux élèves de travailler de façon autonome l'écriture de lettres, de chiffres ou de mots (d'autres fonctionnalités centrées sur le dessin ne seront pas décrites ici). Une analyse automatique et immédiate de la production de l'élève renvoie un feedback sous la forme d'une jauge et d'annotations colorées (cf. figure 3). Les informations analysées et renvoyées concernent la forme produite, la direction et l'ordre des traits à l'intérieur des lettres ainsi que la continuité du tracé. Les analyses réalisées sur les productions permettent de personnaliser les scénarii pédagogiques. Ainsi un élève qui, à plusieurs reprises, échoue à tracer les lettres d'un mot et à les enchaîner, se verra proposer par l'IA des exercices spécifiques de tracés de lettres ou de segments de lettres non maîtrisés.



Figure 3 : Trois essais et leurs feedbacks sous forme de jauge colorée et d'étoile pour la première syllabe du mot « lion »

Les effets de cette application ont été mesurés en contexte scolaire à partir d'une étude quasi-expérimentale impliquant 233 élèves de grande section âgés en moyenne de 5 ans et 4 mois

(Bonneton-Botté et al., 2020). Au total, 22 classes de grande section ont participé à un programme de 12 semaines mis en œuvre par les enseignant.es. Le groupe contrôle, composé de 93 élèves, a poursuivi le programme scolaire en travaillant exclusivement sur papier (« groupe traditionnel »), tandis que les 138 élèves du groupe expérimental bénéficiaient, en complément d'un travail sur papier, de temps d'ateliers sur tablettes équipées de l'application Kaligo cycle 1. Un pré-test et un post-test (*i.e.*, consistant à écrire des lettres, des groupes de lettres, des mots et pseudo-mots sur une feuille de papier elle-même posée sur une tablette digitalisante) ont été réalisés pour évaluer les progrès de tous les enfants et vérifier l'existence d'un transfert d'apprentissage du support tablette au support papier. L'analyse des productions au pré-test à partir du moteur d'analyse de Kaligo a permis de catégoriser les niveaux en écriture des participants (score faible, modéré ou élevé) au début de l'étude. Nous faisons l'hypothèse, comme le suggèrent Sullivan et al. (2008) que les apprentissages réalisés sur tablette pourraient dépendre des capacités graphomotrices initiales des élèves impliqués dans l'étude.

Pour comparer l'impact du programme d'enseignement (groupe tablette versus groupe traditionnel ayant uniquement travaillé sur papier) entre le pré-test et le post-test, nous avons soumis ces mesures à une analyse de variance à 2 (programme d'enseignement) x 3 (niveau initial) x 2 (temps) facteurs. Le programme d'enseignement et le niveau initial étaient les deux facteurs inter-sujets, et le temps (pré-test vs post-test) était le facteur intra-sujet. Cette analyse n'a pas réussi à révéler un effet principal de la condition expérimentale, $F(1, 231) = 1,26, p = .26$, mais un effet significatif du temps a été observé, $F(1, 231) = 106,78, p = .001$, ainsi que du niveau initial, $F(1, 231) = 114,14, p = .001$. L'effet d'interaction entre les conditions expérimentales et le niveau initial n'est pas significatif, $F(1, 231) = 0,006, p = .16$. Des effets d'interaction significatifs ont été enregistrés entre le temps et les conditions expérimentales, $F(1, 231) = 4,78, p = .03$, et entre le niveau initial et le temps, $F(1, 231) = 19,66, p = .001$. Enfin, l'analyse a révélé un effet d'interaction entre les conditions expérimentales, le niveau initial et le temps, $F(1, 231) = 3,95, p = .03$. Des tests post hoc ont été effectués en utilisant le test HSD de Tukey fixé au seuil de 0,05. Ceux-ci ont révélé un effet significatif de la condition expérimentale, mais seulement pour les enfants avec un niveau graphomoteur initial modéré. Aucun effet d'apprentissage n'a été observé pour les élèves ayant un niveau initial élevé dans l'un ou l'autre des groupes expérimentaux. Les élèves ayant un score initial faible ont fait des progrès significatifs entre les deux mesures, quelle que soit la condition expérimentale.

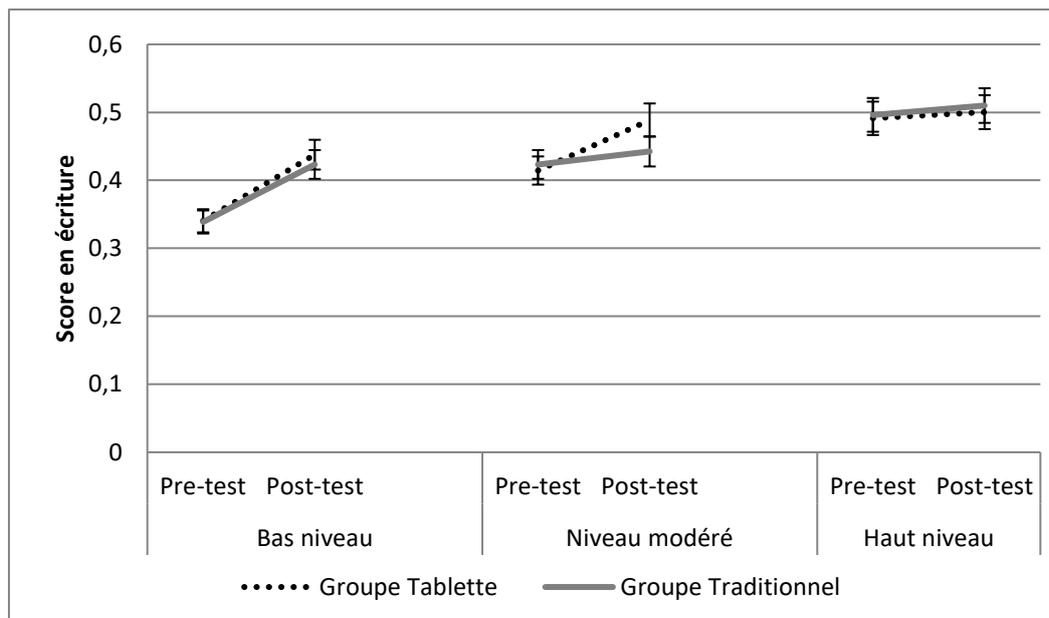


Figure 4 : Évolution des scores d'apprentissage en écriture en fonction du groupe (Tablette vs. Traditionnel) et du niveau initial des enfants en graphomotricité.

Les résultats présentés en figure 4 montrent donc que les progrès observés dépendent du niveau graphomoteur initial des élèves au début de l'étude. Les élèves avec un niveau graphomoteur élevé au début de l'étude n'ont pas montré de progrès significatifs en écriture qu'ils soient dans le groupe « tablette » ou dans le groupe « papier ». Cette absence d'effet traduit très probablement un effet plafond : ces élèves présentant de bonnes compétences au départ n'ont pas réalisé de progrès notables en écriture quelle que soit la condition d'apprentissage. Les élèves avec un niveau graphomoteur modéré au début de l'étude et qui ont bénéficié des tablettes ont progressé significativement plus que les élèves de niveau modéré qui ont travaillé sur papier. Les élèves qui présentaient un niveau graphomoteur faible ont progressé mais de la même façon qu'ils aient travaillé sur papier ou sur tablette. En résumé, en considérant le niveau graphomoteur initial des élèves, cette étude a permis de montrer que les bénéfices d'un apprentissage sur tablette équipée d'une application « intelligente » sont supérieurs ou comparables à un apprentissage uniquement réalisé sur papier. Le fait que les apprentissages soient transférés en situation papier n'est pas un résultat négligeable. En effet rappelons que certaines recherches réalisées sur des temps courts (quelques heures) ont montré que la différence de friction entre les supports papier et le support tablette perturbe les stratégies graphomotrices des enfants et des adultes (Alamargot & Morin, 2015 ; Gerth et al., 2016). En accordant aux élèves et aux enseignants un temps conséquent pour s'appropriier l'outil, les études ont de meilleures chances de mesurer objectivement les bénéfices des technologies

numériques. Pour les élèves présentant un score grapho-moteur faible initial, la question se pose de savoir quelles modifications pourraient contribuer à augmenter la plus-value de l'outil KALIGO. En premier lieu, il nous semble qu'apposer un filtre sur l'écran de la tablette permettant d'obtenir une granularité semblable au papier aurait pu être bénéfique (Guilbert et al., 2019). Il nous semble aussi que la durée de l'entraînement devrait être personnalisée et adaptée aux besoins de chaque enfant. Il est possible que le temps nécessaire à la prise en main de l'outil ne soit pas semblable pour tous ; les enfants avec un faible score grapho-moteur initial auraient probablement bénéficié d'un dispositif plus long ou tout au moins d'une prise en main de l'outil plus longue. L'approche quasi-expérimentale exigée dans ce type d'étude oblige à harmoniser au maximum les conditions contrôle et expérimentale. Une étude complémentaire serait nécessaire pour évaluer l'effet du temps d'entraînement sur tablette sur les bénéfices obtenus en écriture pour des élèves présentant des scores grapho-moteurs initiaux différents.

Plusieurs études ont démontré le rôle de la graphomotricité sur la production écrite : les processus orthographiques ne sont pas indépendants des processus dits de bas niveaux (Pontart, et al., 2013 ; Simard-Dupuis, 2019). Aussi, l'analyse en temps réel des productions graphomotrices des élèves a-t-elle permis d'ouvrir des perspectives intéressantes pour l'enseignement de l'orthographe lexicale sur tablette équipée de stylet.

6.2. L'IA pour s'entraîner de façon autonome à la dictée manuscrite (Étude 8)

Au début de l'apprentissage de la lecture et de l'écriture, l'enfant découvre la combinatoire, c'est-à-dire le lien entre les sons (les phonèmes) et la façon dont on peut les transcrire à l'écrit par des lettres ou des groupes de lettres (les graphèmes). Rapidement grâce à cette combinatoire, le lecteur débutant va pouvoir décoder un grand nombre de mots mais il va aussi pouvoir les écrire graphème par graphème en proposant une orthographe phonologiquement plausible mais fréquemment incorrecte (e.g., *tono* pour *tonneau*). La conscience phonémique (ou capacité à segmenter les mots en sons) et la connaissance des correspondances phonèmes-graphèmes jouent un rôle fondamental au début de l'apprentissage de l'écrit. Ces deux composantes entretiennent donc des liens étroits puisque la découverte des correspondances phonèmes-graphèmes dépend de la capacité de l'enfant à segmenter les mots en son (Bosse & Pacton, 2006). Un facteur déterminant pour la mémorisation de l'orthographe lexicale serait la capacité de lecture analytique encore appelée médiation phonologique. Une étude longitudinale menée par Sprenger-Charolles, Siegel, Béchennec, et Serniclaes en 2003 montre que de bonnes capacités de lecture analytique (mesurées par la lecture de pseudo-mots) expliquent une part

importante de variance dans les connaissances orthographiques ultérieures. En effet, lorsque l'enfant rencontre un mot nouveau et qu'il procède à une lecture analytique, il fait appel à ses connaissances des correspondances phonèmes-graphèmes et ce faisant développe ses connaissances orthographiques. Share (2004) convoque une hypothèse d'auto-apprentissage, plus l'enfant décode de mots nouveaux et plus l'enfant enrichit ses représentations orthographiques.

La capacité à traiter simultanément un groupe de lettres visuellement présentées (appelée empan visuo-attentionnel) a aussi été identifiée comme un facteur déterminant pour l'acquisition de l'orthographe. Les recherches ont montré que l'empan visuo-attentionnel augmente progressivement du CP au CM2, et que sa contribution est particulièrement importante pour les mots complexes. En CM2, l'empan visuo-attentionnel prédit à lui seul 26% de la variance sur une dictée de mots (Bosse & Pacton, 2006). Si la lecture analytique et la taille de l'empan visuo-attentionnel déterminent en grande partie le développement des compétences orthographiques, certaines connaissances ont aussi été identifiées comme nécessaires. La maîtrise de l'orthographe lexicale nécessite l'acquisition de connaissances orthographiques et morphologiques (Treiman, 2019). Ces acquisitions s'opèrent d'une part par apprentissage statistique (*i.e.*, de nombreuses connaissances graphotactiques s'acquièrent grâce à une sensibilité aux régularités orthographiques de la langue française : par exemple, le phonème [o] s'écrit plus fréquemment *eau* en position finale (Deacon, Conrad, & Pacton, 2008) ; d'autre part par l'apprentissage explicite qui relève principalement du système scolaire ; c'est le cas notamment des principales règles orthographiques (*i.e.*, je mets « m » devant « m », « b », « p » ou encore je mets une cédille sur le « c » pour conserver le son /s/ devant les voyelles « a », « o », « u ») et des connaissances visuo-orthographiques qui permettent d'orthographier des mots irréguliers comme le mot « thym » par exemple (Treiman, 2019 ; Nootens, Doyen, Noyer-Martin, & Simard-Dupuis, 2019). Une méta-analyse réalisée par Graham et Santangelo (2014) sur 53 études incluant 6 037 élèves de 5 à 17 ans conclut à l'efficacité de l'enseignement explicite. D'autres études soulignent aussi le rôle positif des feedbacks délivrés à l'oral par les enseignants aux élèves lorsqu'ils sont apportés rapidement et qu'ils informent l'élève sur des caractéristiques précises de sa production écrite (Morin & Montésinos-Gelet, 2007 ; Sénéchal et al., 2012). Dans une étude de Arra et Aaron (2001), les élèves bénéficiant d'un feedback précis sur leur production suite à une tâche de dictée (l'enseignant précisait s'il y avait omission, substitution ou transposition de lettres) ont significativement mieux progressé en orthographe

lexicale que les élèves qui avaient simplement la possibilité d'observer la forme correcte du mot à la suite de leur production.

Enfin, il semblerait que les traitements et les apprentissages relatifs à la production écrite, notamment orthographiques, soient aussi impactés par l'aisance graphomotrice. Lorsque l'exécution graphomotrice capte la majeure partie des ressources attentionnelles nécessaires au traitement et/ou au maintien de la forme orthographique alors la performance orthographique est dégradée (Pontart et al., 2013). Pour Simard-Dupuis (2019) il existe un effet *bottom-up* de la graphomotricité sur la réussite orthographique qu'elle localise au niveau du *buffer* graphémique, une instance mémorielle située à l'interface entre les processus centraux et les processus périphériques de l'écriture. L'auteur souligne la nécessité d'interventions éducatives précoces visant l'automatisation des programmes moteurs, afin de réduire le coût cognitif des traitements graphomoteurs au profit des traitements orthographiques. Les relations entre performances graphomotrices et orthographiques ont été mises en évidence à différentes reprises, à différents niveaux scolaires et dans différentes situations (Berninger et al., 2002 ; Connelly, Dockrell, Walter, & Critten, 2012 ; Fayol & Miret, 2005 ; Medwell, Strand, & Wray, 2009 ; Puranik & Al Otaiba, 2012 ; Pontart et al., 2013 ; Bourdin, Cogis, & Foulin, 2010).

En résumé, cet état de l'art indique que pour développer des compétences en orthographe, un enseignement efficient devrait soutenir le développement des habiletés grapho-motrices, la conscience phonémique, la connaissance des correspondances phonèmes-graphèmes, le recours à la lecture analytique, les capacités de traitement visuo-attentionnel (par exemple en masquant le mot à copier). Cet enseignement devrait aussi aborder explicitement certaines connaissances orthographiques et morphologiques et devrait proposer aux élèves des feedbacks précis et immédiats sur leur production orthographique. Les applications intelligentes, en apportant un système de guidage et de feedback adaptatif et immédiat pourraient constituer une réelle assistance à l'enseignement de l'orthographe.

C'est sur la base de ces constats qu'un consortium de chercheurs et de développeurs s'est mobilisé pour répondre à un appel d'offre Projet Innovation Intelligence Artificielle (P2IA) en 2019. Le P2IA cycle 2 – KALIGO a pour objectif le développement d'une application intelligente pour tablette avec stylet dédiée à l'orthographe lexicale et à l'écriture manuscrite. Learn & Go coordonne l'ensemble du projet et est en charge du développement de l'interface, IRISA/INTUIDOC est en charge de l'analyse des erreurs d'orthographe produite en écriture manuscrite sur la tablette, IRISA/EXPRESSION est en charge de la conception des consignes

orales et de l'analyse de la voix de l'élève lorsqu'il a à lire des mots, LOUSTIC (un laboratoire des usages des technologies de l'information et de la communication) est en charge de l'analyse ergonomique de l'interface et des besoins des utilisateurs, le LP3C et l'INSPE, à travers notamment mon implication dans le projet, ont en charge l'état de l'art, la conception des modules d'apprentissage, la conception et la mise en œuvre d'une expérimentation d'impact de la première version de l'application.

La visée de cette application est de développer les connaissances et les compétences orthographiques (*i.e.*, orthographe lexicale) des élèves de cycle 2 sur la base de plusieurs principes extraits des résultats de recherches :

- Développer la connaissance des lettres de l'alphabet, les correspondances phonèmes-graphèmes et graphèmes-phonèmes
- Susciter une lecture analytique avant chaque exercice de copie ou de dictée et produire une correction immédiate si la lecture est erronée.



Figure 5 : Exemple de feedback reçu par l'enfant après lecture du mot cadeau, la prononciation des graphèmes /a/ et /eau/ ne sont pas jugés corrects.

- Développer les capacités visuo-attentionnelles en masquant lors des tâches de copie le mot à copier et en permettant à l'enfant de le faire réapparaître au besoin.

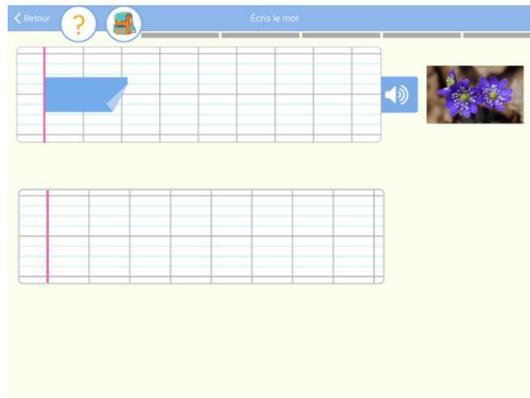


Figure 6 : Exemple de tâche de copie du mot fleur, le mot peut être écouté, il est illustré par une image et le modèle à copier est masqué par un cache qui peut être écarté temporairement en cliquant dessus

- Apporter des informations explicites sur des règles graphotactiques, des connaissances morphologiques, des stratégies métacognitives nécessaires aux compétences orthographiques.

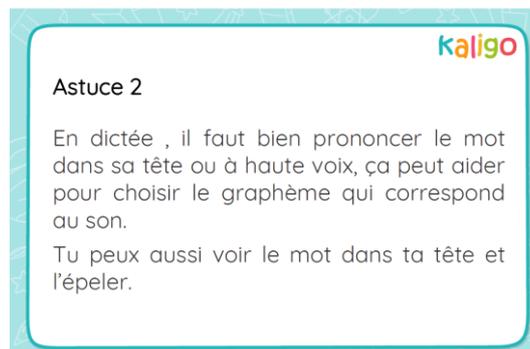


Figure 7 : Exemple de diapositive proposée à l'enfant pour expliciter des stratégies pertinentes lors d'une tâche d'orthographe.

- Offrir une personnalisation du parcours d'apprentissage, par exemple en proposant régulièrement à l'élève des mots irréguliers ou des graphèmes complexes encore non maîtrisés ou en proposant d'abord des mots courts pour découvrir un graphème complexe pour aller progressivement vers des mots plus longs. L'enseignant peut aussi choisir une liste de mots qu'il souhaite que la classe travaille dans la perspective d'une dictée préparée.

- Alternier des exercices de type choix multiple et des exercices de copies et de dictées manuscrites avec une analyse en temps réel de la production de l'enfant suivi d'un feedback immédiat.

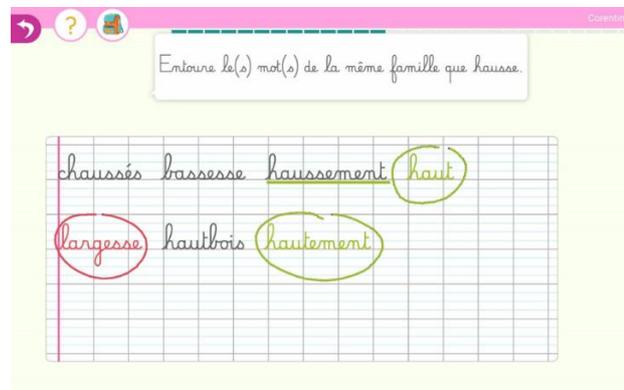


Figure 8 : Exemple de feedback reçu par l'enfant lors d'un exercice visant des connaissances morphologiques : les erreurs apparaissent en rouge, les oublis soulignés en vert, les bonnes réponses apparaissent en vert.

- Renvoyer à chaque élève une information précise sur l'erreur réalisée ainsi que des feedbacks d'encouragement lorsqu'il est en réussite.

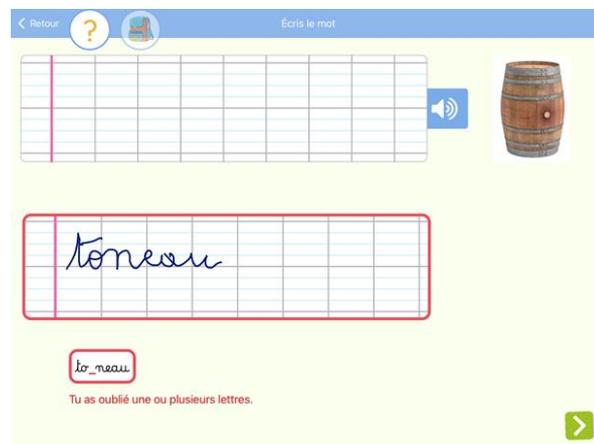




Figure 9 : Exemple d'analyse d'erreur par le moteur et feedback renvoyé à l'enfant au cours de trois essais successifs. L'omission de la lettre par l'enfant est signalée (« tu as oublié une ou plusieurs lettres »), au deuxième essai, le graphème cible qui a posé problème est entouré dans le modèle à produire. Au troisième essai, le mot correctement produit est entouré en vert.

- Assister l'enseignant, en lui proposant des séquences déjà prêtes, en permettant de visualiser les avancées de chaque élève dans le groupe, en assistant la prise décision quant au lexique à travailler. Les caractéristiques qui doivent orienter le choix des mots à travailler sont nombreuses et dépendent des besoins de chaque enfant. La longueur des mots, leur fréquence dans la langue, le champ lexical ou encore la régularité du mot sont autant de caractéristiques qu'il faudrait pouvoir prendre en compte pour différencier les apprentissages et les rendre accessible à tous.

Associée à une tablette équipée d'un stylo, la version finale de l'application analysera la production manuscrite de l'élève en situation de dictée pour personnaliser son parcours d'apprentissage. La version 1 de l'application a consisté à développer les moteurs d'analyse des erreurs de l'élève sur la base de son écriture manuscrite et de ses erreurs en lecture du mot à copier. En écriture, le moteur est capable d'identifier une omission de lettre, une adjonction de

lettre ou une substitution. L'application analyse et renvoie un feedback d'une part en soulignant la partie orthographiée du mot qui est erronée, d'autre part en entourant dans le mot modèle à orthographier le graphème qui a posé problème à l'élève (cf. figure 5), le moteur entoure les graphèmes correspondant aux phonèmes mal prononcés par l'enfant.

Durant la phase de conception de l'application, une première étude exploratoire a été conduite afin de vérifier que les erreurs en orthographe réalisées par des élèves de CP et CE1 au cours d'une dictée sur papier ou sur tablette ne différaient ni qualitativement ni quantitativement (Bonneton-Botté, Girard, Rogard, Anquetil, & Jamet, 2021). Considérant que le faible degré de friction d'une tablette perturbe les stratégies de contrôle grapho-moteur de scripteurs débutants (Alamargot & Morin, 2015 ; Guilbert et al., 2019), l'idée de faire écrire des jeunes enfants sur tablette pouvait laisser craindre que la production orthographique réalisée sur tablette soit de moins bonne qualité qu'une production réalisée sur papier. Nous avons donc cherché à savoir dans un premier temps si une tâche de dictée réalisée par de jeunes enfants sur papier ou sur tablette équipée de stylet était comparable du point de vue de la qualité de la production orthographique. Dans la première étude, 16 enfants d'une classe de CP (n=9) - CE1 (n=7) ont eu à produire une dictée de 8 mots sur papier et sur tablette (avec un ordre de passation contrebalancé) sur deux listes de mots comparables (*i.e.*, fréquence, longueur et consistance phonème-graphème) choisis dans *manulex infra* (Peereman, Lété, & Sprenger-Charolles, 2007).

Dans la seconde étude, deux classes de CE1 (n=23 pour chaque classe) ont eu à produire une dictée de 8 mots identiques soit sur papier (groupe 1), soit sur tablette (groupe 2).

Les variables dépendantes considérées dans les deux études étaient le score d'erreurs graphémiques (nb de graphèmes erronés / nombre de graphèmes dans le mot) et le score de plausibilité phonologique (nb d'erreurs phonologiques / nb de phonèmes dans le mot) repris des travaux de Daigle et al. (2013) et de Plisson (2010).

Pour l'étude 1, les résultats montrent que les CE1 présentent un score graphémique et de plausibilité phonologique significativement meilleur que les CP. L'analyse de variance ne montre aucune différence entre les conditions tablettes et papier pour le score graphémique ($F(1,14) = 0,8$; $p = .38$) comme pour le score phonologique ($F(1,14) = 0,08$; $p = .80$).

Pour l'étude 2, la distribution nous a conduit à réaliser un test U de Man et Withney. Il n'existe pas d'effet significatif des conditions tablette - papier sur les scores graphémiques ($U = 296, p = 0.68$) et de plausibilité phonologique ($U = 300, p = 0.60$) des élèves de CE1.

En situation de dictées de mots, l'écriture manuscrite sur tablette ne semble pas avoir constitué un facteur de perturbation de la production orthographique des élèves de CP et CE1. Ce résultat permettait donc d'envisager l'intérêt d'une application dotée d'une intelligence artificielle sur tablette orientée stylet dédiée à l'orthographe lexicale manuscrite. Cette innovation permettrait d'allier la nécessité de l'écriture manuscrite pour l'apprentissage de l'orthographe aux bénéfices de l'intelligence artificielle et des feedbacks immédiats et adapté au niveau de chaque enfant dans le processus d'apprentissage.

Le projet prévoyait une expérimentation en contexte scolaire sur la version 1 de l'application afin de mesurer l'efficacité du moteur de reconnaissance des erreurs et des feedbacks renvoyés aux élèves (pour les productions orales en lecture et écrite en dictée). Rappelons que cette première version de l'application ne permet pas encore la personnalisation du parcours d'apprentissage et n'est pas encore en mesure d'assister l'enseignant dans sa prise de décision. Les objectifs de cette expérimentation étaient (Bonneton-Botté, Noël, De La Haye & Jamet, en préparation) :

1) de vérifier que l'apprentissage de l'orthographe lexicale (mesuré par un score graphémique et un score de plausibilité phonologique) réalisé sur tablette mais évalué sur un support papier sera significativement meilleur que l'apprentissage réalisé sur papier du fait de l'analyse automatique des erreurs en lecture et en écriture et de la présence de feedback explicitant à l'enfant la nature de l'erreur et précisant la modification à apporter. Au regard des relations qui lient les compétences en lecture et en orthographe, nous faisons l'hypothèse que les faibles lecteurs auront globalement de moins bonnes performances en orthographe. Sullivan et al. (2008) indiquent que les feedbacks pourraient ne pas avoir le même effet selon les caractéristiques initiales des apprenants et préconisent d'examiner les bénéfices des feedbacks en fonction du niveau initial des apprenants dans le domaine d'apprentissage concerné. De façon exploratoire, en évaluant l'efficacité de l'application, nous nous attendons à observer des différences entre les faibles lecteurs et les lecteurs performants.

2) de vérifier que les apprentissages réalisés sur tablette pour un corpus de mots sont transférables à de nouveaux mots et à une évaluation sur un support papier.

La population de l'étude concerne 8 classes de CE2 ($n=172$; 90 filles et 82 garçons ; Min=8 ans et 4 mois ; Max= 9 ans et 8 mois ; Âge moyen = 9 ans et 1 mois), la moitié d'entre elles

constituait le groupe expérimental (n=86), l'autre moitié le groupe contrôle (n=86). Les enseignants des 8 classes se sont portés volontaires pour participer à cette recherche ce qui pourrait apparaître comme un biais de recrutement mais en période de la pandémie il semblait difficile voire impossible de désigner des enseignants d'office. Cependant la répartition des enseignants dans les groupes contrôle et expérimental a été réalisée aléatoirement.

Le design de cette étude est quasi-expérimental avec un pré-test mesurant le niveau de décodage en lecture (E.L.FE, 2008) et évaluant au cours d'une dictée le niveau en orthographe des élèves. Le pré-test en orthographe consistait en une dictée réalisée pour tous sur papier et composée de mots qui pour moitié seront travaillés au cours de la séquence et pour moitié ne le seront pas.

13 mots non travaillés (mots nouveaux) : simple/ déteindre/une jambe/le genre/la justice/une image/une croute/ quitter/ une carafe/ la fumée/la solution/ puissant/indélébile.

13 Mots travaillés : impoli /la teinture/une ampoule/la légende/une gorgée/le jugement/ une carotte/la quiétude/la fièvre/une foulée/un brassard/le cerisier/interdit

Les mots choisis sont composés de 2 à 4 syllabes et correspondent à des mots fréquents et réguliers composés de graphèmes complexes pour des élèves de CE2 et de CM1 dans Manulex (Peereman, Lété, & Sprenger-Charolles, 2007). Nous nous sommes assurés que les mots et les graphèmes travaillés dans cette séquence n'avaient jamais été abordés par les 8 classes impliquées dans cette étude.

Ce pré-test a été suivi d'un dispositif d'apprentissage sur tablette pour la moitié des élèves (« groupe tablette »), d'un dispositif d'apprentissage sur papier (« groupe papier ») pour l'autre moitié. Cette séquence d'une durée de 4 semaines, prévoyait que les 8 classes travaillent sur une liste de graphèmes et de mots deux fois par semaine durant 30 minutes soit à partir d'un livret papier d'entraînement soit à partir de la séquence disponible sur tablette. Les exercices réalisés sur papier ou sur tablette étaient strictement identiques, les différences concernaient l'analyse automatique des erreurs par le moteur, les feedbacks fournis par l'application et la lecture des consignes orales par l'application. Une séance d'exploration a montré que l'avancée dans les exercices étant plus lente sur application que sur un livret papier, nous avons donc ajouté des mots croisés dans les livrets papier pour que les séances des groupes papier et tablette puissent avoir des durées comparables. Dans les classes contrôles et expérimentales, les enseignants ont eu comme consigne de ne pas faire de leçon d'orthographe sur cette période de 4 semaines (autre que celles du livret ou de la tablette). Dans les classes contrôles, les enseignants étaient libres de corriger ou de ne pas corriger les exercices réalisés dans les livrets papier. Notre objectif était bien que les deux groupes d'élèves travaillent de façon autonome

sur cette séquence tout en étant accompagnés de l'enseignant en cas de besoin. Il s'agissait de rester au plus près d'une situation écologique de classe.

Déroulé d'une séance type		
Nom de l'exercice	Condition papier	Condition tablette
Je lis le mot	La consigne écrite propose à l'élève de lire le mot qu'il va travailler par la suite. Le mot à copier est présenté à côté d'une illustration.	Une consigne orale et écrite propose à l'enfant de lire le mot. Un feedback est donné à l'enfant sur sa lecture. Une illustration du mot est disponible, si l'enfant clique dessus, l'application lit le mot.
Je copie le mot	La consigne écrite propose à l'enfant de copier le mot. Le mot à copier est présenté à côté d'une illustration.	Le mot à copier est présenté puis est masqué. Une consigne orale et écrite propose à l'enfant de copier le mot. L'enfant peut cliquer sur un ruban qui cache le mot pour le découvrir en cas de besoin. Le mot à copier est présenté à côté d'une illustration.
Je coche le mot	La consigne écrite propose à l'enfant de retrouver le mot parmi plusieurs présentant des ressemblances. L'enfant doit cocher le mot lorsqu'il le retrouve.	La consigne orale et écrite propose de cocher le mot parmi plusieurs présentant des ressemblances. Un feedback de couleur (vert ou orange) indique à l'enfant si sa réponse est bonne.
J'entoure le mot (exercices déclinés : retrouver le mot	La consigne est donnée à l'écrit : entoure tous les	La consigne est donnée à l'orale et à l'écrit : entoure

cible, trouver des mots de la même famille, trouver des mots qui partagent un son cible).	mots de la même famille que « Fièvre ».	tous les mots de la même famille que « Fièvre ». Un feedback coloré (vert ou orange) est donné à l'enfant pour lui indiquer quelles réponses sont bonnes ou erronées.
J'écris le mot sous dictée	A la fin de la séance, l'enseignant réalise une dictée sur papier collectivement pour les mots qui ont été travaillés dans le livret.	A la fin des exercices, une dictée sur tablette des mots travaillés est proposée. Après chaque essai, la production de l'enfant est analysée par l'IA, un feedback d'analyse de l'erreur est donné. Si l'enfant produit une erreur, un second essai est proposé à l'enfant proposant à nouveau un feedback. Une erreur à l'essai 2 conduit à un troisième et dernier essai avec correction finale.

Tableau 1 : Synthèse d'une séance complète en orthographe dans le dispositif.

A la fin des 4 semaines, un post-test réalisé sur papier est proposé aux deux groupes (1 semaine après la fin du dispositif). Ce post-test propose les mêmes mots qu'au pré-test. Pour rappel, la moitié des mots sont des mots qui ont été travaillés pendant la séquence, l'autre moitié n'a jamais été travaillée. Ces mots « nouveaux » sont composés de graphèmes qui ont été travaillés dans la séquence, ils permettent de vérifier que les élèves ont été capables de transférer les acquisitions réalisées sur un graphème à un mot qui n'a jamais été abordé en séance.

Pour évaluer les progrès, nous avons considéré le nombre d'erreurs graphémiques (Daigle, Ammar, Montésinos-Gelet, 2013; Plisson, 2010). Le score d'erreurs graphémiques est calculé pour chaque mot, il s'agit du nombre de graphèmes erronés divisé par le nombre de graphèmes

dans le mot. Il y aura donc un score graphémique des mots travaillés (GMT) et des mots nouveaux (GMN). Par ailleurs, un score de plausibilité phonologique a été accordé pour chaque mot orthographié. L'expérimentateur vérifie que le mot orthographié par l'enfant est plausible lorsqu'il est lu. Par exemple, si le mot « gaman » est orthographié à la place du mot « gamin », on considère qu'il n'est pas plausible phonologiquement, l'erreur de plausibilité est cotée 1. Dans le cas contraire, si le mot ne comporte aucune erreur de plausibilité phonologique (e.g., « gamain »), le score de 0 est attribué au mot. Un score moyen par enfant est calculé pour l'ensemble des mots orthographiés. Nous analyserons donc un score de plausibilité pour les mots travaillés (PMT) et un pour les mots nouveaux (PMN).

L'analyse réalisée sur les pré-tests indique que les classes expérimentales (« groupe tablette » et contrôles (« groupe papier ») ne sont pas équivalentes au début de l'étude au test de lecture ($F(1,172)=3,83$; $p = .05$; $\eta^2=0,02$) comme en orthographe ($F(1,172)=9,53$; $p=.002$; $\eta^2=0,05$ pour le score graphémique aux mots travaillés, $F(1,172)=12,27$; $p=.001$; $\eta^2=.06$ pour le score graphémique des mots nouveaux, ($F(1,172)=9,32$; $p=.003$; $\eta^2=0,05$) pour la plausibilité phonologique des mots travaillés, ($F(1,172)=12,8$; $p=.001$; $\eta^2=0,07$) pour la plausibilité des mots nouveaux.

Par ailleurs, la population d'étude a été séparée en deux groupes sur la base de la médiane (médiane = 96) obtenue au test de lecture en une minute. Les faibles lecteurs ($n=82$) présentent significativement plus d'erreurs graphémiques sur les mots travaillés ($F(1,168) =54,15$; $p =.001$; $\eta^2 = 0,24$), sur les mots nouveaux ($F(1,168) = 64,29$; $p = .001$; $\eta^2=0,27$) et réalisent plus d'erreurs phonologiques sur les mots travaillés ($F(1,168) =36,81$; $p =.001$; $\eta^2 =0,18$), comme sur les mots nouveaux ($F(1,168) = 50,79$; $p = .001$; $\eta^2 =0,23$).

Ces différences observées avant le début de l'étude entre le groupe contrôle « papier » et le groupe expérimental « tablette » engagent à évaluer les différences entre les groupes au post-test à partir d'une analyse de la covariance. Les effets du groupe expérimental sur les performances en dictée ont été analysés en spécifiant le niveau pré-test en dictée comme covariable, le niveau de lecture (faible/élevé) et la condition (papier/tablette) comme variables indépendantes et les performances au post-test comme variable dépendante.

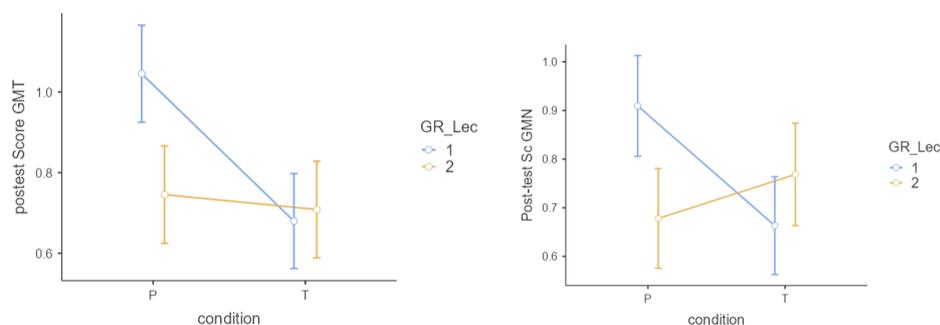


Figure 10 a (à gauche) et b (à droite) : Effet de la condition (P : papier ; T : Tablette) et du niveau de lecture au post-test sur scores moyens d'erreurs graphémiques pour les mots travaillés (GMT) et les mots nouveaux (GMN). Les scores des faibles lecteurs apparaissent en bleu (1) et les bons lecteurs en orange (2). Les barres représentent les intervalles de confiance.

La figure 10 (a et b) fait apparaître les effets d'interaction entre condition et niveau de lecture pour les erreurs graphémiques. L'interaction entre condition et niveau de lecture est significative avec une taille d'effet faible, $F(1,153)= 8,07$ $p=.005$ $\eta^2 = .03$ pour les mots travaillés. Au seuil de .05, les tests post-hoc de tukey indiquent que les faibles lecteurs qui ont travaillé sur tablette sont significativement meilleurs que les faibles lecteurs qui ont travaillé sur papier. Contrairement aux élèves du groupe tablette, les élèves faibles lecteurs qui ont travaillé sur papier ont des performances finales en dictée significativement plus faibles que les bons lecteurs qui ont travaillé sur papier. Après le dispositif, les scores des faibles lecteurs tablette ne se différencient plus de ceux des bons lecteurs papier.

L'analyse de l'interaction entre condition et niveau de lecture pour les erreurs graphémiques sur les mots nouveaux est elle aussi significative avec une taille d'effet faible, $F(1,153)= 11,6$ $p<.001$ $\eta^2=.03$. Les analyses des tests post-hoc montrent un profil similaire à la variable GMT : les faibles lecteurs qui ont travaillé sur tablette ont au post-test des résultats non différents des bons lecteurs tandis que les faibles lecteurs qui ont travaillé sur papier présentent des scores significativement plus faibles que les bons lecteurs qui ont travaillé sur papier. Après le dispositif, les scores des faibles lecteurs tablette ne se différencient plus de ceux des bons lecteurs papier.

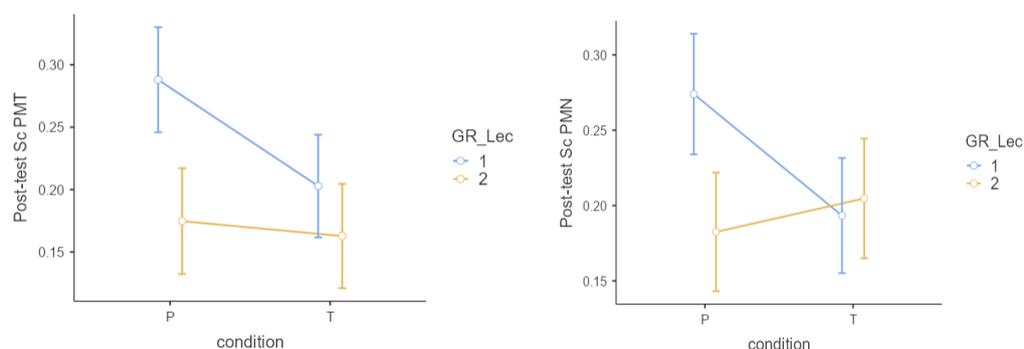


Figure 11 a (à gauche) et b (à droite) : Effet de la condition (P : papier ; T : Tablette) et du niveau de lecture au post-test sur le score moyen de plausibilité phonologique des mots travaillés (PMT) et les mots nouveaux (PMN). Les scores des faibles lecteurs apparaissent en bleu (1) et les bons lecteurs en orange (2). Les barres représentent les intervalles de confiance.

La figure 11 (a et b) fait apparaître les effets d'interaction entre condition et niveau de lecture pour la plausibilité phonologique. Concernant l'analyse de la plausibilité phonologique, il existe une tendance à l'interaction entre condition et niveau en lecture, $F(1,153)=3,19$; $p=.076$ $\eta^2=.015$ pour les mots travaillés. Les tests post-hoc indiquent que les faibles lecteurs sur tablette ont lors du post-test des résultats comparables aux bons lecteurs qui ont travaillé sur tablette et ont des scores supérieurs aux faibles lecteurs qui ont travaillé sur papier. Au post-test, les faibles lecteurs papier présentent des scores significativement inférieurs aux bons lecteurs qui ont travaillé sur papier tandis que les faibles lecteurs tablette ont des scores non différents des bons lecteurs papiers.

L'analyse de la plausibilité phonologique pour les mots nouveaux indique une effet d'interaction entre condition et niveau de lecture, $F(1,153)=7,31$ $p=.008$ $\eta^2=.022$. Les tests post-hocs montrent que les faibles lecteurs sur tablette ont des scores au post-test comparables à ceux des bons lecteurs tablettes et supérieurs à ceux des faibles lecteurs papier. Par ailleurs, les faibles lecteurs papier ont des scores significativement inférieurs aux scores des bons lecteurs papier au post-test. Les scores des faibles lecteurs tablette ne sont pas statistiquement différents de ceux des bons lecteurs papier à la fin du dispositif.

En résumé, les analyses de la covariance réalisées sur le nombre moyen d'erreurs graphémiques et sur le score de plausibilité phonologique montrent un profil assez similaire pour les mots nouveaux comme pour les mots travaillés. Les effets d'interaction qu'ils soient tendanciels ou significatifs vont toujours dans le sens d'un bénéfice d'un apprentissage sur tablette pour les enfants qui présentent au début de l'étude un faible niveau en lecture. Ces conclusions doivent

être considérées avec prudence dans la mesure où la valeur élevée des écarts-types traduit une variabilité inter-individuelle importante. Par ailleurs, si les bénéfices sont avérés pour les faibles lecteurs, les tailles d'effet sont de faible ampleur. La durée très courte de l'entraînement liée aux conditions sanitaires (4 semaines) pourrait expliquer au moins partiellement la faiblesse de ce bénéfice.

Le rapport du CNETCO dédié à l'écriture et à la rédaction rappelle que le français écrit est un système alphabétique, ce qui signifie qu'il transcrit la parole et non pas directement le sens (Jaffré in Etat des lieux, Cnesco, 2018). Pour cela, des correspondances systématiques existent entre des lettres (en fait des graphèmes : l, p, mais aussi ch, eau, on, etc.) et des unités du langage oral (phonologiques, les phonèmes : /l/, /p/, /ʃ/, /o/... etc.). En français, 26 lettres doivent transcrire entre 30 et 36 phonèmes. Quelques lettres ou graphèmes peuvent se prononcer différemment selon les contextes, par exemple s, c, g mais le nombre en reste limité. De fait, malgré la diversité des formes graphémiques (130), celles-ci se lisent le plus souvent de la même manière (comme pour o /au / eau). En d'autres termes, en lecture, le français écrit est relativement régulier, et d'ailleurs, son apprentissage s'effectue plutôt rapidement et sans grande difficulté. Par contraste, la transcription (en production) se révèle beaucoup plus difficile. Les recherches scientifiques récentes sur l'acquisition de l'orthographe font état du rôle déterminant de la conscience phonémique, de la connaissance des correspondances entre phonèmes et graphèmes, du rôle de la lecture analytique, des capacités visuo-attentionnelles. Si des mécanismes d'auto-apprentissage et d'apprentissage statistique ont été mis à jour, le bénéfice d'un enseignement explicite de certaines connaissances (morphologiques, orthographiques, grapho-tactiques) et les feedbacks précis et immédiats sur les productions écrites des enfants n'est plus à démontrer. Enfin, très récemment, des relations étroites entre graphomotricité et compétences orthographiques ont été identifiées révélant la nécessité d'accompagner l'automatisation du geste grapho-moteur pour faciliter les acquisitions en orthographe (Simard-Dupuis, 2019). Face au défi de l'enseignement de l'orthographe, le projet P2IA Kaligo propose d'associer deux innovations :

Une IA d'analyse de la voix (*i.e.*, analyse de la lecture) qui permet de déterminer l'adéquation des paroles d'un élève (phonème, mot ou groupe de mots simples) avec la prononciation attendue. Elle permet de soutenir la lecture analytique en corrigeant immédiatement si nécessaire un décodage erroné.

Une IA d'analyse de formes manuscrites (analyse de l'orthographe manuscrite) qui permet de déterminer l'adéquation de tracés d'un élève (caractères, mot ou groupe de mots simples) à un modèle. Cette analyse permet d'identifier des omissions, des adjonctions ou des substitutions de lettres dans un mot (si le mot est illisible, l'application renvoie le message suivant : « je ne peux pas te relire »).

En réalisant l'expérimentation de la version 1 de l'application, nous avons supposé que les faibles lecteurs présenteraient au début de l'étude globalement plus de difficultés à orthographier les mots et à les écrire de façon plausible phonologiquement. Les analyses réalisées au pré-test qui comparent les faibles lecteurs et les lecteurs performants indiquent effectivement une différence importante (au regard de la taille des effets) entre ces deux groupes. Le taux plus élevé d'erreurs graphémiques indique que les faibles lecteurs ont de moins bonnes compétences orthographiques que les bons lecteurs lorsqu'il s'agit d'écrire des mots qui n'ont pas encore été enseignés. Par ailleurs, ces élèves ont aussi plus de difficultés à produire une orthographe plausible phonologiquement, ce qui peut se comprendre comme le résultat d'un moindre recours à une médiation phonologique (Bosse & Pacton, 2006).

Considérant l'importance des habiletés de lecture pour l'orthographe, nous avons, comme préconisé par Sullivan et al. (2008) examiné les bénéfices de 4 semaines d'utilisation de la version 1 de l'application en considérant que les niveaux en lecture des élèves pourraient différencier les effets des feedbacks. Des effets significatifs d'interaction ont été mis en évidence entre la condition et le niveau en lecture pour chaque variable dépendante considérée (à l'exception de la plausibilité sur les mots travaillés qui présente une tendance) avec des tailles d'effets faibles. Globalement, nos résultats indiquent que la plus-value d'un apprentissage de l'orthographe sur tablette est significative pour les faibles lecteurs et non pour les bons lecteurs. Comparés à de faibles lecteurs entraînés sur papier, les faibles lecteurs entraînés sur tablette ont augmenté leurs connaissances graphémiques sur les mots travaillés et sur des mots nouveaux. Ils tendent par ailleurs à mieux orthographier les mots plausibles phonologiquement qu'ils ont rencontré au cours de la séquence ou orthographient significativement mieux des mots nouveaux du point de vue de la plausibilité.

L'ensemble des résultats observés pour les faibles lecteurs et les bons lecteurs suggère que la première version de l'application Kaligo a soutenu le recours à la médiation phonologique pour orthographier des mots réguliers inconnus et a développé les connaissances des correspondances phonèmes-graphèmes pour les élèves qui ont travaillé sur tablette puisqu'un

transfert à des mots nouveaux est observé. Pour rappel, chaque séance commençait par une lecture d'un mot par l'enfant. L'enfant pouvait réécouter sa lecture et l'application lui renvoyait un feedback de correction si nécessaire sous la forme d'un découpage graphémique et d'une mise en saillance de la correspondance erronée. A ce stade de la séance, ce sont les correspondances entre graphèmes et phonèmes qui sont soulignées. Après une tâche de copie, des exercices de type quizz et des diapositives d'enseignement explicite, l'élève avait à écrire le mot en condition de dictée. A cette étape, c'est la correspondance phonèmes-graphèmes qui est requise. Lorsque l'orthographe proposée par l'enfant à l'essai 1 n'est pas adaptée, l'application envoie un feedback explicite indiquant la ou les lettres erronées et propose un second essai. Au cours du deuxième essai, si l'enfant produit une erreur, le feedback de correction propose un découpage du mot par graphème (chaque graphème est entouré et un message demande à l'enfant de bien lire le mot). Le troisième essai s'il n'est pas réussi, donne lieu à une correction. Nous pouvons supposer que l'association entre une IA sur la voix et une IA sur la production orthographique manuscrite a permis aux faibles lecteurs de renforcer leur capacité de lecture analytique ce qui se traduit par une plus grande aisance à orthographier des mots de façon plausible mais ce qui a eu aussi pour conséquence de diminuer le nombre d'erreurs graphémiques des mots travaillés comme des mots nouveaux. Le faible score d'erreurs graphémiques et le bon score de plausibilité phonologique des faibles lecteurs tablette observés pour des mots nouveaux permet de conclure à un transfert d'apprentissage. Malgré des tailles d'effet faibles et une variabilité inter-individuelle importante, ce résultat nous apparaît comme encourageant pour un dispositif qui n'a duré que 4 semaines. Ce résultat devra être confirmé sur un plus grand nombre d'élèves et sur une durée d'intervention plus longue. En contrôlant mieux la constitution des groupes expérimentaux et en proposant une tâche de lecture de pseudo-mots en pré-test, nous aurions pu évaluer les effets d'apprentissage entre prétest et post-test et identifier avec une plus grande certitude que les compétences en lecture analytique s'étaient améliorées. Rappelons aussi que cette version de l'application ne permettait pas encore la personnalisation de l'apprentissage, les recherches et les développements ultérieurs devront intégrer cette fonction. Enfin, il faut souligner que certaines limites de l'application ont été observées par les enseignants lors de l'expérimentation en contexte classe. Les enseignants ont noté que les diapositives d'instruction explicite pour apprendre à orthographier correctement un grand nombre de mots n'étaient pas réellement lues et traitées par les élèves qui profitaient de ces moments pour faire une pause. Un autre format, de type quizz, aurait permis que les élèves soient plus actifs pour s'approprier ces connaissances. Ces observations devront être intégrées aux versions futures.

7. Conclusion générale sur mes contributions à l'étude du geste d'écriture

En cherchant à mieux connaître les environnements d'apprentissage, les occasions d'action offertes aux élèves et les contraintes professionnelles des enseignants lorsqu'ils ont à enseigner l'écriture, j'ai pu d'une part adapter mes enseignements à destination des enseignants de formation initiale et continue, d'autre part identifier des questions de recherche qui se situent à l'interface des préoccupations des acteurs de l'éducation et des acteurs de la recherche. Ces études m'ont amené à investir des démarches interventionnelles ce qui m'a permis de questionner la pertinence de quelques pratiques professionnelles d'enseignement. Ces résultats questionnent la pertinence des temps d'enseignement alloués à l'enseignement du ductus de lettres capitales en maternelle, à préciser l'intérêt de faire tracer l'élève sans feedback visuel pour accompagner le développement des programmes moteurs, à démontrer que la motricité globale pouvait contribuer à l'élaboration de représentations pluri-modalitaires des lettres. Une bonne connaissance de l'environnement scolaire et des contraintes professionnelles des enseignants qui ont en charge l'enseignement de l'écriture m'a aussi permis de contribuer à la conception d'innovations technologiques et pédagogiques capables de soutenir l'apprentissage de la langue écrite dans sa dimension graphomotrice et orthographique. L'ensemble de ces résultats devrait contribuer à questionner la forme scolaire en France et tout au moins à revoir nos conceptions et nos pratiques quant à la place accordée aux actions motrices de l'enfant au service des savoirs fondamentaux. Cette volonté en tant qu'enseignant-chercheur de contribuer à la réduction des inégalités scolaires s'est aussi traduite par un intérêt porté à la numératie. De la même façon, je me suis interrogée sur le rôle que le système sensori-moteur pourrait jouer dans la construction du nombre et des premières habiletés arithmétiques.

8. La motricité manuelle au service du calcul : de l'usage spontané des doigts en calcul à son enseignement

Les mathématiques posent problème à beaucoup d'élèves, cela va de la simple difficulté et du désintérêt, à la véritable phobie. Une étude américaine (Ashcraft & Krause, 2007) évalue à 20% le nombre des élèves ayant des sentiments négatifs à l'égard des mathématiques. Pourtant les mathématiques (et la culture scientifique) jouent un rôle essentiel d'outil de sélection dans notre système scolaire. La direction de l'évaluation, de la prospective et de la performance observe que les performances en calcul se sont notamment très fortement dégradées entre 1987 et 1999 et cette détérioration est restée stable par la suite. Brissiaud attribue cet effondrement plus

spécifiquement à une circulaire du MEN sur l'école maternelle parue en 1986 qui modifie les programmes en insistant sur la mise en place dès la petite section de la comptine numérique « *Progressivement, l'enfant découvre et construit le nombre. Il apprend et récite la comptine numérique* » (Brissiaud, 2013 ; p. 14.). Il regrette, conséquence de cette modification des programmes, une modification des pratiques comme celle de s'appuyer sur la file numérique pour réaliser les premiers calculs. Asseoir la construction du nombre sur les représentations symboliques (chiffre et mot nombre) constitue pour Brissiaud une erreur fondamentale qui fait des élèves de maternelle des élèves « mal débutés ». Il est aujourd'hui admis que la construction du nombre ne commence pas avec la comptine numérique car il existe chez l'enfant des capacités de quantification avant le langage et une capacité à se représenter le nombre sous un format analogique. Bien avant le langage, le nourrisson peut comparer des collections comme par exemple, un nombre de syllabes entendues avec un nombre d'objets présentés visuellement (Izard, Sann, Spelke & Streri, 2009). Il peut aussi traiter de façon précise de petites quantités (entre 1 et 3), des quantités qui correspondraient à la limite des capacités de traitement en mémoire de travail visuelle (Piazza, Fumarola, Chinello & Melcher, 2011). Ce mécanisme de subitization pourrait jouer un rôle important pour associer des quantités aux premiers mots nombres. Avec l'arrivée du langage, un troisième processus de quantification à la fois précis et capable de traiter de grande quantité se met en place, il s'agit du dénombrement. La quantification est rendue possible par la capacité à mettre en correspondance terme à terme les éléments d'une collection avec les éléments de la chaîne numérique verbale ou avec des représentations symboliques que sont les configurations de doigts (Brissiaud, 2013).

En neuropsychologie, le modèle du triple code de Dehaene et al. (2003) postule l'existence de trois systèmes de codage du nombre, une représentation symbolique verbale située dans la zone de Broca (les mots-nombres), une représentation symbolique indo-arabe (les chiffres) située dans la zone occipito-temporale et une représentation analogique située dans la région pariétale (sous forme d'images d'objets discrets, les quantités représentées étant rangées sur une ligne numérique mentale). Le défi auquel les enfants (et les chercheurs) sont confrontés, est celui de la transition d'un système de codage analogique du nombre à un système de codage symbolique. Cette transition, aussi appelée « Mapping » est essentielle au développement de l'enfant et à l'entrée dans les premiers apprentissages mathématiques mais les processus en jeu sont encore mal compris (Spaepen, Gunderson, Gibson, Goldin-Meadow & Levine, 2018). Les conclusions des études interventionnelles s'accordent généralement sur le fait que les activités menées en classe devraient renforcer les liens entre les représentations analogiques et symboliques (Fayol, 2018 ; Gimbert & Mazens, 2021). Une approche incarnée de la cognition numérique suppose

que le système sensori-moteur participe d'une façon ou d'une autre à la construction du nombre. C'est dans cette perspective que j'ai mené ces dernières années des recherches sur le rôle des doigts dans la construction du nombre.

8.1. Construire le nombre et calculer avec les doigts

Qu'il s'agisse de construire le nombre ou d'entrer dans les premiers calculs, le recours aux doigts est aujourd'hui reconnu comme déterminant dans la construction des premières habiletés mathématiques chez l'enfant (Guedin, Thevenot, & Fayol, 2018 ; Seron & Crollen, 2018). Si l'origine phylogénétique ou ontogénétique de cette relation fait débat (cf. Seron & Crollen, 2018 sur cette question fondamentale), le rôle de l'apprentissage lui-même est assez peu considéré, les recherches interventionnelles en psychologie de l'éducation restant rares sur ces questions. Moeller, Martignon, Wessolowski, Engel et Nuerk (2011) regrettent d'ailleurs une absence de dialogue entre mathématiciens et chercheurs en neurosciences sur ce sujet, les premiers considérant que l'usage des doigts est avant tout une pratique dont il faut se débarrasser (Krauthausen & Scherer, 2001), les seconds considérant parfois au contraire, dans une perspective incarnée, que le recours aux doigts est au fondement du nombre (Butterworth, 1999). Moeller et al. (2011) formulent le vœu d'un meilleur dialogue entre les disciplines afin que des dispositifs d'enseignement prometteurs soient conçus à partir d'approches pluridisciplinaires. C'est dans cette perspective que j'ai souhaité inscrire les recherches que j'ai menées dans le champ de la numératie. Les collaborations développées avec une formatrice en mathématiques, avec des conseillères pédagogiques et des maîtres formatrices et avec des enseignants spécialisés, le suivi de thèse d'une étudiante qui venait elle-même du monde de l'enseignement m'ont amené à élaborer des questions de recherche qui articulent des questions de psychologie de l'éducation, de psychologie du développement et des questions de praticiens. Doit-on laisser les élèves utiliser les doigts pour calculer ? Pourquoi certains enfants n'utilisent-ils pas les doigts spontanément ? Si les élèves présentent un trouble du développement intellectuel, le recours aux doigts est-il le même ? Si le recours spontané aux doigts est un comportement fréquent, le lien qui unit ce comportement aux habiletés numériques et de calcul ultérieurs reste à préciser et surtout, on observe que le recours aux doigts ne fait pas l'objet d'un enseignement explicite. Les recherches qui vont être décrites dans cette section visent donc d'une part à questionner les mécanismes fondamentaux qui sont associés à ce comportement et d'autre part à apporter un éclairage aux praticiens de l'éducation qui cherchent, à l'heure de l'école inclusive, à faire progresser tous les élèves.

A l'école maternelle, la motricité manuelle des enfants est quotidiennement sollicitée (Caramia, Gill, Ohl, & Schelly, 2020). En mathématiques, elle peut être particulièrement sollicitée lorsqu'il s'agit de raisonner sur des quantités ou sur des nombres (Pitchford et al., 2016). Les mains peuvent alors être utilisées lors d'activités de dénombrement, d'énumération, de manipulation d'objets de collection à quantifier, de comptage ou de calcul. Les enfants peuvent aussi représenter des nombres avec leurs doigts grâce à des configurations canoniques ou non canoniques. Elles peuvent également permettre d'estimer des quantités continues à partir de l'écartement du pouce et de l'index (Seron & Crollen, 2018). Ces sollicitations diverses en situation d'apprentissage impliquent que la motricité manuelle de l'enfant soit relativement fonctionnelle c'est-à-dire que ses actions motrices soient suffisamment rapides, précises et coordonnées pour répondre aux exigences de la tâche et au rythme imposé par le collectif de la classe. La diversité des rythmes de développement moteur au sein d'une classe maternelle (Blondis, Snow, Roizen, Opacich, & Accardo, 1994) peut cependant laisser supposer que tous les enfants ne sont pas en mesure d'utiliser leurs mains de la même façon au cours d'une tâche.

8.2. La relation entre les représentations mentales des mains, le recours aux doigts et la réussite en calcul (étude 9)

La relation entre les mains et les nombres a d'abord été appréhendée en considérant les représentations mentales des mains mesurées par les gnosies digitales. La gnosie digitale renvoie à des capacités de discriminations digitales qui elles-mêmes traduiraient la représentation mentale de la main et des doigts. Elle se mesure le plus souvent à travers la capacité à positionner ou identifier un stimulus tactile en l'absence de feedback visuel (*e.g.*, forme graphique dessinée sur la main à reconnaître, doigt touché à identifier). La proximité anatomique entre les zones abritant les représentations des mains et celles des nombres est aujourd'hui attestée (Gertsman, 1940; Dehaene, Piazza, Pinel, & Cohen, 2003) et alimente l'hypothèse d'une relation fonctionnelle entre les représentations mentales des doigts et les compétences numériques. Cette hypothèse a également été soutenue par des études comportementales. Dans une étude longitudinale menée par Marinthe, Fayol et Barrouillet (1999), les capacités perceptivo-tactiles (mesurées par des tâches de graphesthésie et des tâches de discrimination tactile des doigts) de 300 enfants de 5 à 6 ans ayant un développement ordinaire prédisent mieux leurs performances à une tâche de calcul que leur niveau de développement intellectuel. Trois ans plus tard, la même équipe de chercheurs montre que cette relation se maintient dans le temps pour les mêmes enfants. De la même façon, Noël (2005)

montre qu'entre 6 et 7 ans, les scores de gnosie digitale (*i.e.*, capacité de discrimination des doigts) sont significativement liés aux compétences numériques et non à celles de lecture. Afin de tester l'effet des gnosies digitales sur les compétences numériques, Gracia-Bafalluy et Noël (2008) proposent un entraînement des gnosies comprenant de la motricité manuelle à la moitié des élèves de première année du primaire dont les niveaux de gnosie digitale sont les plus faibles (N=16), à partir de tests effectués sur 122 enfants. Après 8 semaines d'entraînement aux gnosies digitales, le groupe expérimental obtient de meilleures performances aux tests de gnosie et à certains tests mathématiques que le groupe n'ayant pas reçu l'entraînement. Les temps de réaction à la tâche « Combien de doigts levés » ont significativement diminué et les tâches de subitizing (*i.e.*, la capacité à identifier rapidement des quantités inférieures ou égales à 4) et de jugement d'ordinalité, qui n'ont cependant pas été entraînées, sont mieux réussies par les enfants du groupe expérimental. De plus, les auteurs notent également un bénéfice de cet entraînement sur la représentation mentale des doigts et de la main évaluée par un dessin d'une main réalisé par l'enfant, alors que le dessin du bonhomme réalisé avant et après l'entraînement n'a pas évolué de manière significative. Pour le dessin du bonhomme, les différentes étapes sont bien connues (Baldy, 2005), en revanche il n'existe pas à notre connaissance d'études analysant de façon systématique les caractéristiques du dessin de la main chez des enfants d'âge pré-scolaire. Contrairement au dessin du bonhomme qui peut probablement être réalisé à partir d'une procédure algorithmique plutôt qu'à partir d'une représentation interne du corps (Picard & Baldy, 2011), le dessin de la main n'est pas une tâche communément demandée au jeune enfant. Sa représentation graphique devrait de ce fait mieux refléter la représentation interne de la main. Considérant que le dessin de la main (au même titre que le dessin du bonhomme renvoie au schéma corporel) pourrait être un moyen de préciser qualitativement sa représentation, nous avons cherché avec Héliane Hili, formatrice en mathématiques et Yvonnick Noël chercheur en Psychologie et Statistiques, à caractériser les dessins de mains réalisés par des enfants de 4 ans à 5 ans 6 mois (Bonneton-Botté, Hili & Noël, 2015). Dans le cadre de cette étude, nous avons considéré, à l'instar de Gracia-Bafally et Noël (2008), la qualité globale de la production graphique c'est-à-dire ici la capacité de l'enfant à représenter fidèlement les différentes parties constitutives de la main (la paume et les cinq doigts). Cependant, étudier la capacité de l'enfant à produire un dessin réaliste ne nous semblait pas suffisant. Pour Vinter et Marot (2003), les stratégies graphiques révèlent la nature des représentations mentales et plus particulièrement la taille des unités cognitives. De ce fait, il nous a semblé pertinent d'étudier la planification de l'acte graphique au travers de la capacité de l'enfant à produire un dessin par un tracé continu ou au contraire en le réalisant segment par segment. Vinter, Picard et Fernandes (2008) ont pu

montrer que cette capacité à organiser la séquence de mouvements de l'acte graphique en se référant à un modèle interne global apparaissait entre 5 et 6 ans lorsqu'il s'agit de copier des formes géométriques. Entre 4 et 5 ans, la tendance de l'enfant, confronté à une situation de copie de formes simples, serait de planifier localement son tracé (segment par segment).

Soixante-deux enfants (31 garçons et 31 filles âgés de 4 ans à 5 ans 6 mois, Moy= 4 ans 9mois) ont eu comme consigne de dessiner une main sur une feuille blanche (sans modèle) et de réaliser une tâche analogique de correspondance terme à terme (*i.e.*, composer une collection de jetons équivalente à une collection présentée) et une tâche plus conceptuelle de non pertinence de l'ordre (*i.e.*, Porter un jugement sur un dénombrement réalisé par une poupée). Les scores numériques étaient notés en échec ou réussite. Pour les dessins, deux mesures ont été considérées, la première était un score figuratif calculé sur 13 critères repris de Gracia-Bafalluy et Noël (2008), la seconde était une catégorisation des stratégies graphiques fondée sur 2 critères qui nous semblaient essentiel pour la représentation de la main dans sa relation aux habiletés numériques : le bon nombre de doigts et la planification du dessin. Nous avons fait le choix d'étudier la planification de l'acte graphique au travers de la capacité de l'enfant à produire un dessin par un tracé continu ou au contraire en le réalisant segment par segment. Les dessins des enfants ont donc été catégorisés en 4 classes : 1/ des dessins non planifiés et sans le bon nombre de doigts 2/ des dessins non planifiés avec le bon nombre de doigts 3/ des dessins planifiés sans le bon nombre de doigts et 4/ des dessins planifiés avec le bon nombre de doigts.

Les résultats ont établi que les enfants qui réalisent un dessin de la main complet (*i.e.*, constitué de 5 doigts et d'une paume) et planifié (*i.e.* dessiné d'un trait) sont ceux qui réussissent le mieux une épreuve de correspondance terme à terme (*i.e.*, être capable de composer une collection identique à une collection témoin). Dans les études antérieures, les relations entre gnose et performance en mathématiques sont généralement étudiées à partir de corrélations qui ne permettent pas d'établir le sens de la relation. Dans cette étude, les dessins et la tâche de correspondance ont été étudiés à partir d'une analyse implicite. Grâce à cette approche, il devient possible d'établir, avec un seuil à la limite de la significativité, que la nature de la stratégie graphique (et non le score figuratif au dessin) implique la réussite à la tâche numérique de correspondance terme à terme ($z=-1,62$; $p=.052$) et non l'inverse. Cette relation implicite n'est pas mise en évidence pour la tâche plus conceptuelle de pertinence de l'ordre ce qui renforce l'idée selon laquelle les représentations digitales sont liées aux représentations analogiques du nombre (Marinthe et al., 2001). Ces mêmes auteurs, en 2001, se demandaient en quoi les représentations digitales pouvaient être déficitaires : « *s'agit-il de représentations*

erronées ? De représentations floues ? » (P. 254). Par l'analyse du dessin de la main, notre étude nous semble apporter des éléments de réponse : Un bon nombre de doigts et la capacité à se représenter globalement une main pour planifier son dessin impliquent de réussir à une tâche de correspondance terme à terme, reconnue pour être prédictive de la construction de la cardinalité.

Le travail de thèse de Fanny Ollivier, en co-direction avec Yvonnick Noël, a permis d'asseoir les résultats de cette première étude. La démarche de Fanny Ollivier a consisté à construire un modèle statistique implicatif des relations entre représentation de la main, habileté manuelle, mémoire de travail et performance en calcul chez des élèves avec ou sans trouble du développement intellectuel (n=145). Ses conclusions établissent une relation d'implication probabiliste entre l'échec au dessin de la main et l'échec aux items de calcul et à la capacité de justifier son calcul. Cette relation est démontrée pour les enfants au développement typique (de 4 ans 10 mois à 6 ans 10 mois) comme pour les enfants avec un retard de développement intellectuel léger à modéré et scolarisés en ULIS collège (13 ans et 8 mois en moyenne). De façon intéressante, elle montre aussi que le dessin de la main est finalement plus prédictif des performances en calcul que le recours spontané aux doigts ce qui pourrait se comprendre à la lumière de la théorie incarnée de la cognition comme l'expression d'une représentation incarnée des 10 premiers nombres.

La relation entre gnosie et compétences mathématiques pourrait varier en fonction de l'âge. Reeve et Humberstone (2011) ont montré à partir d'une analyse de régression, une relation significative entre les gnosies des doigts et les capacités de résolution de problèmes d'addition à un chiffre, mais ils notent aussi des différences individuelles significatives au même âge. Ainsi la relation positive entre les gnosies digitales et les performances numériques pourrait ne pas être systématique ou pourrait ne pas perdurer au cours du développement. En effet, certaines études ne trouvent pas de relation significative entre les gnosies digitales (mesurées par des tâches de discrimination tactile) et les habiletés arithmétiques (Long et al., 2016, âge moyen des enfants = 7.1 ans) ou observent une relation faible une fois les prédicteurs d'âge et de capacités cognitives et numériques contrôlés (Wasner, Nuerk, Martignon, Roesch, & Moeller et al. 2016, âge moyen= 6.5 ans). Considérant l'importance du recours spontané aux doigts au cours des premières années d'école maternelle, nous avons cherché à savoir s'il était possible de stimuler cette procédure chez l'enfant.

8.3. Stimuler le recours aux doigts pour soutenir les habiletés numériques et les habiletés de calcul (étude 10).

Une autre façon d'investiguer le rôle des doigts dans l'installation des habiletés numériques (*e.g.*, construction du nombre) et arithmétiques (*e.g.*, calcul) consiste à étudier le bénéfice de leur usage en situation mathématique lors de tâches mesurant soit la construction du nombre (*e.g.*, tâche de dénombrement, de décomposition de nombre, de cardinalité, de correspondance terme à terme) soit les capacités de calcul (*e.g.*, problèmes verbaux ou problèmes arithmétiques). Les enfants d'âge préscolaire et scolaire ainsi que les adultes utilisent spontanément et fréquemment leurs doigts pour soutenir leurs activités numériques et arithmétiques (Butterworth, 1999, 2005 ; Fuson, 1998 ; Geary, 2004, 2007 ; Gallistel & Gelman, 1992 ; Lucidi & Thevenot, 2014 ; Newman, 2016 ; Sato & Lalain, 2008) même si les procédures utilisées diffèrent d'une culture à l'autre (Bender & Beller, 2012). L'utilisation des doigts permettrait au jeune enfant de représenter les quantités de façon analogique avant que les représentations symboliques ne soient disponibles et permettent d'effectuer des calculs sur ces représentations (Siegler & Shrager, 1984). Dans une approche cognitive incarnée, le traitement numérique se fonderait sur des systèmes sensorimoteurs développés et enrichis par l'utilisation des doigts (Lakoff & Nuñez, 2000). L'approche incarnée se double d'une approche située (Versace et al., 2018), de nombreux chercheurs considérant que l'usage des doigts occupe une fonction d'aide à la conceptualisation du nombre et des calculs dans de nombreuses cultures. Di Luca et Pesenti (2011) soulignent par exemple que l'utilisation d'une séquence ordonnée et stable de mouvements pendant le comptage permet à l'enfant de mémoriser les éléments déjà comptés en s'appuyant sur la correspondance directe entre les doigts levés et les objets comptés. Ils supposent que les propriétés cardinales et ordinales saillantes dans l'utilisation des doigts facilitent la compréhension et le développement du concept de nombre. Certaines preuves empiriques alimentent cette hypothèse fonctionnelle. Les enfants qui utilisent le plus souvent les doigts pour calculer dans les classes préscolaires sont ceux qui effectuent le mieux les tâches arithmétiques (Jordan, Kaplan, Ramineni, & Locuniak, 2008). Cependant, l'utilisation des doigts ne semble toutefois pas identique chez tous les enfants. Jordan et al. (2008) ont étudié les trajectoires développementales du recours aux doigts au cours de tâches numériques de la maternelle à la fin de la deuxième année d'école élémentaire chez des enfants issus de milieux socio-économiques faibles ou moyens. Les résultats montrent que les enfants de maternelle les moins performants sur le plan numérique, qui sont également issus de milieux à faibles revenus, n'utilisent presque jamais leurs doigts spontanément contrairement aux enfants issus de milieux

à revenus moyens. En outre, les enfants issus de milieux à faibles revenus montrent un recours croissant aux doigts au cours de la période étudiée, tandis que cette stratégie diminue progressivement chez les enfants issus de milieux à revenus moyens à partir de la deuxième année. Pour les auteurs, la trajectoire des enfants de milieux à revenus moyens (qui pour rappel utilisent leurs doigts moins souvent en première année qu'en maternelle) suggère qu'ils ont eu plus rapidement recours à un calcul mental précis ou à une récupération de faits arithmétiques. Plus récemment, Dupont-Boime et Thevenot (2018) sont arrivées aux mêmes conclusions que Jordan et al. (2008) et ont montré que les enfants suisses romands âgés de 5 à 6 ans qui comptent sur leurs doigts réussissent mieux une tâche d'addition que les enfants qui ne le font pas. De plus, elles montrent que les enfants qui calculent en utilisant leurs doigts correspondent à ceux qui ont les meilleures capacités de mémoire de travail, suggérant qu'en plus des facteurs évoqués par Jordan et al. (2008) (*i.e.*, la culture et l'environnement familial), certaines fonctions cognitives pourraient moduler le recours aux doigts. Dans sa thèse, Fanny Ollivier corrobore ces observations en montrant qu'il existe une relation d'implication entre le fait d'utiliser spontanément ses doigts en calcul et le fait d'être en réussite en calcul, elle établit ses conclusions pour les élèves au développement typique comme pour les élèves avec un trouble du développement intellectuel (Ollivier, Bonneton-Botté & Noël, soumis).

En résumé, les études précédemment décrites cherchent soit à établir une relation entre la représentation mentale de la main (*i.e.*, gnosie digitale ou dessin de la main) et les habiletés numériques et arithmétiques soit à décrire la relation entre l'usage des doigts et les performances en mathématiques. Si l'ensemble des résultats ne plaide pas en faveur d'une cognition numérique exclusivement incarnée, le rôle fonctionnel des doigts au cours du développement des habiletés numériques et arithmétiques est actuellement assez consensuel. Dans cette perspective, il devient nécessaire d'étudier la fréquence et l'efficacité du recours aux doigts chez les jeunes enfants et d'analyser les facteurs qui contribuent à cette efficacité. S'il existe des différences inter-individuelles dans le recours spontané aux doigts (Jordan et al., 2008 ; Reeve & Humberstone, 2011), la motricité manuelle peut-elle être un facteur explicatif de ces différences ?

La motricité fine, un facteur décisif et un enjeu d'apprentissage ?

La motricité fine correspond à des « petits mouvements musculaires nécessitant une coordination étroite œil-main » (Luo, Jose, Huntsinger, & Pigott, 2007, p. 596). Asakawa et Sugimura (2014) ont établi que la dextérité manuelle est significativement corrélée aux capacités de calcul additif (mais pas au vocabulaire), alors que la répétition rythmique d'un

mouvement (*i.e.* tapping) ne l'est pas. De la même façon, Pitchford et al. (2016) ont observé qu'au cours des deux premières années d'école primaire, la motricité fine prédit mieux les habiletés mathématiques que les habiletés de lecture. Suggate, Stoager et Fischer (2017) précisent cette relation en montrant que la motricité fine et les habiletés mathématiques sont liées par les habiletés numériques basées sur les doigts (*i.e.*, toute tâche nécessitant l'usage de ses doigts ou la reconnaissance d'une quantité représentée par des doigts). En 2020, les mêmes auteurs confirment que les relations entre les performances en dextérité (et non celle de graphomotricité) et les performances numériques sont médiées par les représentations numériques basées sur les doigts (Fischer, Suggate, & Stoeger, 2020). Quelques études indiquent qu'un entraînement de la motricité fine pourrait améliorer les performances en calcul. Dans l'étude de Gracia-Bafalluy et Noël (2005) précédemment mentionnée, l'entraînement aux gnosies digitales qui impliquait aussi des exercices de motricité manuelle, s'est traduit par des meilleures performances à certaines habiletés numériques. Pour rappel, les hypothèses explicatives qui lient la motricité manuelle sont multiples (cf. paragraphe 1.4) mais l'hypothèse d'une cognition numérique incarnée et située nous semble la plus séduisante en ce qu'elle permet de considérer le rôle de l'environnement et des interactions sociales dans le développement des compétences de l'enfant.

Asakawa, Murakami et Sugimura (2017) ont entraîné 80 élèves de première année soit à des tâches de motricité fine (enfiler des perles, opposition de chaque doigt, muscler les doigts par des mouvements de pression) durant 10 minutes quotidiennes soit à une tâche contrôle de lecture. L'entraînement en motricité fine s'est traduit par une amélioration des compétences arithmétiques et par une augmentation du score à une tâche de motricité fine mais ne s'est pas accompagné d'une amélioration de la gnosie des doigts ; ainsi dans cette étude les auteurs considèrent que la gnosie des doigts (mesurée ici par une tâche de discrimination des doigts) ne peut pas être à l'origine de l'amélioration des performances arithmétiques. S'appuyant sur la littérature existante, les auteurs évoquent trois hypothèses non exclusives pour expliquer leurs résultats : premièrement, ce pourrait être lié au fait que les zones cérébrales qui gouvernent les habiletés arithmétiques et de motricité manuelle sont communes (Barsalou, 2008 ; Penner-Wilger & Anderson, 2013). Deuxièmement, un renforcement de la motricité manuelle pourrait se traduire par une augmentation de la connaissance incarnée du nombre (Suggate et al., 2017). Troisièmement, ils évoquent la médiation potentielle des fonctions exécutives qui jouent un rôle à la fois dans les habiletés arithmétiques et motrices et dont l'efficacité pourrait avoir été augmentée par un entraînement de la motricité fine (Diamond, 2000).

Ces résultats suggèrent aussi qu'une motricité manuelle insuffisamment développée pourrait constituer une charge cognitive problématique en situation d'apprentissage mathématiques qu'il soit formel ou informel (Bara & Tricot, 2017). Fischer et al. (2020), en cohérence avec l'hypothèse « main agile, esprit agile » de Suggate et Stoager (2017) recommandent de soutenir le développement de la motricité fine et d'encourager le recours aux doigts chez les jeunes enfants afin notamment de développer les habiletés numériques et arithmétiques.

En situation de résolution problème, les enfants doivent être capables de lever et d'abaisser facilement leurs doigts sans utiliser leur deuxième main. Ils doivent également être capables d'imiter un modèle proposé par un pair ou par l'enseignant. Si certaines activités sont dédiées à la motricité fine à l'école maternelle dans le cadre de la préparation à l'écriture, les programmes scolaires français ne recommandent pas un entraînement manuel moteur préparant explicitement les compétences numériques. La lecture des instructions officielles françaises en vigueur au siècle dernier montre que l'usage du doigt a été longtemps proscrit ou réduit à sa fonction d'outil de représentation des nombres (Brissiaud, 2013). L'enseignement explicite de l'utilisation du doigt en mathématiques n'apparaît pas non plus dans les programmes actuels. A partir de 2015, les programmes du cycle 1 évoquent rapidement et entre parenthèses la possibilité de recourir aux doigts sans plus de précision : les doigts sont cités comme un moyen d'aider l'enfant à établir les relations entre les formats analogiques et symboliques au même titre que la manipulation de cubes. La démarche d'enseignement explicite a prouvé son efficacité dans le champ des mathématiques (Doabler et al., 2015), de l'écriture (Fayol, Grimaud, & Jacquier, 2013) et de la lecture (Graham et Santangelo, 2014).

Dans le cadre d'une recherche menée par une étudiante également conseillère pédagogique inscrite en master 2 (Ollivier, Noël, Legrand et Bonneton-Botté, 2019), nous avons cherché à évaluer l'impact d'un programme d'enseignement explicite en dernière année de maternelle qui combine à la fois un entraînement de la motricité fine (Gracia-Bafalluy & Noël, 2008 ; Suggate, et al., 2017) et des connaissances explicites sur l'utilisation des doigts pour composer les nombres comme le recommandent certains chercheurs (Jordan & Levine, 2009 ; Lafay et al., 2013). Dans un premier temps, nous souhaitons répliquer pour les élèves français les résultats obtenus par Jordan et al. (2008) et par Jordan et Levine (2009). Nous supposons que les élèves qui utilisent spontanément leurs doigts lors des tâches de résolution de problèmes proposées en début d'étude pour mesurer les compétences initiales des enfants seraient également ceux qui ont les meilleures performances en résolution de problèmes. Deuxièmement, conformément à certaines recommandations, (Lafay et al., 2013 ; Reeve & Humberstone, 2011 ; Wasner et al.,

2016), nous faisons l'hypothèse qu'un programme d'entraînement visant à développer la motricité fine et les connaissances explicites de l'utilisation des doigts pour représenter et décomposer les nombres ferait progresser les élèves en résolution de problèmes. Comme le suggèrent Lafay et al. (2013) : " *il pourrait être fructueux d'encourager plus explicitement les enfants à utiliser leurs doigts et à établir le lien entre les doigts et les numérations* " (Lafay et al., 2013 ; p. 6). 36 élèves scolarisés dans deux classes de 2 écoles de centre-ville de villes moyennes ont été inclus dans cette étude (16 filles et 20 garçons ; moyenne d'âge 5 ans et 5 mois). Les classes ont été sélectionnées sur la base de la proximité des pratiques d'enseignement des mathématiques des enseignantes. La classe composant le groupe contrôle a suivi son programme habituel (*i.e.*, les nombres et décomposition de nombres étaient représentés par des images et/ou des objets) tandis que la classe expérimentale a suivi un programme spécifique alliant entraînement de la motricité fine (*i.e.*, composé d'ateliers de type gymnastique des doigts, activité de déliement des doigts et explorations tactiles de collections) et enseignement explicite du recours aux doigts pour représenter les nombres et les décomposer à l'aide des doigts (*i.e.*, jeu des annonces ; Sensevy, 2015). Précisons qu'au cours du dispositif les élèves n'ont jamais été entraîné à des tâches arithmétiques. Le design de l'étude est quasi-expérimental, un pré-test a été suivi d'un dispositif d'enseignement en classe pendant 10 semaines suivi (à distance de 15 jours) d'un post-test.

Les pré et post-test sont composés de 10 problèmes (5 avec énoncé verbal ; 5 avec énoncé arithmétique) extraits du TEDI-MATH, un test standardisé en France et en Belgique (Grégoire, Noël, & Van Nieuwenhoven, 2004).

Conformément aux observations de Jordan et al. (2018), la comparaison au pré-test des enfants qui utilisent spontanément les doigts ($n=12$) à ceux qui ne les utilisent pas ($n=24$) révèle une meilleure performance dans la tâche arithmétique pour les utilisateurs de doigts ($n=36$, $t(34)=5.378$, $p=.001$).

Les données des pré et post-tests étant constituées de mesures répétées, des modèles à effets mixtes, traitant le facteur sujet comme aléatoire, ont été utilisés tout au long des analyses, en utilisant les packages R lme4 (Bates et al., 2015) et R2STATS (Noël, 2012), dans une approche de comparaison de modèles.

1. Un modèle nul (M_0) d'absence totale d'effet. Ce modèle a été utilisé comme point de référence pour toutes les comparaisons,

2. Un modèle (M1) supposant une différence post-test entre les deux groupes, mais contraignant les moyennes des pré-tests à l'égalité (hypothèse de l'équivalence entre les deux groupes avant la session), mais aussi les moyennes pré et post-tests des sujets témoins (aucun changement attendu au sein du groupe contrôle),
3. Un modèle (M2) analogue au précédent, mais relâchant la contrainte d'absence de changement au sein du groupe contrôle.
4. Un modèle (M3) supposant tous les effets (c'est-à-dire, relâchant la dernière contrainte d'égalité des moyennes pré-test).

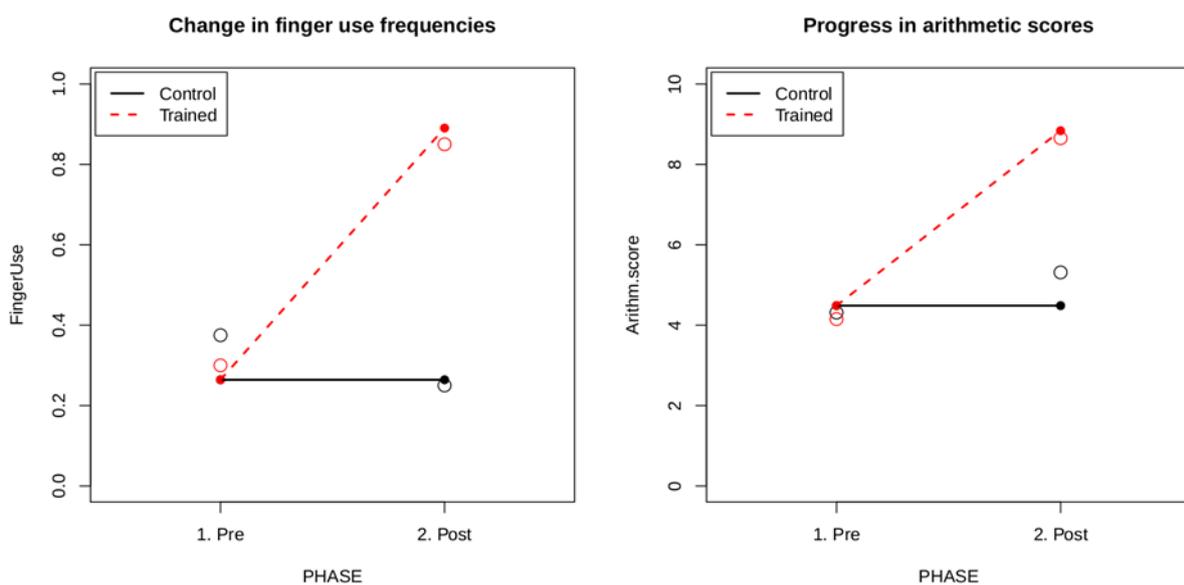


Figure 12 (extrait de Ollivier et al., 2019) : Évolution du recours aux doigts (à gauche) et des performances en résolution problème (à droite) pour le groupe contrôle (en noir) et le groupe expérimental (en rouge).

Sur la base de la statistique BIC, le modèle le plus contraint est à privilégier ici, sur les deux variables dépendantes (cf. figure12). Le modèle énonçant qu'il n'y a pas de changement au sein du groupe contrôle, et une augmentation conjointe de la performance et de l'utilisation des doigts au sein du groupe entraîné, est retenu comme le meilleur modèle. Étant donné que la seule différence entre les deux groupes est un dispositif spécifique encourageant l'utilisation des doigts, cette analyse apporte une certaine preuve que l'utilisation des doigts conduit à de meilleurs résultats en matière de compétence arithmétique.

L'objectif de cette étude était d'évaluer l'efficacité d'un dispositif de 10 semaines en dernière année de maternelle qui combine l'entraînement de la motricité fine à un enseignement explicite du recours aux doigts pour représenter et explorer les représentations numériques (Gracia-Bafalluy & Noël, 2008 ; Jordan & Levine, 2009 ; Lafay et al., 2013). La mise en œuvre de ce dispositif dans un cadre scolaire ordinaire était intentionnelle et pensée pour renforcer les liens entre la recherche et les pratiques d'enseignement innovantes. Il est rare que les enseignants mettent directement en œuvre des recherches interventionnelles, même si deux méta-analyses (Ehri et al., 2001 ; Piasta & Wagner, 2010) ont montré, dans le domaine de la littératie, que les enseignants sont aussi efficaces que les chercheurs. En outre, lorsque les chercheurs prennent en charge eux-mêmes un dispositif, leur participation se limite généralement à la durée de la recherche, alors que lorsque les enseignants expérimentent des interventions innovantes, ils sont plus susceptibles d'intérioriser les objectifs éducatifs de la recherche et de continuer à utiliser le dispositif au profit de futurs élèves. Enfin, en ce qui concerne le domaine de la numératie, il a été constaté que les interventions sont en général plus efficaces lorsqu'elles sont alignées avec ce qui se passe en classe tout au long de la semaine (Fuchs et al., 2008).

Comme nous le supposons dans notre première hypothèse, les élèves français qui utilisent spontanément leurs doigts lors des tâches de résolution de problèmes proposées au début de l'étude pour mesurer les compétences initiales des enfants sont aussi ceux qui ont les meilleures performances en résolution de problèmes. Ce résultat confirme ceux obtenus aux Etats-Unis (Jordan et al., 2008 ; Jordan & Levine, 2009). Des études ont précédemment établi une relation entre la gnose digitale et les performances en arithmétique (Marinthe et al., 2001, Reeve & Humberstone, 2011) et entre la gnose digitale et les compétences en dénombrement (Gracia-Bafalluy & Noël, 2008, Lafay et al., 2013). Bien que la gnose digitale soit un prédicteur fiable de certaines performances numériques, elle ne peut être utilisée par les enseignants en situation d'observation, d'évaluation ou de remédiation. Il semble donc nécessaire et pertinent d'étudier la valeur prédictive d'un indicateur comportemental (à savoir l'utilisation du doigt lors d'une tâche de résolution de problème). Reeve et Humberstone (2011) montrent une relation significative entre la gnose digitale et les capacités de résolution de problèmes d'addition à un chiffre mais relèvent que cette relation est caractérisée par des différences inter-individuelles significatives au même âge. Dans notre étude, lors du pré-test et avant le dispositif, seulement un tiers des sujets utilisent leurs doigts pour résoudre les problèmes. Ces différences individuelles pourraient s'expliquer par la quantité d'expériences dont ont bénéficié les enfants dans le contexte scolaire et familial (Bender & Beller, 2011, 2012 ; Jordan & Levine, 2009). La

composante motrice fonctionnelle de l'utilisation des doigts mentionnée comme déterminante par certains chercheurs pourrait également expliquer ces différences entre enfants si l'on considère la diversité du développement moteur (Asakawa & Sugimura, 2014 ; Butterworth 1999, 2005 ; Penner-Wilger, n.d, Suggate et al., 2017).

Dans une deuxième hypothèse, nous avons supposé qu'un dispositif alliant motricité fine et enseignement explicite du recours aux doigts pour construire des représentations numériques aiderait les élèves à utiliser spontanément leurs doigts et à réaliser des performances optimales dans des problèmes nécessitant des calculs (sans pour autant que les calculs n'aient été entraînés). Le dispositif a permis à la fois d'améliorer les performances des élèves en calcul et d'augmenter le recours spontané aux doigts lors du post-test par rapport à un groupe de contrôle. A notre connaissance, aucun programme d'enseignement de ce type n'avait été expérimenté auparavant, en particulier dans un contexte écologique d'école maternelle. Les résultats obtenus par Gracia-Bafually et Noël (2008) après un entraînement manuel moteur sont proches mais l'impact a été mesuré sur le dénombrement et cette étude présente quelques faiblesses statistiques (Fischer, 2010). Nos résultats questionnent également la différence entre les mouvements corporels et la manipulation d'objets pour soutenir les compétences arithmétiques. Dans une méta-analyse consacrée à l'efficacité de l'enseignement avec du matériel de manipulation concret, Carbonneau, Marley & Selig (2013) rapportent que les enfants de moins de 7 ans ont trouvé peu d'avantages à utiliser du matériel de manipulation. Les auteurs expliquent que, du point de vue du développement, "*les jeunes enfants peuvent avoir du mal à comprendre qu'un objet peut représenter un élément tout en représentant simultanément un concept mathématique plus large*" (Carbonneau et al., 2013 ; p.394). Les doigts ne sont pas des objets comme les autres, d'une part, parce que leur mobilisation contribue à une cognition incarnée des nombres même à l'âge adulte (Andres, Michaux & Pesenti, 2012) et, d'autre part, parce que l'appariement fréquent des doigts avec une grande variété d'objets quotidiens de l'enfant facilite l'abstraction de la notion de nombre, c'est-à-dire le passage du " nombre de " (*e.g.*, un nombre de 5 bonbons, un nombre de 5 points, un nombre de 5 billes) au " nombre " (*e.g.*, le nombre « 5 »).

Sous réserve que l'enfant ne présente pas de trouble moteur, notre étude suggère que la motricité manuelle est sensible aux apprentissages en contexte scolaire et n'est pas déterminée simplement par la maturation. Comme nous l'avons exposé au chapitre 3, certaines études ont montré que l'environnement et les attitudes culturelles, en orientant les opportunités d'actions offertes à l'enfant pour s'exercer, impactent le développement et plus particulièrement le

développement moteur (Reed & Bril, 1996 ; Suggate, Pufke, & Stoeger, 2016). Ainsi, considérer l'école comme " espace d'actions encouragées" (Reed & Bril, 1996) pour développer la motricité manuelle pourrait créer un cercle vertueux car les enfants avec une meilleure motricité fine interagissent mieux avec les objets contenus dans leur environnement, ce qui en retour contribuerait à renforcer encore la motricité fine (Iverson, 2010 ; Suggate et al., 2017). Ces résultats encourageants ont conduit à de nouveaux questionnements. Un examen qualitatif des données de cette étude indique que 3 enfants du groupe expérimental n'ont pas réellement profité de ce dispositif. Ils n'ont pas installé de recours aux doigts et n'ont pas amélioré leurs performances. Ces observations nous ont conduits à nous questionner plus précisément sur les composantes de la motricité manuelle requises lors d'un recours aux doigts.

Le recours aux doigts en mathématique : une habileté manuelle complexe.

Les recherches précédemment mentionnées s'intéressent à la relation entre motricité fine et mathématique en considérant les composantes de dextérité (parfois appelée intégration visuo-motrice ou habileté perceptivo-motrice) et de renforcement musculaire ou de déliement des doigts dans des tâches de production-reconnaissance de configuration de doigts ou dans des tâches arithmétiques (*i.e.*, calcul). Cependant, le recours aux doigts lors d'un calcul n'a jamais été à notre connaissance envisagé comme une habileté manuelle ou bimanuelle se précisant au fur et à mesure des occasions offertes à l'enfant de la faire progresser. La capacité à représenter des quantités différentes sur chaque main puis à opérer des transformations d'état par des mouvements de doigts peut être associée à une habileté bimanuelle c'est-à-dire une capacité à planifier et exécuter intentionnellement des gestes pour atteindre un but. Les habiletés manuelles n'émergent pas spontanément mais sont le résultat d'apprentissage implicite ou explicite requérant différentes stratégies comme les conduites imitatives ou les répétitions (Goodway, Crowe, & Ward, 2003). Dans le cas du recours aux doigts en situation de calcul, les gestes mis en œuvre sont symboliques puisqu'ils représentent des quantités, et demandent le plus souvent (au-delà de la quantité 5) une coordination bimanuelle suffisante : chaque main prend en charge une quantité (différente ou similaire selon les nombres en jeu) et le sujet va baisser ou lever des doigts sur l'une ou l'autre main. En résumé et pour caractériser cette habileté manuelle en référence aux travaux de Fagard (2000), les actions à réaliser par les deux mains sont complémentaires sur le plan cognitif (le but à atteindre consiste à résoudre un problème) mais généralement asymétriques ce qui demande i) une indépendance d'exécution des deux mains sans interférence ii) une coordination bimanuelle suffisante pour contrôler l'atteinte du but. De fait, l'apprentissage d'une telle habileté peut être freiné par des contraintes

cognitives dans la mesure où l'enfant doit produire une séquence d'actions pertinente au regard du but visé (*i.e.*, un modèle interne ou externe) et doit être capable de se corriger si nécessaire. En situation d'apprentissage, l'imitation motrice de mouvements de mains engage un mécanisme d'imagerie motrice, d'une part au moment de l'observation de l'action à imiter et d'autre part au moment de la préparation voire de la correction de l'action à réaliser (Jeannerod, 2001 ; Guilbert, Jouen, Lehalle, & Molina, 2013 ; Martzog & Suggate, 2019). A partir d'une tâche de jugement de latéralité de mains photographiées (*i.e.*, A partir de la projection de photographies, les enfants devaient dire si la main vue de face ou de dos était une main droite ou gauche, la tâche est considérée comme réussie si le taux de bonnes réponses est supérieur au seuil de hasard), Funk, Brugger et Wilkening (2005) observent que seuls 60% des enfants de 5-6 ans ont été capables de recourir à un processus d'imagerie motrice pour réussir la tâche. Par ailleurs, un phénomène de congruence posturale (entre la posture de la main de l'enfant et celle photographiée) observé chez les enfants et non chez les adultes témoigne du fait que l'imagerie motrice est sous l'étroite dépendance de l'activité motrice chez le sujet jeune. Enfin, les auteurs relèvent une indépendance des capacités d'imagerie visuelle et d'imagerie motrice, les sujets âgés de 5-6 ans étant tous en réussite sur l'épreuve d'imagerie mentale visuelle (*i.e.*, la tâche consiste à réaliser une rotation mentale d'un objet représenté sur une photo) tandis que l'imagerie motrice n'était pas accessible à 40% d'entre eux. Par ailleurs, avant 7 ans, la majorité des enfants ne serait pas encore en mesure d'utiliser un modèle interne pour anticiper et contrôler un mouvement et aurait recours à un mécanisme de correction des erreurs de proche en proche (Smits-Engelsman & Duysens, 2008). En examinant les relations entre motricité fine et imagerie mentale motrice chez des enfants âgés de 3 à 10 ans, Martzog et Suggate (2019) établissent une interdépendance entre ces deux compétences. Ils constatent que l'imagerie mentale motrice dépend de la maturité et des performances du système sensori-moteur mais supposent qu'en retour, l'imagerie mentale motrice pourrait affecter les habiletés de motricité fine particulièrement durant les phases d'apprentissage au cours desquelles la visualisation mentale des mouvements pourrait faciliter la planification et l'exécution de nouveaux mouvements.

Au-delà des contraintes cognitives, rappelons que l'apprentissage d'une habileté manuelle peut aussi être modulé par des contraintes motrices liées au système neuromoteur et à la co-activation de plusieurs effecteurs (Fagard, 2000 ; Fagard, Hardy-Léger, Kervella, & Marks, 2001). Ces contraintes neuromotrices peuvent expliquer différents phénomènes observés lors de conduites motrices manuelles a) les différences de performances entre main dominante et non dominante,

b) la présence de syncinésies (Wallon & Denjean, 1962) (*i.e.*, mouvements parasites involontaires qui accompagnent une action unimanuelle ou bimanuelle et qui perdurent jusqu'à l'âge de 10 ans); c) la tendance à produire des gestes bimanuels en miroir (Bruml, 1972) ou encore d) la présence de mouvements interférents lorsque deux actions différentes sont prises en charge par chacune des mains (Schmidt & Lee, 2005 ; Otte & Van Mier, 2006). Les progrès observés au cours du développement s'expliquent notamment par la maturation du corps calleux (Fagard, 2000 ; Fagard et al., 2001). Les aires préfrontales dont la maturation est relativement tardive et qui jouent un rôle fondamental pour la planification de l'action et l'inhibition de mouvements spontanés feraient aussi partie des structures neuromotrices impliquées dans l'installation d'habiletés manuelles complexes (Diamond, 2000).

Finalement, les contraintes cognitives et neuromotrices interagissent avec le milieu dans lequel évolue un sujet (Newell, 1986 ; Bril, 2002). Ces interactions permettent la construction d'affordances au cours de l'apprentissage, que Bril définit comme « la connaissance de ce que le contexte offre comme possibilité d'actions » (Bril, 2002 ; p.255). En offrant ou non des occasions d'observer, d'imiter voire d'entraîner le recours aux doigts selon des procédures spécifiquement culturelles (Andres & Pesenti, 2015 cités par Martzog & Suggate, 2019 ; Bender & Beller, 2012), le milieu facilite ou limite la mise en place d'habiletés motrices manuelles utiles aux compétences numériques. Pour exemple, la supériorité des performances de la main dominante sur la main non dominante généralement attribuée à la latéralisation et à l'équipement neuromoteur peut être modifiée par l'entraînement et l'expérience. Provins et Glencross (1968) ont montré que la supériorité de la main dominante chez des scripteurs au clavier novices disparaissait chez les scripteurs experts. Cependant, cette réduction d'écart de performances entre les deux mains est longue à obtenir. Après quatre semaines d'entraînement à une tâche unimanuelle sur chaque main, Annett, Hudson et Turner (1974) constatent chez l'adulte, une relative stabilité du degré d'asymétrie des performances manuelles et des différences interindividuelles importantes.

En considérant que les doigts constituent dans certaines cultures et pour de nombreux enfants un moyen privilégié d'appréhender les nombres et les premiers calculs (Bender & Beller, 2012 ; Seron & Crollen, 2018), il apparaît pertinent de resituer cette procédure de calcul dans le cadre plus général de l'acquisition des habiletés manuelles et bimanuelles, c'est-à-dire de l'aborder comme un ensemble de mouvements planifiés, programmés et coordonnés en fonction d'un but (*i.e.*, représenter, calculer). Représenter, compter, et surtout calculer sur les doigts et le plus souvent avec les deux mains, constituent des tâches exigeantes du point de vue de la dextérité

digitale nécessaire à une bonne exécution motrice (Fischer et al., 2020) mais impliquent aussi possiblement en amont un mécanisme d'imagerie motrice lors de l'observation (lorsqu'un modèle externe est proposé), de la planification et du contrôle de l'action de mouvements manuels coordonnés et asymétriques. Comme toute habileté manuelle, le calcul sur les doigts nécessite un apprentissage (et un contexte qui le soutienne) et des capacités développementales qui permettent cet apprentissage. En conséquence, un usage efficient des doigts en mathématiques pourrait dépendre des occasions qui ont été données à l'enfant d'observer, de reproduire et d'exercer cette habileté, c'est-à-dire aussi des pratiques éducatives qui caractérisent « l'écologie d'apprentissage » (Bril, 2002). Au cours des années qui précèdent l'école élémentaire et en fonction du système scolaire du pays auquel ils appartiennent, les enfants ne reçoivent pas les mêmes sollicitations. Enfin, des différences interindividuelles inhérentes aux rythmes de développement de la motricité (Blondis et al., 1994) pourraient expliquer que la motricité bimanuelle soit une aide pour la construction des habiletés numériques ou arithmétiques ou qu'au contraire elle constitue une charge intrinsèque conséquente (Bara & Tricot, 2017) voire un obstacle lors de certaines situations d'enseignement qui demandent à l'enfant d'observer, de planifier puis d'exécuter des actions bimanuelles symboliques.

L'objectif de l'étude suivante est de mesurer, en contexte scolaire, le bénéfice d'un entraînement de la motricité manuelle associé à un enseignement explicite de l'usage des doigts sur les premières habiletés de calcul (Bonneton-Botté, Ollivier, Hili, & Bara, 2022). En veillant à mesurer les capacités initiales d'imitation motrice de gestes (*i.e.* les habiletés gnoso-praxiques distales), nous cherchons à savoir i) si de meilleures capacités d'imitations motrices manuelles sont associées à de meilleures performances en mathématiques et à un usage plus fréquent des doigts en calcul avant tout dispositif d'enseignement ii) s'il existe un bénéfice d'un dispositif d'entraînement en motricité manuelle sur la représentation mentale de la main mesurée par le dessin de la main et sur certaines composantes de la motricité manuelle (*i.e.*, imitation de mouvements de mains, dextérité, coordination bimanuelle) iii) si ce dispositif d'entraînement mené en contexte écologique présente un bénéfice pour la construction du nombre et le calcul pour tous les enfants indépendamment de leur capacité d'imitation motrice initiale.

Si l'imitation motrice manuelle est un facteur d'apprentissage déterminant pour le recours aux doigts en mathématiques, notre première hypothèse considère que les enfants avec de bonnes capacités d'imitation motrice manuelle au pré-test montreront de meilleures performances en calcul.

A l'instar de Suggate et Stoeger (2017) et conformément à nos précédents résultats, nous formulons en seconde hypothèse qu'il est possible de soutenir le développement de la motricité manuelle à partir d'un dispositif conduit en contexte scolaire par des enseignants. Ainsi, après un entraînement spécifique explicitant le rôle bénéfique des doigts et soutenant la motricité manuelle, nous nous attendons à observer des progrès sur la capacité à se représenter une main (évaluée par dessin de la main) et sur différentes mesures de motricité manuelle (imitation motrice manuelle, dextérité, coordination bimanuelle).

La troisième hypothèse envisage l'effet bénéfique d'un entraînement à l'usage des doigts sur les performances en mathématiques (*i.e.*, résolution de problèmes nécessitant des calculs) chez les enfants selon leur degré de maîtrise initiale de l'imitation motrice manuelle. Ainsi nous nous attendons à ce que les enfants entraînés aient un recours spontané aux doigts plus fréquent et efficace en situation d'évaluation. En conséquence, les enfants du groupe entraîné devraient présenter de meilleures performances en mathématiques que les enfants du groupe contrôle à la fin du dispositif. Cependant, l'imitation motrice étant un facteur important d'apprentissage moteur, les enfants entraînés ayant de faibles capacités d'imitation manuelle au début de l'étude pourraient moins profiter de l'entraînement mis en place en classe que les enfants présentant des capacités d'imitation manuelle élevées au départ de l'étude.

Cette recherche a été conduite dans le cadre d'une démarche coopérative avec les enseignants d'une circonscription de Saint-Brieuc. La moitié des enseignants a été aléatoirement incluse dans le groupe expérimental et l'autre moitié dans le groupe contrôle. Nous avons proposé aux enseignants du groupe contrôle de développer le dispositif l'année suivante. 101 enfants âgés en moyenne de 5 ans 3 mois (4 ans 5 mois à 5 ans 8 mois ; 57 garçons et 44 filles ; n=42 pour le groupe entraîné) de dernière année de maternelle ont participé à cette étude. Les écoles concernées sont situées en zone urbaine avec une population de statut socio-économique moyen. Les critères d'exclusion étaient un niveau en motricité manuelle faible (à plus de deux écarts-types sous la moyenne au test d'évaluation gnoso-praxique distal de Vaivre-Douret, 2010) et un développement atypique. L'ensemble des examinateurs (chercheuses et conseillers pédagogiques) qui ont contribué au recueil des données, ont participé à des sessions de formation pour assurer une homogénéité maximale du protocole de passation. Les passations du pré-test et du post-test étaient individuelles et ont été réalisées dans une pièce calme. Les enseignants du « groupe entraîné » ont participé à trois ateliers théoriques et méthodologiques de trois heures au cours desquels ils ont reçu des informations sur les habiletés motrices, la

méthodologie expérimentale et sur la façon de suivre un protocole expérimental. A partir de ces apports, des ateliers ont été mis en place afin de co-construire le dispositif d'enseignement.

Les activités qui ont été proposées dans le cadre de ce dispositif s'appuient d'une part sur les pratiques des enseignants impliqués d'autre part sur les travaux préexistants qui ont démontré l'intérêt d'entraîner certaines composantes de la perception et de la motricité manuelle (musclature et déliement des doigts, dextérité) pour améliorer certaines habiletés en mathématiques (Asakawa et al., 2017 ; Ollivier et al., 2019). Elles ont été complétées par des activités visant spécifiquement le développement des habiletés manuelles avec l'intention de renforcer la capacité des jeunes enfants à produire des actions avec la main dominante et non dominante et des actions coordonnées. Le principe qui a guidé l'ensemble des séances menées est celui de l'enseignement explicite (Bianco & Bressoux, 2009).

Le dispositif d'enseignement se compose d'ateliers quotidiens et hebdomadaires menés durant 12 semaines. Il alterne des ateliers sur les nombres et de motricité manuelle mais n'entraîne pas au calcul. Conformément aux programmes, le temps quotidien dédié aux activités numériques est environ de 30 minutes. Les enseignants avaient le choix entre plusieurs activités mais devaient mettre en œuvre plusieurs ateliers en respectant au mieux les durées et les fréquences prévues par le protocole.

Le groupe contrôle est un groupe témoin qui n'a pas suivi d'entraînement particulier et qui est composé de 59 élèves issus de 5 classes ; ces élèves ont poursuivi le programme scolaire de façon habituelle. Aucune instruction spécifique n'a été donnée par les chercheuses. Les enseignants ont simplement été informés que les progrès développementaux des enfants seraient mesurés en décembre et avril à des fins de recherche, sans donner plus de détails sur les compétences évaluées. Dans ces classes, conformément aux programmes, le temps quotidien alloué aux activités numériques est d'environ 30 min au cours d'activités rituelles (*e.g.*, décompositions du nombre d'enfants entre les absents et les présents) ou de jeux au cours desquels les élèves apprennent à décomposer et à transformer des collections à partir d'un matériel habituel de classe (cubes, jetons, divers objets).

Les évaluations au pré-test

Évaluation des capacités d'imitation motrice manuelle (IMM)

La passation réduite prédictive d'imitation de gnosopraxie distale (EMG ; Vaivre-Douret, 2010) est une tâche non verbale qui comporte 12 items d'imitation de gestes réalisés par

l'examineur placé face à l'enfant. Les gestes à imiter n'ont pas de signification particulière. Le score attribué était de 0 en cas d'échec ou de 1 pour une réussite, le score maximal à l'épreuve est de 12.

Épreuve de dextérité digitale

Le score de dextérité digitale est obtenu en additionnant les scores obtenus à une tâche d'insertion et à une tâche d'enfilage de perle.

Tâche d'enfilage de perles :

L'épreuve est directement inspirée des travaux de Suggate, Stoeger & Fischer (2017). L'enfilage de perles est une des épreuves proposées dans ces études pour évaluer la dextérité digitale et mesurer des mouvements significatifs et dirigés de petits muscles de la main. Il s'agit d'enfiler des perles sur une tige flexible pendant 30 secondes (le score est équivalent au nombre de perles enfilées).

Coordination bimanuelle

Un score de coordination bimanuelle sur 4 est calculé à partir 1) de l'observation de la coordination au cours d'une tâche de dessin 2) de l'observation de la coordination au cours de la tâche d'insertion utilisée pour la dextérité 3) de l'observation de la coordination au cours de la tâche d'enfilage de perles 4) et de l'observation d'une tâche de découpage d'une feuille A4 avec des ciseaux. Un point est attribué chaque fois que la main non active joue bien un rôle de coopération dans chacune de ces tâches.

Épreuve mathématique

Quatre problèmes verbaux issus du TEDI-MATH de niveau dernière année de maternelle (Grégoire, Noël & Van Nieuwenhoven, 2001) ont été proposés (de type « Jean a quatre cerises, il en mange deux, combien lui en reste-t-il ? »). La note est 0 pour l'échec et 1 pour la réussite à chaque problème. On attribue également pour chaque problème le score 1 si l'enfant a utilisé spontanément ses doigts pour le résoudre et un 0 si cela n'a pas été le cas. Un score maximal de 4 est attribué pour la performance aux problèmes et un second score sur 4 est attribué pour le recours spontané aux doigts lors de la résolution.

Épreuves de Post-test

Les épreuves d'imitation motrice manuelle, de dextérité, de coordination bimanuelle ont été reconduites à l'identique en pré et en post-test.

Concernant le calcul, les 4 items pré-tests de résolution de problèmes ont été complétées par 6 problèmes verbaux (pour un score de 10 incluant les 4 énoncés verbaux du TEDI-MATH proposés en pré-test) et 10 énoncés arithmétiques présentés oralement (de type « 3 + 5 égalent combien ? »). Pour chaque type d'énoncé (verbal ou arithmétique), 5 additions et 5 soustractions ont été proposées. Le score maximal est égal à 20.

Analyse des données

Les données ont été traitées avec le logiciel JASP Version 0.12.1.0 (JASP Team, 2020). Les variables indépendantes sont le groupe expérimental (contrôle versus entraîné), le niveau d'IMM de l'élève (faible versus élevée) et le moment de passation des tests (pré et post). Le niveau d'imitation motrice manuelle (IMM faible versus élevée) est estimé à partir de la médiane du score à l'EMG calculée à partir des données du pré-test recueillies sur l'ensemble de l'échantillon. La répartition des effectifs par groupe est présentée dans le tableau 2.

	IMM FAIBLE	IMM ÉLEVÉE
GROUPE CONTROLE	n = 27	n = 31
GROUPE ENTRAINE	n = 15	n = 27

Tableau 2 : répartition des effectifs en fonction du niveau d'Imitation motrice manuelle (IMM) et du groupe expérimental.

Une première analyse a été réalisée sur les mesures du pré-test pour nous assurer de l'équivalence des groupes sur les différentes variables dépendantes à l'aide d'un test t de Student pour échantillons indépendants. L'examen des variances des différents groupes et des coefficients d'asymétrie et d'aplatissement autorise la réalisation de tests paramétriques, des analyses de variance ont été réalisées pour tester chaque hypothèse.

La comparaison des groupes au pré-test à l'aide d'un test de Student pour échantillon indépendant a été réalisée sur les mesures du pré-test. Au seuil de .05, les groupes ne se différencient sur aucune des variables à l'exception de la mesure de coordination bimanuelle ($t(1,98) = 2,03, p=.04$). Le groupe entraîné présente en moyenne de moins bonnes performances avant l'entraînement que les sujets du groupe contrôle.

Hypothèse 1 : Effet du niveau d'imitation motrice initiale (IMM) sur les performances en mathématiques et sur l'utilisation spontanée des doigts aux problèmes

Compte tenu d'une absence de différence au pré-test sur les performances en mathématiques entre les groupes contrôle et entraîné, nous avons réalisé une analyse de variance avec le niveau d'IMM comme facteur inter-sujets. Le niveau d'imitation motrice initiale a un effet significatif modéré sur les scores aux items de calcul du pré-test ($F(1,98)=5,3, p=.023 \eta^2 = .05$). Les élèves avec un niveau d'IMM élevé ont significativement de meilleurs scores en calcul avant que le dispositif ne soit mis en place. Le score de recours aux doigts n'est pas significativement différent entre les groupes IMM faible et élevé ($F(1,98)=1,7, p=.20$).

Hypothèse 2 : Il existe un bénéfice du dispositif d'entraînement sur certaines composantes de la motricité.

Concernant les scores en EMG, il n'est pas observé d'effet du temps de passation $F(1,96)=1,77, p=.18$. Il existe un effet d'interaction de faible envergure entre le temps de passation et le groupe $F(1,96)=4,04, p=.04 \eta^2 = .006$. Au seuil de .05, les tests post-hoc montrent que le groupe entraîné augmente significativement ses scores d'IMM par comparaison au groupe contrôle. Un second effet d'interaction de faible taille est observé entre le moment de passation et le niveau d'IMM, $F(1,96)= 16,9, p<.001 \eta^2 = .02$. Au seuil de .05, les tests post-hoc indiquent que les performances des sujets de niveau IMM faible augmentent significativement tandis que les sujets qui présentaient un bon niveau d'IMM au pré-test n'augmentent pas significativement leurs performances au post-test.

Concernant la mesure de coordination bimanuelle, un effet significatif du moment de passation est observé $F(1,96) = 22,6, p <.001 ; \eta^2 = .06$ qui traduit une augmentation générale et modérée des performances en coordination. L'interaction entre le temps de passation et le groupe est significative et de faible envergure, $F(1,96) = 10,57, p = .002 ; \eta^2 = .03$. Les tests post-hoc indiquent que le groupe entraîné augmente significativement sa coordination bimanuelle entre le pré- et le post-test alors que ce n'est pas le cas pour le groupe contrôle.

La dextérité s'améliore modérément pour l'ensemble des élèves entre les deux temps de passation, $F(1,96) = 60,82, p <.001 ; \eta^2 = .08$. Au seuil de .05, il n'est pas observé d'effet du groupe. On note une tendance à l'interaction entre le temps de passation et le groupe $F(1,96) = 3,19, p <.08 ; \eta^2 = .02$, les tests post-hoc réalisés indiquent que l'augmentation des performances en dextérité est plus sensible pour les élèves du groupe contrôle.

Hypothèse 3 : Effet du groupe et du niveau d'IMM sur les performances en calcul et l'usage des doigts.

Le score de calcul basé sur les items du TEDI-MATH a fait l'objet d'une analyse de variance à mesures répétées. Un effet significatif modéré est observé pour le temps de passation, $F(1,96) = 36,9, p < .001 \eta^2 = .08$, qui indique une amélioration des performances pour l'ensemble des élèves. Au seuil de .05, aucun autre effet significatif n'est enregistré. L'analyse de variance appliquée aux scores d'utilisation spontanée des doigts lors de la résolution des items ne montre pas d'effet du temps de passation au seuil de .05, mais un effet d'interaction significatif et faible entre le temps de passation et le groupe, $F(1,96) = 4,36, p = .04 \eta^2 = .01$, qui indique que le groupe entraîné utilise en moyenne plus souvent les doigts au cours du post-test que le groupe contrôle. Il est observé aussi une tendance à l'interaction entre le temps de passation et le niveau d'IMM $F(1,96) = 3.31, p = .07 \eta^2 = .01$ de faible taille, les tests post-hoc indiquent que ce sont les enfants avec un niveau d'IMM élevé qui tendent le plus à augmenter le recours aux doigts entre le pré-test et le post-test comparativement aux enfants avec un faible niveau d'IMM.

L'analyse de variance réalisée sur le score total de calcul (20 items de résolution de problème) révèle un effet significatif et de faible taille du groupe $F(1,96) = 4.95, p = .03 \eta^2 = .04$. Le groupe entraîné présente des scores de calcul significativement meilleurs. Il est noté aussi un effet modéré de l'IMM $F(1,96) = 8.37, p = .005 \eta^2 = .07$, les élèves avec un niveau d'IMM élevé au début de l'étude présentent globalement des scores significativement meilleurs en calcul. Finalement, une tendance à l'interaction de faible taille entre ces deux facteurs $F(1,96) = 3,11, p = .08 \eta^2 = .03$ est observée. L'effet de l'entraînement tend à se différencier selon le niveau d'IMM initial des élèves. Concernant le score global de calcul, la figure 13 montre que les élèves à faible IMM profitent peu de l'entraînement comparativement aux élèves à niveau élevé.

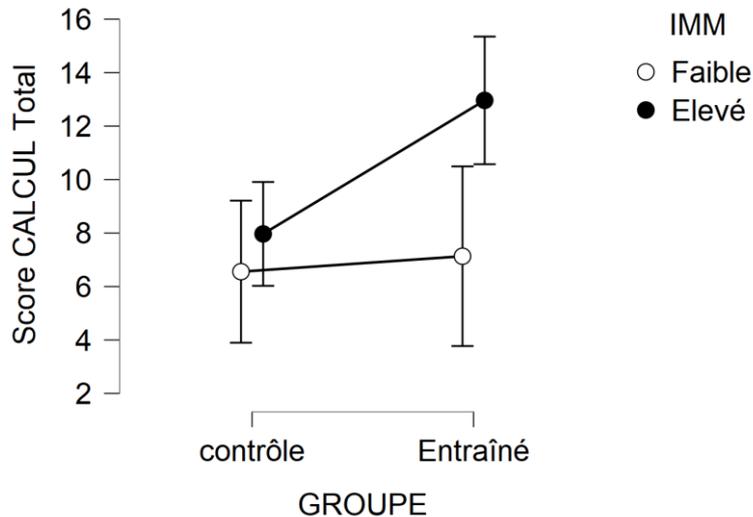


Figure 13 : Tendence à l'interaction entre le facteur groupe (contrôle vs entraîné) et le facteur Imitation motrice (IMM : niveau Faible vs élevé) pour le score de calcul total. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance à 95%.

Une analyse de variance réalisée sur le score de recours aux doigts en situation de calcul montre un effet simple de taille modéré du groupe $F(1,96) = 11.7, p < .001, \eta^2 = .10$ ainsi qu'une tendance à l'interaction de faible taille entre le facteur groupe et le facteur d'IMM $F(1,96) = 3.07, p = .08, \eta^2 = .03$. La figure 14 indique que si l'ensemble des enfants entraînés utilise significativement plus leurs doigts que les enfants du groupe contrôle, l'effet est accentué pour ceux qui présentent un niveau d'IMM élevé.

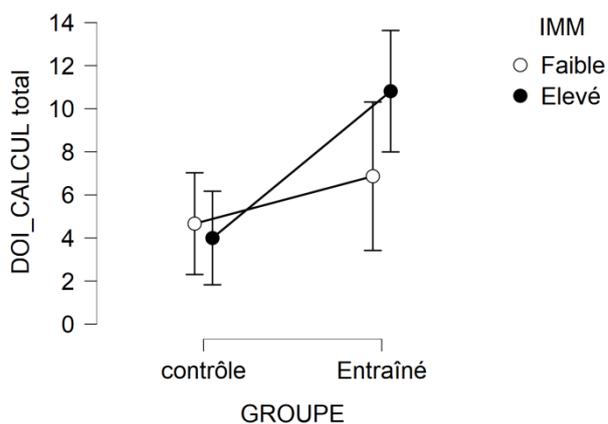


Figure 14 : Tendence à l'interaction entre le facteur groupe (contrôle vs entraîné) et le facteur Imitation Motrice (IMM : niveau Faible vs élevé) pour la variable recours aux doigts. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance à 95%.

L'objectif de cette étude était de vérifier que tous les enfants, quelle que soit leur capacité d'imitation motrice manuelle, pouvaient progresser en calcul suite à un entraînement alliant un travail sur la motricité manuelle et un enseignement explicite de l'usage des doigts en situation de calcul. Notre première hypothèse supposait que les enfants avec de bonnes capacités d'imitation motrice manuelle au pré-test montreraient de meilleures performances initiales en résolution de problème. Cette hypothèse est confirmée puisque les sujets avec des capacités d'imitation motrice manuelle élevées au début de l'étude présentent des performances modérément et significativement meilleures en calcul. Alors que la gnose digitale et la dextérité ont été associées dans diverses études à de meilleures performances en mathématiques, ce résultat contribue à la compréhension des relations entre motricité et mathématiques, en montrant que l'imitation motrice de gestes manuels est aussi une capacité associée à de meilleures performances en calcul.

En deuxième lieu, nous souhaitons examiner l'effet de notre dispositif sur les différentes composantes de la motricité manuelle. Les analyses indiquent que si l'on considère l'ensemble de l'échantillon, on ne mesure pas d'évolution significative de l'IMM entre le pré-test et le post-test. Par contre, si l'on considère uniquement le groupe entraîné (soit la moitié de l'effectif total), on mesure une augmentation significative mais faible du score d'EMG au post-test. Les analyses complémentaires indiquent que seuls les enfants ayant un niveau initial faible d'IMM ($n=15$), ont significativement mais faiblement progressé à l'EMG. Il est permis de penser que ce résultat traduit un effet d'apprentissage lié à notre dispositif expérimental en faveur des enfants d'IMM faible.

De façon inattendue, la dextérité n'a pas évolué de façon significative pour le groupe entraîné et au contraire le groupe contrôle tend à avoir de meilleurs résultats au post-test. Notre programme, centré sur de multiples composantes de la motricité, a possiblement accordé moins de temps à la dextérité que ne l'a fait le groupe contrôle, ce qui pourrait expliquer cette absence d'effet en contradiction avec les travaux d'autres chercheurs (Asakawa et al., 2014). Finalement, il a été observé un bénéfice positif du programme sur la coordination bimanuelle puisque les enfants du groupe entraîné qui présentaient des performances plus faibles au départ, rattrapent et dépassent les performances du groupe contrôle. Cependant, l'analyse de la taille des effets indique que les progrès enregistrés sont de faible ampleur. En résumé, concernant le domaine de la motricité manuelle, le programme a permis spécifiquement des progrès dans les domaines de l'imitation motrice de geste manuel et de la coordination bimanuelle mais l'analyse des tailles d'effet indique que les progrès moteurs s'installent lentement

conformément aux observations de Annett et al. (1974) ce qui laisse penser qu'un programme plus long aurait été bénéfique aux enfants.

Nous avons supposé que notre dispositif apporterait un bénéfice significatif comparativement à un enseignement classique. Cependant, nous avons aussi évoqué la possibilité que ces bénéfices soient modulés par les capacités initiales des jeunes enfants à observer et reproduire des gestes manuels. La mesure de calcul basée sur les items du TEDI-MATH n'a pas permis de différencier les deux groupes qui progressent de façon non différente entre le pré et le post-test. Ce résultat peut s'expliquer par la facilité des items choisis. Le recours aux doigts pourrait ne pas apporter de bénéfice particulier pour la résolution d'opérations simples qui peuvent être résolues par comptage verbal, décomposition ou connaissance des faits arithmétiques (Carpenter & Moser, 1984). On note cependant des modifications qualitatives des procédures employées suite à l'entraînement puisque les enfants du groupe entraîné recourent plus fréquemment aux doigts pour résoudre ces items. Avec un test de calcul plus complexe proposé en fin de dispositif, les résultats indiquent que les enfants du groupe entraîné finissent avec des performances significativement meilleures qui s'accompagnent d'un recours aux doigts significativement plus fréquent. Finalement, le fait que les enfants entraînés aient eu recours aux doigts plus fréquemment sur les 4 items simples du TEDI-MATH sans dépasser les scores des élèves du groupe contrôle pourrait signifier qu'une nouvelle procédure de résolution des problèmes a été expérimentée et est venue enrichir le répertoire de procédures disponibles. Ultérieurement confrontés à des items plus complexes, les enfants peuvent être en réussite grâce à la disponibilité de cette procédure. L'effet positif de cet entraînement manuel sur les performances en calcul confirme les résultats obtenus dans d'autres recherches (Asakawa et al., 2017 ; Ollivier et al., 2019). Dans notre étude, l'absence d'amélioration en dextérité associée à une amélioration significative des capacités d'IMM et de coordination manuelle du groupe entraîné offre des perspectives nouvelles d'interprétation et d'investigation des relations entre usage des doigts et réussite en calcul. En améliorant la coordination bimanuelle, le dispositif a possiblement permis de diminuer la charge cognitive (Bara & Tricot, 2017) qu'implique la coordination des deux mains lors d'un calcul. L'amélioration des capacités d'IMM témoigne du fait que le dispositif a accentué le développement des capacités d'observation et de reproduction d'un modèle externe qui convoquent probablement un mécanisme d'imagerie motrice (Jeannerod & Decety, 1995). Une fois disponible, cette imagerie mentale motrice permet de préparer ou de simuler des actions réelles. Des études complémentaires associant une mesure de l'imagerie motrice mentale (Puyjarinet, Soppelsa & Connan, 2020) devraient

permettre de mieux comprendre les relations entre imagerie motrice mentale, capacité d'imitation motrice et usage des doigts en calcul. La publication récente d'un test d'imagerie motrice mentale étalonné pour les enfants de 7 à 11 ans (Puyjarinet et al., 2020) offre des perspectives intéressantes d'investigation des relations entre imagerie mentale motrice et recours aux doigts.

En considérant le niveau d'IMM initial des enfants entraînés, nous avons aussi montré que ce sont les enfants avec un niveau d'IMM initial élevé qui tendent à améliorer le plus leur performance en calcul. Les enfants avec un IMM faible recourent plus fréquemment aux doigts pour résoudre des problèmes mais leur performance finale en calcul n'est pas différente du groupe contrôle. L'interdépendance entre maturité motrice manuelle et imagerie mentale motrice (Martzog & Suggate, 2019) pourrait faciliter l'apprentissage chez les élèves ayant déjà développé des capacités d'imitation motrice manuelle. Au contraire, les enfants, présentant un niveau d'imitation initial faible, ont progressé plus lentement. Notre étude ne permet pas d'expliquer les raisons de ces différences interindividuelles importantes déjà constatées par ailleurs (Blondis et al., 1993).

Perspectives pour la pratique scolaire

Les recherches qui ont établi une relation entre l'usage des doigts et les performances en mathématiques sont généralement méconnues des professionnels de l'éducation. Les nombreux et récents travaux menés ces dernières années offrent aux psychologues scolaires des arguments solides pour accompagner les enseignants dans la transformation des pratiques et des représentations relatives au développement de la motricité fine et du calcul. Notre dispositif, bien que perfectible sur le plan de la dextérité, s'est traduit par une amélioration de l'entrée dans le calcul mais un temps d'accompagnement plus long aurait peut-être été bénéfique aux enfants qui présentaient au départ un IMM faible. Ces résultats devraient encourager les professionnels de la petite enfance à concevoir une écologie d'apprentissage qui permette d'accompagner le développement de la motricité manuelle du jeune enfant dans toutes ces composantes (dextérité, coordination, imitation motrice) au service des habiletés de calcul. Au-delà de la motricité manuelle, nos résultats soutiennent la mise en œuvre, au niveau préscolaire, d'activités numériques associées aux représentations digitales. Pour exemple, les activités de décomposition des dix premiers nombres sur les doigts associées à leurs écritures chiffrées et les activités quotidiennes de résolution de petits problèmes avec les doigts offrent l'occasion d'incarner les propriétés des nombres (i.e., $7 = 4 + 3$ mais c'est aussi $5 + 2$) et des calculs

(i.e., l'addition est commutative, pour réaliser $7+3$, je peux commencer par poser 7 sur mes doigts ou je peux commencer par poser 3 et constater que la configuration finale des doigts sera identique dans les deux situations). Enseignée explicitement, l'utilisation des doigts pour calculer constitue une cognition incarnée et située qui prépare la conceptualisation du nombre et du calcul et qui facilite l'accès aux apprentissages ultérieurs plus abstraits de l'école élémentaire.

9. Conclusion sur mes contributions à l'étude du recours aux doigts en mathématiques.

Dans le champ de la numératie, mes contributions ont d'abord permis d'enrichir les méthodes d'investigation de la représentation mentale de la main en démontrant que la présence de certaines caractéristiques du dessin de la main implique de meilleures habiletés numériques. Les démarches interventionnelles conduites grâce à une coopération avec les enseignants ont permis de montrer que les programmes associant un enseignement explicite du recours aux doigts et un soutien de la motricité manuelle étaient bénéfiques à l'installation des premières habiletés numériques et arithmétiques. Sur un plan plus fondamental, j'ai cependant pu montrer que les effets de ces programmes semblent conditionnés aux capacités d'imitation motrice des enfants. Pour Weisberg et Newcombe (2017), l'apprentissage incarné postule qu'une transition de l'action à l'abstraction comprend une diversité de techniques basées sur le corps (gestes, imitations, simulations). La question des différences inter-individuelles observées quant aux capacités d'imitation devra faire l'objet de plus amples investigations. Des études expérimentales et d'autres menées en contexte scolaire devraient permettre de préciser les relations entre capacités d'imitation motrice et d'imagerie mentale motrice et capacité d'apprentissage en milieu scolaire.

10. Perspectives

10.1. L'IA et la réalité virtuelle au service des enfants en situation de handicap : le projet Kaligo+

De nombreux enfants à besoins spécifiques présentent des déficits de coordination motrice ou des troubles d'apprentissage de l'écriture qui entravent leur possibilité de réussite académique. Comme nous l'avons exposé dans les chapitres précédents, les outils basés sur les technologies numériques et l'intelligence artificielle offrent des perspectives intéressantes de

personnalisation des apprentissages. KALIGO+ est un projet qui réunit différents partenaires : des chercheurs en réadaptation de l'équipe BEACHILD (CHU de Brest et Université de Bretagne Occidentale), l'équipe IRISA-EXPRESSION (Université Rennes 1) chargée de l'analyse de la voix, POLYMORPH, une équipe spécialisée dans la réalité virtuelle, LEARN & GO, une entreprise spécialisée dans le développement d'applications pour l'éducation et moi-même en tant que chercheuse en psychologie du LP3C). Ce consortium aura pour objectif la conception d'une application dédiée à l'apprentissage de l'écriture pour des enfants présentant des besoins spécifiques (*i.e.*, enfants avec trouble de la coordination motrice, enfants avec trouble de l'écriture, enfants avec déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité, enfants avec paralysie cérébrale). KALIGO+ allie une solution pour tablette équipée stylet et une solution de réalité virtuelle (RV) immersive capable d'exploiter précisément le mouvement des mains et de proposer des activités en motricité globale. Comme pour le projet intuitcript, certaines activités de réadaptation pourront être réalisés au doigt ou au stylet sur tablette. Les tracés seront analysés en temps réel de telle sorte que différents feedbacks pourront être renvoyés à l'enfant. Les exercices basés sur la réalité virtuelle immersive (*i.e.*, l'enfant muni d'un casque est immergé dans un univers ludique et doit réaliser différentes tâches motrices pour débloquer des niveaux de jeu). Cette application visera l'accessibilité de l'apprentissage pour tous les enfants en proposant des fonctionnalités et des paramètres ajustables. Cette technologie contribuera à améliorer les prises en charge en permettant notamment d'adapter le travail au rythme et aux besoins de l'enfant, de favoriser son autonomie et de faciliter les échanges au sein de la communauté des professionnels, de motiver l'enfant dans sa prise en charge grâce à la ludification de l'activité. En effet, au-delà de l'accompagnement du processus d'apprentissage, nous souhaitons concevoir une application qui soit une interface de dialogue et de co-intervention entre les différents professionnels et la famille.

Plusieurs tâches sur lesquelles je suis impliquée structurent le projet :

- Tâche 1 : Conception d'un module d'assistance au repérage et au diagnostic des troubles de l'écriture. Le cahier des charges est en cours de rédaction en partenariat avec l'équipe BEACHILD. Ce module proposera au professionnel une liste d'échelles, de tests, de tâches, de critères d'observation et de vidéo pour repérer ou pour diagnostiquer le trouble d'écriture.
- Tâche 2 : Conception d'une gamification (ou ludification) des modules d'apprentissage et développement de modules en réalité virtuelle immersive. La réalité virtuelle (RV) est une modalité de plus en plus utilisée dans le cadre d'un travail de réadaptation. Une

méta-analyse récente dédiée aux enfants avec paralysie cérébrale montre qu'elle est efficace pour améliorer la coordination de la motricité fine qui est un pré-requis important pour tout type d'acquisition (Abdelhaleem, Abd El Wahab & Elshennawy, 2022). Les bénéfices sur la coordination globale sont encore en débat (Abdelhaleem, Abd El Wahab & Elshennawy, 2022 ; Ren & Wu, 2019). Cependant, les outils de RV utilisés dans ces recherches sont des jeux déjà existants (xbox 360, Wii Nintendo), ne relèvent pas de la réalité virtuelle immersive et n'ont pas été conçus avec une visée thérapeutique. Dans le projet KALIGO +, il s'agira d'implémenter au sein d'une réalité virtuelle immersive les propriétés repérées comme efficaces pour la prise en charge du trouble de l'écriture : activités ludiques et motivantes centrées sur le geste d'écriture et la connaissance des lettres, temps dédié à l'imagerie motrice mentale, utilisation de la motricité globale pour construire les programmes moteurs des lettres, évaluation par l'enfant lui-même de certaines caractéristiques du mouvement.

- Tâche 3 : Conception de modules de remédiation de l'écriture. En appui sur un état de l'art récent relatif à la prise en charge des élèves présentant un trouble d'acquisition de l'écriture et dans la continuité de nos travaux, trois types de remédiation sur tablette sont envisagées :
- 1) La sonification de l'écriture. Des expérimentations mené par Danna et collaborateurs (Danna & Velay, 2017) ont montré le bénéfice d'un supplément de feedback sensoriel auditif dans le processus d'élaboration des programmes moteurs. En particulier, la sonification pourrait être envisagée pour des sujets qui ont une écriture lente et dysfluente.
 - 2) La suppression temporaire du feedback visuel et le report de la connaissance du résultat après la fin de la production. Cette proposition, dans la continuité de nos précédents travaux (étude 6), a aussi été envisagée par Lopez et Vaivre-Douret (2021). Elle est particulièrement intéressante à envisager pour des sujets qui allouent une attention trop importante aux informations visuelles au détriment des informations proprioceptives. Ces mêmes auteurs préconisent aussi la mémorisation de patterns pré-graphiques kinesthésiques et des apprentissages multisensoriels ce qui sera envisagé dans le cadre du dispositif de réalité virtuelle.
 - 3) Le recours à l'imagerie mentale motrice est une méthode de remédiation relativement récente qui commence à faire l'objet d'expérimentations dans le champ du développement troublé. Wilson et al. (2004) ont montré qu'il existe chez

les enfants avec trouble d'acquisition de la coordination motrice une difficulté à se représenter le mouvement à réaliser : on ne trouve pas chez ces enfants de correspondance entre le mouvement réel et le mouvement simulé que l'on observe chez les enfants tout venants. Ces auteurs font l'hypothèse d'un déficit de modélisation interne du mouvement qui entrave les possibilités d'apprentissage moteur. Puyjarinet (2015) a démontré l'efficacité d'un programme de rééducation de l'écriture pour un groupe d'enfants présentant un trouble de l'écriture mais précise qu'il serait nécessaire de vérifier le niveau d'imagerie motrice des sujets avant de proposer ce type de thérapie, démarche qui est envisagée dans notre future étude.

L'application dans sa première version fera l'objet d'une mesure d'impact fin 2023 auprès d'une population d'enfants présentant un trouble d'attention avec ou sans hyperactivité avec dysgraphie.

10.2. Motricité manuelle et exploration haptique chez l'enfant présentant un TDI

Fiorella et Mayer, cités par Tricot (2017), classent en huit catégories les méthodes d'apprentissage qui permettent au sujet d'être cognitivement actif. Parmi elles, le fait d'agir physiquement, de manipuler des objets, de faire des gestes en lien avec ce que l'on est en train d'apprendre. L'étude de la perception haptique présente donc un intérêt majeur pour la psychologie de l'éducation. La perception haptique permet un traitement séquentiel et analytique de l'information et dépend de l'ensemble des processus qui intègrent « les informations cutanées et les informations proprioceptives et motrices liées aux mouvements d'exploration » (Gentaz, 2018, p.9). L'étude des processus haptiques a permis d'identifier six procédures exploratoires haptiques chez l'adulte : le contact statique, l'enveloppement, la pression, le mouvement (ou frottement) latéral, le suivi de contour et le soulèvement (Lederman et Klatzky, 1987). Ces procédures exploratoires haptiques permettent d'identifier des propriétés matérielles (texture, dureté, température), des propriétés géométriques (volume, forme globale, forme exacte) et la masse de l'objet exploré. Il a aussi été observé que les élèves au développement typique utilisent une stratégie d'exploration en deux temps. Tout d'abord, des informations sur la forme globale de l'objet sont obtenues par la procédure exploratoire haptique d'enveloppement en utilisant toute la main. Puis, des informations plus précises sont extraites à partir d'autres procédures plus spécialisées (suivi de contour) (Pinet & Gentaz,

2008). Selon Fagard (2001, p. 5), « *l'émergence des habiletés manuelles représente une étape fondamentale pour le développement de la capacité à interagir avec l'environnement, de résoudre des problèmes et de planifier des séquences de comportement qui soient utiles ailleurs dans l'espace et plus tard dans le temps* ». L'usage des deux mains nécessite le plus souvent une coordination bimanuelle et, dans certains cas, une asymétrie naturelle est observée : la main « préférée » sert à la manipulation, tandis que l'autre main aide à la stabilisation de l'objet à explorer (Fagard, 2001). Le rôle de cette coordination bimanuelle reste, pour l'heure, peu explorée dans les études en motricité fine en particulier chez les enfants au développement troublé. Enfin, la mise en place des habiletés manuelles dépend aussi de facteurs cognitifs. Les recherches montrent que l'âge de 7 ans est un âge charnière qui marque l'apparition des capacités à se représenter le mouvement à réaliser (Guilbert et al., 2013). Chez l'enfant au développement typique, l'accès à cette imagerie motrice mentale facilite l'instauration d'habiletés motrices (Martzog, Stoegger & Suggate, 2019).

Un grand nombre d'études ont été réalisées auprès d'élèves typiques confirmant l'importance de la motricité manuelle et plus particulièrement de la modalité haptique dans les apprentissages scolaires (connaissance des lettres, lecture, numération, géométrie notamment). En revanche, il existe très peu de recherches étudiant l'usage de la modalité haptique par des enfants avec un trouble du développement intellectuel (TDI). Le développement cognitif des enfants avec TDI présente un sous fonctionnement cognitif chronique qui limite la mise en œuvre de stratégies efficaces au cours d'un apprentissage (Courbois & Paour, 2007 ; Kim et al., 2016). Ces difficultés stratégiques sont d'autant plus évidentes que la charge cognitive de la tâche à réaliser est importante (Bray, Huffman, & Grupe, 1998). Par comparaison aux enfants typiques, leurs capacités attentionnelles et mnésiques (mémoire de travail et mémoire à long terme) sont limitées (Courbois & Paour, 2007) et leur développement moteur est bien souvent décrit comme accusant des retards (Kim et al., 2016), notamment en motricité fine (Vuijk, Hartman, Scherder & Visscher, 2010 ; Rintala & Loovis, 2013). Si dans une perspective déficitaire ou développementale, des retards moteurs ont bien été identifiés, les caractéristiques des trajectoires développementales des enfants avec TDI sont souvent méconnues (Thomas, Annaz, Ansari, Scerif, & Jarrold, 2009). Pourtant, il a été démontré que les habiletés en motricité fine sont un facteur prédictif à l'amélioration des habiletés cognitives et sociales chez une cohorte de plus de 2000 enfants ayant un trouble du développement (Kim et al., 2016). La motricité manuelle, et plus spécifiquement l'exploration haptique, pourrait jouer un rôle de facilitateur pour certains apprentissages scolaires. Une étude pilote réalisée sur un enfant porteur d'une

trisomie 21 a démontré que la modalité haptique favorise la reconnaissance des lettres et qu'un déficit intermodal entre modalités visuelle et haptique peut expliquer les difficultés d'acquisition chez les élèves avec TDI en comparaison aux élèves typiques (Labat, Magnan & Ecalle, 2013). Le recours à la modalité haptique pour l'exploration de lettres rugueuses (de type Montessori) peut aussi contribuer à l'apprentissage de l'écriture cursive chez des élèves TDI (Bourdeaud, 2017) à l'instar des élèves typiques. Ainsi si de rares études démontrent, dans le champ de la littératie, l'intérêt du recours à la modalité haptique pour les enfants avec TDI, aucune étude, à notre connaissance, n'a permis de caractériser les procédures exploratoires haptiques des élèves avec TDI. Qu'il s'agisse de l'enfant au développement typique ou atypique (avec TDI), la motricité pourrait faciliter ou au contraire entraver la possibilité d'exploiter le sens haptique au cours d'un processus d'apprentissage.

Avec Sophie Le Gall, doctorante, Florence Bara et moi-même comme co-directrices de thèse, nous nous sommes fixées comme objectifs de recherche de décrire (étude 1) et de comparer (étude 2) les procédures exploratoires haptiques observables chez une cohorte d'élèves présentant ou non un trouble du développement intellectuel afin de préciser les trajectoires développementales motrices de ces populations (Thomas et al., 2009). Ces études emprunteront aux protocoles expérimentaux déjà existants (*i.e.*, expériences de « prise en charge » d'objets présentant des propriétés particulières) développés par Lederman et Klatzky (1987). Dans un troisième temps, nous proposons d'étudier plus spécifiquement le rôle de la composante bimanuelle dans la mise en œuvre d'une procédure d'exploration haptique (étude 3). Enfin, une dernière et quatrième étude consistera à valider l'existence d'un effet mélioratif de l'exploration haptique au cours d'une séquence d'apprentissage en géométrie (étude 4).

10.3. Une recherche coopérative au service des élèves en situation de handicap.

La convention des nations unies relatives aux droits des personnes handicapées, la charte du Luxembourg adoptée par la constitution Européenne ainsi qu'en France, la loi du 11 février 2005 pour l'égalité des droits et des chances, la participation à la citoyenneté des personnes handicapées convergent toutes vers l'affirmation des droits de l'enfant à recevoir une éducation qui lui permette une insertion scolaire à visée sociale. De cette insertion dépendent en grande partie la construction de l'estime de soi, de sa dignité, et de son identité. Parallèlement, le décret du 11 juillet 2006 relatif au socle commun de connaissances et de compétences fait de l'enseignement des éléments de mathématiques un enseignement fondamental. Le texte précise

: “La maîtrise des principaux éléments de mathématiques s’acquiert et s’exerce essentiellement par la résolution de problèmes, notamment à partir de situations proches de la réalité”. La cognition numérique est une composante essentielle de l’accès à l’autonomie : le nombre est quotidiennement sollicité pour calculer des durées lors de déplacements, pour rendre la monnaie, pour mesurer, pour peser. A la rentrée 2019, l’éducation nationale enregistrait dans le second degré 166 680 élèves en situation de handicap (tout type de handicap confondu) dont 48370 en unités localisées pour l’inclusion scolaire. Pour ces derniers, et pour les enseignants et parents qui les accompagnent, la maîtrise du nombre et des premiers calculs arithmétiques est un enjeu majeur de l’accès à l’autonomie et à l’insertion professionnelle. Pourtant, un état des lieux des modèles actuels, des outils d’évaluation et de remédiation ou encore des manuels d’enseignement révèle un déficit de connaissances scientifiques des processus d’apprentissage qui caractérisent les élèves avec déficience intellectuelle (Buntix et al., 2016).

L’organisation mondiale de la santé définit la déficience intellectuelle comme “la capacité sensiblement réduite de comprendre une information nouvelle ou complexe, et d’apprendre et d’appliquer de nouvelles compétences. Il s’ensuit une aptitude diminuée à faire face à toute situation de manière indépendante (trouble du fonctionnement social), un phénomène qui commence avant l’âge adulte et exerce un effet durable sur le développement ». Le dernier rapport produit par l’INSERM en 2016 sur les déficiences intellectuelles (DI pour déficience intellectuelle ou TDI pour trouble du développement intellectuel selon la DSM 5, terme qui sera choisi pour la suite de ce document) indique que 1 à 2% de la population française présente une déficience intellectuelle et rappelle que « le fonctionnement et/ou les capacités des personnes avec DI à progresser sont fonction de la présence d’opportunités d’apprentissage et d’un enseignement adapté à leur mode de fonctionnement cognitif » (Buntix et al., 2016 ; p.131). Par conséquent, les experts recommandent que des recherches soient menées pour mieux comprendre les spécificités des processus d’apprentissage et pour objectiver l’efficacité des interventions pédagogiques. Si chez les enfants au développement typique comme nous l’avons exposé dans le chapitre 8, le recours aux doigts est reconnu comme déterminant dans la construction des premières habiletés numériques et arithmétiques (Guedin et al., 2018). Chez les enfants au développement typique, le recours aux doigts pourrait être un moyen de soulager la mémoire de travail lorsque celle-ci est encore peu développée ou que la situation problème est complexe (Poletti, Krenger, Dupont-Boime, & Thevenot, 2022). Nos travaux ont aussi montré que le fait de soutenir le développement de la motricité fine et d’enseigner explicitement la possibilité de recourir aux doigts impactent positivement l’entrée dans le calcul des élèves typiques (Bonneton-Botté et al., 2022 ; Ollivier et al., 2020). Qu’en est-il des élèves qui présente

un trouble du développement intellectuel ? Il existe un déficit de connaissances sur cette question de l'usage des doigts en mathématiques pour ces enfants. La recherche d'accessibilité pédagogique inhérente au principe d'une école inclusive conduit à se questionner sur la pertinence d'une intervention en milieu scolaire pour ces élèves. Le rapport de l'INSERM de 2016 souligne la rareté des études menées auprès des personnes avec trouble du développement intellectuel idiopathique et recommande d'étudier la spécificité des processus d'apprentissage et l'efficacité des interventions. Les enfants avec trouble du développement intellectuel présentent un retard de motricité fine de 3 à 4 ans comparativement à leurs pairs au développement typique (Rintala & Loois, 2013). Les habiletés numériques et de calcul présentent elles aussi un retard d'acquisition (Baroody, 1999) qui entravent l'insertion scolaire, sociale et professionnelle. Quelques études soulignent que les élèves avec TDI léger à modéré avec des étiologies mixtes ont des difficultés dans les tâches qui impliquent de relier des chiffres arabes ou des mots nombres à des représentations précises de quantités (Brankaer, Ghesquière, & De Smedt, 2011 ; Garrote, Moser, Opitz, & Ratz, 2015). Garrote et al. (2015) suggèrent également que les élèves avec TDI scolarisés à l'école primaire ou secondaire éprouvent des difficultés à décomposer les nombres jusqu'à dix (*e.g.*, savoir que 6 est composé de 2 et 4). A l'exception d'une étude faisant état d'un recours aux doigts chez des enfants présentant un TDI (Sermiet Dessemontet, Moser Opitz & Schnepel, 2020), les relations entre motricité manuelle et habiletés arithmétiques n'ont à notre connaissance pas été investiguées pour cette population. Le LéA (Lieu d'éducation associé) UDMEX (pour Utilisation des Doigts en Mathématiques et enseignement EXplicite) est un projet initié en 2019 et qui s'achèvera en 2024. Un lieu d'éducation associé (LéA) est un dispositif financé par l'Institut français de l'éducation de l'ENS de Lyon (IFÉ) qui accompagne des recherches collaboratives et met en réseau les différents acteurs (enseignants et chercheurs notamment). Ce projet de recherche rassemble des enseignants spécialisés, une formatrice en mathématiques, une conseillère pédagogique et des chercheuses en psychologie (moi-même et Fanny Ollivier alors inscrite en doctorat). Au sein de ce groupe, une première étude a été identifiée comme un préalable nécessaire à la conception et à la mise en œuvre d'un dispositif d'enseignement à l'usage des doigts à destination d'enfants présentant un TDI léger à modéré. Notre premier objectif était de caractériser le recours spontané aux doigts chez des élèves avec TDI qui ont à résoudre des problèmes à énoncés verbaux ou arithmétiques. En premier lieu, il s'agit d'explorer la relation entre la fréquence du recours aux doigts, les performances relatives aux habiletés numériques et de calcul et les performances en motricité manuelle mesurées par l'agilité, la dextérité, la coordination motrice, la représentation mentale de la main évaluée à travers le dessin de la

main. Le deuxième objectif consiste à vérifier que la relation positive entre la motricité manuelle et les habiletés numériques et de calcul, observée pour des populations au développement typique, se manifeste de la même façon chez les élèves avec trouble du développement intellectuel. La population de cette étude concerne 38 enfants présentant un TDI léger à modéré. Le diagnostic de trouble du développement intellectuel a été confirmé pour chaque participant par un psychologue scolaire ou un psychologue intervenant au sein de l'institut médico-éducatif. Tous les participants ont passé un test WISC-IV moins de deux ans avant cette étude. Le recrutement des participants a été réalisé sur la base de certains subtests du TEDI-Math. Les enfants de l'échantillon présentent en mathématiques des acquisitions de fin de cycle 1 mesurées par des tests scolaires (niveau grande section de maternelle). Les enfants sont âgés en moyenne de 10 ans 4 mois (Min = 8,5 ; Max = 17 ans 6 mois), l'observation de la latéralisation au cours de différentes tâches bimanuelles permet d'identifier 1 ambidextre, 31 droitiers et 6 gauchers.

Au regard du niveau scolaire des élèves rencontrés dans le cadre de cette étude (fin de cycle 1) nous nous attendons à observer 1) un usage spontané des doigts pour soutenir la résolution de problèmes mathématiques (Baroody, 1999 ; Sermiet-Dessemontet, et al., 2020) 2) une relation positive entre le recours aux doigts et les performances observées à différentes tâches mathématiques (*i.e.*, habileté numérique et calcul) 3) un lien positif entre les mesures de motricité manuelle et le recours spontané aux doigts d'une part et les performances en mathématiques d'autre part (Bonneton-Botté et al., 2022 ; Ollivier et al., 2020) 4) Une relation positive entre la qualité des représentations de la main mesurée par le dessin de la main et les performances en mathématiques (Bonneton-Botté et al., 2015). Les premiers résultats actuellement soumis pour la revue *Éducation & Didactique* indiquent que les élèves avec TDI rencontrés dans cette étude utilisent fréquemment les doigts pour résoudre des problèmes avec énoncés arithmétiques ou avec énoncés verbaux (30 enfants sur 38 utilisent au moins une fois les doigts lorsqu'ils ont à résoudre 20 petites situations problèmes) et que cette procédure lorsqu'elle est utilisée mène le plus souvent à une réussite. Comme pour les enfants au développement typique, les capacités visuo-motrices aussi appelées dextérité semblent déterminantes pour pouvoir recourir à cette procédure. De même, nous avons retrouvé une relation significative entre les scores obtenus à des tâches mesurant les habiletés numériques et arithmétiques et la capacité à dessiner une main en planifiant son tracé et en représentant 5 doigts.

La différence que nous avons identifiée entre les populations étudiées concerne les capacités d'imitation motrice de mouvements de main. Pour rappel, l'étude menée chez des populations typiques et publiée en 2022 identifie un probable rôle de ces capacités pour expliquer les différences interindividuelles (Bonneton-Botté et al., 2022). L'interprétation de ce résultat nous a conduit à supposer qu'un mécanisme d'imagerie mentale motrice pourrait jouer un rôle lors de l'observation et de l'imitation des mouvements de main à reproduire en situation d'apprentissage. Les enfants typiques qui ont de faible capacité d'imitation motrice manuelle utilisent moins les doigts et sont moins performants en calcul. Lorsqu'une intervention est mise en œuvre pour soutenir la motricité fine et le recours aux doigts, ces mêmes enfants ne profitent que très peu du dispositif d'entraînement. Nous avons supposé que le temps alloué à l'apprentissage moteur devrait être plus conséquent pour ces enfants. Les données obtenues au pré-test chez les enfants TDI révèlent de faibles capacités d'imitation motrice manuelle comparativement à des élèves ayant un niveau scolaire équivalent en mathématique ($m = 7,25$ et $ety. = 2,55$ pour les enfants TDI ; $m = 9,7$ et $ety. = 1,55$ pour les enfants typiques au test de l'EMG). Ces faibles capacités d'imitation motrice manuelle devront être considérées lors de la conception d'un dispositif d'entraînement.

L'ensemble des résultats obtenus dans cette première partie du projet UDMEX permet d'entrevoir le potentiel bénéfique d'un dispositif d'enseignement explicite à l'usage des doigts en mathématiques pour des élèves présentant un trouble du développement intellectuel et de caractériser les contours d'un dispositif efficace pour ces élèves. Rappelons que le recours aux doigts lors des petits calculs peut présenter plusieurs avantages. Premièrement, il facilite la conceptualisation du nombre en rendant visible les différentes décompositions du nombre dix (par visualisation des doigts levés et les doigts baissés) ; deuxièmement il permet d'alléger la charge en mémoire de travail lorsque la situation est complexe ou lorsque le sujet fait face à un déficit de mémoire de travail (Poletti et al., 2022). Troisièmement, dans une perspective incarnée, il constitue un moyen de construire et de renforcer les traces sensori-motrices des dix premiers nombres et par conséquent de faciliter l'accès à la sémantique des nombres nécessaire aux premiers calculs (Di Luca & Pesenti, 2010). Ces constats et les résultats des pré-tests réalisés auprès des enfants avec TDI permettent d'envisager un dispositif d'enseignement à l'usage des doigts dont les principes d'action seraient le renforcement de la motricité manuelle des enfants avec TDI sur un temps long et l'enseignement explicite de cette procédure au service des activités mathématiques. Les dispositifs d'apprentissage fondés sur l'approche incarnée et située de la connaissance récemment expérimentés pour des enfants au développement typique

pourraient offrir une perspective intéressante pour des enfants présentant un trouble du développement intellectuel, à condition que leur développement moteur soit soutenu dans le cadre de ces mêmes dispositifs et que le temps accordé au développement des habiletés motrices soit adapté aux besoins et au rythme d'apprentissage de ces élèves. Les résultats obtenus engagent aussi une réflexion sur la relation entre imagerie motrice mentale, capacité d'imitation motrice et capacité à recourir aux doigts de façon efficiente en mathématiques. Les données développementales relatives à cette composante de la motricité qu'est l'imagerie mentale motrice sont relativement rares, des études devront être menées auprès de population typique et atypique pour caractériser le rôle de cette composante pour le développement moteur.

10.4. Contribuer à structurer la place de la psychologie dans le champ des recherches en éducation : le rôle des recherches participatives

Les recherches en éducation peuvent s'inscrire dans différents champs disciplinaires comme la philosophie, la sociologie, les sciences de l'éducation, la didactique ou encore la psychologie. Les travaux menés dans ces différents champs renvoient le plus souvent à des recherches qui portent « sur » les pratiques enseignantes tandis que les recherches collaboratives au sens de Bednarz (2015) renvoient aux recherches qui sont menées « avec » les enseignants. Au Québec, Bednarz (2015) décrit l'émergence d'un courant de recherche collaborative qui s'est développé dans le champ de l'éducation depuis les années 90 et qui positionne les enseignants comme des praticiens chercheurs. L'auteur précise que le terme générique de recherche participative renvoie à tout type de recherche qui implique une interaction entre chercheurs et enseignants. A l'intérieur de ces recherches participatives, Bednarz distingue les recherches actions, les recherches collaboratives ou encore les recherches formations ; tout type de recherche pour lequel les praticiens sont mobilisés à un moment ou un autre du processus. Dans le cas des recherches collaboratives, les enseignants sont considérés comme ayant des compétences différentes mais complémentaires des chercheurs. La visée principale de la recherche collaborative est une meilleure compréhension des processus à l'œuvre dans l'enseignement. A la différence des recherches collaboratives, les recherches actions ont une visée de transformation de la pratique, elles impliquent les enseignants à chaque étape de la recherche depuis l'énonciation de la problématique jusqu'au processus de communication et de publication des résultats. Les recherches formations ont-elles une visée formative, ce qui n'est pas nécessairement le cas des recherches actions et collaboratives. Les acceptions des termes « collaboration » et « coopération » ne sont pas cependant pas universelles. L'économiste Eloi

Laurent (2018) définit la coopération comme « la capacité d’agir ensemble en vue de résoudre nos problèmes et de réaliser nos désirs » (Laurent, 2018 ; p.10). Il souligne qu’il s’agit d’une compétence spécifiquement humaine dont le but ultime serait d’améliorer la connaissance de nous-mêmes, des autres et du monde. Elle est une quête de connaissance partagée plus qu’une simple collaboration qui ne permet que d’accomplir en commun une tâche. La coopération prend la forme d’une intelligence collective à visée créative quand la collaboration ne sert qu’à faire ensemble : « *En somme, si l’on collabore pour faire, on coopère pour savoir* » (Laurent, 2018 ; p. 16). Dans cette lignée, certains chercheurs des sciences de l’éducation ont développé en France un courant de recherche autour des ingénieries coopératives (Sensevy, 2011 ; 2020). L’ingénierie coopérative est un collectif de professeurs et de chercheurs qui travaille ensemble pour produire, c’est-à-dire créer, un dispositif d’enseignement. Le processus est itératif : une fois conçu le dispositif est mis en œuvre, puis analysé ce qui mène généralement à une transformation du dispositif etc... Ces ingénieries dans leur essence, supposent que l’on dépasse le dualisme classique opposant pratique et théorie pour « *faire œuvre commune* » (Sensevy, 2020 ; p. 250).

Dans le champ de la psychologie, Gentaz (2022) observe que les mondes de la recherche et de l’éducation sont des mondes dont les objectifs et les contraintes spécifiques peuvent faire obstacle à la coopération. S’il s’agit pour les uns de produire des connaissances validées expérimentalement et publiables dans des revues scientifiques internationales, les autres cherchent à enseigner et éduquer en intégrant aux pratiques les connaissances nouvelles issues du milieu scientifique. A ce titre, il préconise le développement de programmes de recherches interventionnelles associant praticiens et chercheurs. Il ajoute par ailleurs que la co-construction de recherches interventionnelles par des praticiens et des chercheurs constitue un très bon outil de formation initiale ou continue pour les praticiens. Ajoutons que dans une démarche interventionnelle de type coopérative, le praticien permet au chercheur de produire des connaissances sur l’efficacité des interventions proposées plutôt que d’objectiver l’efficacité de ces mêmes interventions. En effet, si en psychologie les connaissances issues de la démarche « *evidence-based practice* » apportent des éléments essentiels pour modéliser les processus d’apprentissage et pour mesurer l’efficacité statistique d’un programme d’intervention, elles ne permettent pas en revanche de transposer directement les faits établis au contexte de la classe ni de garantir un passage à grande échelle. En médecine, la démarche « *evidence-based practice* » se complète aujourd’hui le plus fréquemment d’une démarche « *practice-based evidence* » (*i.e.*, les médecins praticiens font remonter les informations qui joueront le rôle de

preuves fondées sur la pratique). La psychologie de l'éducation (*i.e.*, une psychologie dont l'objet de recherche est l'éducation) devrait pouvoir, lorsque son intention est de produire des programmes d'intervention efficaces, adopter des démarches expérimentales ou quasi-expérimentales visant à produire des recommandations de pratiques fondées sur la preuve tout en considérant lors de la conception des dispositifs eux-mêmes les preuves fondées sur la pratique (*e.g.*, intégrer des recommandations des enseignants au cours du processus de conception comme par exemple ne pas garder dans le dispositif des activités trop chronophages). Le terme « efficacité » utilisé ici n'est pas à confondre avec celui d'« efficacité », sur ce point certains chercheurs en psychologie invitent à questionner nos pratiques et le sens des mots que nous employons régulièrement en tant que chercheur : « *Dans le monde actuel, la prise en compte du seul seuil d'efficacité pour décider de proposer une intervention à grande échelle n'est plus pertinente ; la décision doit se fonder sur un seuil d'efficacité prenant en compte aussi l'ensemble des ressources impliquées, non seulement humaines et financières mais également environnementales* » (Gentaz, 2021). En effet selon Gentaz (2021), si l'on peut démontrer, avec une taille d'effet hautement significative, que le bazooka est une intervention efficace pour tuer un moustique, on peut admettre que cette intervention n'est pas efficace parce qu'elle réclame des ressources démesurées. Ces considérations contemporaines venues de chercheurs d'horizons différents m'invitent à considérer différemment les recherches auxquelles j'ai participé et me permet d'envisager autrement la posture de chercheuse que je pourrais adopter à l'avenir. Il s'agira d'inscrire mes actions de recherche futures et mes contributions dans une communauté de problèmes (Tricot, 2017) :

- En association avec des praticiens, des chercheurs en sciences de l'éducation, en ergonomie, en didactique et en psychologie, répondre à un appel à manifestation d'intérêt « innover dans la forme scolaire ». Il s'agira d'axer mes actions i) sur la conception d'ingénieries coopératives et sur l'évaluation des dispositifs conçus ii) sur la production de ressources utiles, utilisables et acceptables à destination des enseignants (Tricot et al., 2003).

- i) Du point de vue des connaissances scientifiques à produire, je souhaite poursuivre les investigations sur le rôle des doigts pour l'entrée dans le calcul chez les élèves en situation de handicap en associant la démarche fondée sur la preuve (*i.e.*, un design quasi-expérimental de type pré-test, intervention, post-test) à la méthodologie des ingénieries coopératives. Cette démarche me

permettrait d'allier à la puissance de la démarche quasi-expérimentale, la pertinence de la contextualisation des pratiques enseignantes.

- ii) Du point de vue de la production de ressources destinées aux enseignants, la notion de ressource utile, utilisable et acceptable développée par Tricot (2003) pour les environnements informatiques offre un cadre d'analyse particulièrement intéressant pour tout type de ressources à destination des enseignants. Cette triade et notamment la notion d'acceptabilité renvoie il me semble à la notion d'efficacité évoquée précédemment. La psychologie de l'éducation peut contribuer à produire des ressources utiles intégrant des connaissances scientifiques sur les pratiques efficaces (qu'elles soient textuelles ou numériques) mais elles ne serviront à rien si elles ne sont pas acceptables pour les enseignants destinataires de ces outils. L'acceptabilité d'une ressource renvoie à l'ensemble des représentations mentales qui lui sont attachées (attitude, croyance ou opinion) et notamment à celles qui portent sur son utilité et son utilisabilité (Tricot, 2003). Ce type de démarche « centrée utilisateur » existe de longue date en ergonomie, elle consiste à évaluer l'acceptabilité de l'outil ou de la ressource avant même le début de sa conception et de poursuivre la démarche de façon itérative tout au long du processus de conception. C'est la démarche que nous utilisons par exemple dans le projet KALIGO+. Cette démarche n'est pas toujours simple pour le chercheur qui peut avoir à négocier avec les praticiens à propos de certaines caractéristiques de l'outil. Dans le cadre du projet UDMEX, le collectif coopère actuellement pour formaliser les ressources produites (séquence, séances, vidéos d'activité) en cherchant à les rendre utiles, utilisables et acceptables. La poursuite de ce travail pourrait consister à mettre cette formalisation à l'épreuve en proposant à des enseignants de classe de cycle 1 en France et au Québec (dans le cadre d'un partenariat avec le consortium régional de recherche en éducation de l'université de Chicoutimi) de rechercher d'utiliser les ressources produites dans leur contexte professionnel et de les évaluer (à partir de questionnaires).

En conclusion, je mesure le chemin parcouru, du point de vue de mes conceptions entre mes débuts de chercheuses et ce que je m'autorise à être et à faire aujourd'hui. A mes débuts, j'essayais d'imposer des démarches quasi-expérimentales ou des préconisations issues de démarches quasi-expérimentales à des enseignants qui soit les appliquaient (généralement pour

me faire plaisir) soit les rejetaient. Aujourd'hui je vise la coopération, définie comme une intelligence collective pour faire œuvre commune, entre les praticiens et les chercheurs afin de participer à l'émergence d'une communauté de problèmes terme que Tricot (2017) préfère à celui de communauté de pratiques. Mes nouvelles fonctions de directrice adjointe à la recherche de l'INSPÉ m'invitent aussi à envisager des espaces de dialogue entre les praticiens et les chercheurs en Education. Dans le cadre d'une convention cadre recherche qui vient d'être signée conjointement par l'académie, l'université de Bretagne Occidentale et l'INSPÉ de Bretagne je pilote la conception d'une plateforme numérique dont les objectifs seront de faciliter la rencontre entre des praticiens (des établissements, des circonscriptions...) animés par des questions de recherche et des chercheurs dans le champ de l'éducation ; de faciliter l'accès au terrain de recherche ou à des données de recherche pour les chercheurs ; de donner à voir l'existant du point de vue des recherches participatives menées sur le territoire breton afin que les productions de ces expérimentations menées in situ soient une ressource pour la formation initiale et continue. Il s'agira aussi dans le cadre des nouvelles écoles académiques de formation qui doit être mises en place en 2023 de penser et de promouvoir la place des recherches en éducation pour la formation continue des enseignants.

11. Conclusion générale

Le parcours de recherche décrit dans ce document est celui d'une enseignante-chercheuse qui souhaite apporter sa contribution à la réduction des inégalités scolaires et œuvrer pour la réussite de tous. Il s'agit à travers les apports récents de la psychologie et des neurosciences de questionner la forme scolaire actuelle et de contribuer à rendre accessibles certains apprentissages. De façon intuitive, mes premières recherches après la thèse de doctorat se sont attachées à décrire le contexte de scolarisation des enfants français pour mieux comprendre certaines difficultés d'apprentissage. Je comprends rétrospectivement que je visais à agir sur les occasions d'action qui sont offertes aux enfants de développer certaines habiletés ou d'apprendre certains savoirs. La formation des enseignants me permet effectivement en leur présentant ces analyses de questionner leurs représentations et leurs pratiques. Progressivement, grâce à l'émergence d'une approche incarnée et située de la connaissance, je me suis interrogée sur le rôle de la motricité comme contrainte ou potentialité pour l'acquisition des savoirs fondamentaux (lire, écrire, compter et calculer) en milieu scolaire. Mes collaborations avec certains chercheurs comme Éric Jamet ou Florence Bara m'ont conduit à investir les recherches interventionnelles en cherchant à démontrer l'efficacité des dispositifs d'enseignement. Grâce

à de nouvelles fonctions de directrice adjointe de l'INSPÉ en charge de la recherche et à la lecture stimulante de plusieurs chercheurs (en particulier Edouard Gentaz et André Tricot en Psychologie, ou encore Gérard Sensevy en Sciences de l'éducation), j'ai questionné mes propres représentations et pratiques de la recherche. Il s'agit pour moi aujourd'hui de chercher à évaluer non pas l'efficacité mais l'efficience des dispositifs et des ressources conçus, d'intégrer la dimension située de la cognition. L'idée portée par le mouvement de la cognition incarnée et située que toute connaissance est située dans une activité (qui peut être motrice) liée aux contextes culturels, sociaux et physiques prend sens pour moi aujourd'hui et m'engage à envisager sous un jour nouveau le bénéfice des recherches coopératives avec les praticiens de l'éducation pour contribuer à faire évoluer une forme scolaire qui ne tient que très peu compte des opportunités offertes par nos actions motrices dans le processus d'apprentissage.

Références

- Abdelhaleem, N., el Wahab, M. S. A., & Elshennawy, S. (2022). Effect of virtual reality on motor coordination in children with cerebral palsy : a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *Egyptian Journal of Medical Human Genetics*, 23(1). <https://doi.org/10.1186/s43042-022-00258-0>
- Adams, J. A. (1971). A Closed-Loop Theory of Motor Learning. *Journal of Motor Behavior*, 3(2), 111-150. <https://doi.org/10.1080/00222895.1971.10734898>
- Alamargot, D. (2007). Développement de la mémoire : impact sur l'apprentissage de la production écrite. *Entretiens d'orthophonie Bichat*, 210-228.
- Alamargot, D., & Morin, M. F. (2015). Does handwriting on a tablet screen affect students' graphomotor execution ? A comparison between Grades Two and Nine. *Human Movement Science*, 44, 32-41. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2015.08.011>
- Alamargot, D., Plane, S., Lambert, E., & Chesnet, D. (2009). Using eye and pen movements to trace the development of writing expertise : case studies of a 7th, 9th and 12th grader, graduate student, and professional writer. *Reading and Writing*, 23(7), 853-888. <https://doi.org/10.1007/s11145-009-9191-9>

- Amadiou F., & Tricot, A. (2014). Apprendre avec le numérique. Retz.
<https://doi.org/10.14375/np.9782725633206>
- Amigues R. & Zerbato-Poudou M.T. (2009). *Comment l'enfant devient élève : les apprentissages à l'école maternelle*. Retz.
- Anderson, M. L., & Penner-Wilger, M. (2012). Neural reuse in the evolution and development of the brain : Evidence for developmental homology ? *Developmental Psychobiology*, 55(1), 42-51. <https://doi.org/10.1002/dev.21055>
- Andres, M., Michaux, N., & Pesenti, M. (2012). Common substrate for mental arithmetic and finger representation in the parietal cortex. *NeuroImage*, 62, 1520–1528.
<https://dx.doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.05.047>
- Annett, M., Hudson, P. T. W., & Turner, A. (1974). The reliability of differences between the hands in motor skill. *Neuropsychologia*, 12(4), 527–531. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(74\)90083-9](https://doi.org/10.1016/0028-3932(74)90083-9)
- Arra, C. T., & Aaron, P. (2001). Effects of psycholinguistic instruction on spelling performance. *Psychology in the Schools*, 38(4), 357-363. <https://doi.org/10.1002/pits.1024>
- Asakawa, A., Murakami, T., & Sugimura, S. (2017). Effect of fine motor skills training on arithmetical ability in children. *European Journal of Developmental Psychology*, 16(3), 290-301. <https://doi.org/10.1080/17405629.2017.1385454>
- Asakawa, A., & Sugimura, S. (2011). The specific relationship between numerical abilities and finger dexterity in early childhood. *Japanese Journal of Developmental Psychology*, 22, 130–139.
- Asakawa, A., & Sugimura, S. (2014). Developmental trajectory in the relationship between calculation skill and finger dexterity : A longitudinal study. *Japanese Psychological Research*, 56(2), 189-200. <https://doi.org/10.1111/jpr.12041>

- Ashcraft, M. H. & Krause, J. A. (2007, avril). Working memory, math performance, and math anxiety. *Psychonomic Bulletin & Review*, 14(2), 243-248.
<https://doi.org/10.3758/bf03194059>
- Assaiante, C. (2011). Action et représentation de l'action au cours de l'enfance et de l'adolescence : une approche fonctionnelle. *Science & Motricité*, 74, 65-79.
<https://doi.org/10.1051/sm/20111114>
- Babcock, M. K., & Freyd, J. J. (1988). Perception of Dynamic Information in Static Handwritten Forms. *The American Journal of Psychology*, 101(1), 111.
<https://doi.org/10.2307/1422797>
- Baldy, R. (2005). Dessin et développement cognitif. *Enfance*, 57, 34-44.
<https://doi.org/10.3917/enf.571.0034>
- Bara, F., & Bonneton-Botté, N. (2021). Handwriting isolated cursive letters in young children: Effect of the visual trace deletion. *Learning & Instruction*, 74,
<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2020.101439>
- Bara, F., & Bonneton-Botté, N. (2017). Learning Letters With the Whole Body : Visuomotor Versus Visual Teaching in Kindergarten. *Perceptual and Motor Skills*, 125(1), 190-207. <https://doi.org/10.1177/0031512517742284>
- Bara, F., & Bonneton-Botté, N. (2016). Est-il nécessaire d'enseigner le sens du tracé des lettres en capitales d'imprimerie en maternelle. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant*, 27, 139.
- Bara, F., Gentaz, E., & Colé, P. (2007). Haptics in learning to read with children from low socio-economic status families. *British Journal of Developmental Psychology*, 25(4), 643-663.
<https://doi.org/10.1348/026151007x186643>
- Bara, F., Gentaz, E., Colé, P., & Sprenger-Charolles, L. (2004). The visuo-haptic and haptic exploration of letters increases the kindergarten-children's understanding of the

- alphabetic principle. *Cognitive Development*, 19(3), 433-449.
<https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2004.05.003>
- Bara, F., Morin, M. F., Alamargot, D., & Bosse, M. L. (2016). Learning different allographs through handwriting : The impact on letter knowledge and reading acquisition. *Learning and Individual Differences*, 45, 88-94. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2015.11.020>
- Bara, F., Morin, M. F., Montésinos-Gelet, I., & Lavoie, N. (2011). Conceptions et pratiques en graphomotricité chez des enseignants de primaire en France et au Québec. *Revue française de pédagogie*, 176, 41-56. <https://doi.org/10.4000/rfp.3154>
- Bara, F., & Tricot, A. (2017). Le rôle du corps dans les apprentissages symboliques : apports des théories de la cognition incarnée et de la charge cognitive. *Recherches sur la Philosophie et le Langage*, 33, 219-249.
- Baraud, M., Bril, B., & Acioly-Régner, N. (2018). Pratiques enseignantes pour l'apprentissage de l'écriture en grande section de maternelle et au cours préparatoire en France. *Éducation et didactique*, 12-2, 73-88. <https://doi.org/10.4000/educationdidactique.3312>
- Baroody, A. J. (1999). Children's Relational Knowledge of Addition and Subtraction. *Cognition and Instruction*, 17(2), 137-175. <https://doi.org/10.1207/s1532690xci170201>
- Barsalou, L. W. (1999). Perceptual symbol systems. *Behavioral and Brain Sciences*, 22(4), 577-660. <https://doi.org/10.1017/s0140525x99002149>
- Barsalou, L. W. (2008). Grounded Cognition. *Annual Review of Psychology*, 59(1), 617-645. <https://doi:10.1146/annurev.psych.59.103006.093639>
- Bartolomeo, P., Bachoud-Lévi, A. C., Chokron, S., & Degos, J. D. (2002). Visually- and motor-based knowledge of letters : evidence from a pure alexic patient. *Neuropsychologia*, 40(8), 1363-1371. [https://doi.org/10.1016/s0028-3932\(01\)00209-3](https://doi.org/10.1016/s0028-3932(01)00209-3)
- Bates, D., Maechler, M., Bolker, B., & Walker, S. (2015). Fitting linear mixed-effects models using lme4. *Journal of Statistical Software*, 67(1), 1-48. <https://doi.org/10.18637/jss.v067.i01>.

- Bednarz, N., Rinaudo, J. L., & Roditi, R. (2015). La recherche collaborative. *Carrefours de l'éducation*, n° 39(1), 171-184. <https://doi.org/10.3917/cdle.039.0171>
- Bender, A., & Beller, S. (2012). Nature and culture of finger counting: diversity and representational effects of an embodied cognitive tool. *Cognition*, 124(2), 156–182. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.05.005>
- Berninger, V. W., Vaughan, K., Abbott, R. D., Begay, K., Coleman, K. B., Curtin, G., Hawkins, J. M., & Graham, S. (2002). Teaching spelling and composition alone and together : Implications for the simple view of writing. *Journal of Educational Psychology*, 94(2), 291-304. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.94.2.291>
- Berninger, V. W., Nagy, W., Tanimoto, S., Thompson, R., & Abbott, R. D. (2015). Computer instruction in handwriting, spelling, and composing for students with specific learning disabilities in grades 4–9. *Computers & ; Education*, 81, 154-168. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2014.10.005>
- Berninger, V. W., Vaughan, K., Abbott, R. D., Begay, K., Coleman, K. B., Curtin, G., Hawkins, J. M., & Graham, S. (2002b). Teaching spelling and composition alone and together : Implications for the simple view of writing. *Journal of Educational Psychology*, 94(2), 291-304. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.94.2.291>
- Bernstein NA (1996) Resources for ecological psychology. Dexterity and its development. In: ML Latash and MT Turvey (eds), Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Bianco, M., & Bressoux, P. (2009). Effet-classe et effet-maître dans l'enseignement primaire : vers un enseignement efficace de la compréhension. *L'efficacité dans l'enseignement : Promesses et zones d'ombre*, 35-54.
- Bidet-Ildei, C., Méary, D., & Orliaguet, J. P. (2006). Visual Perception of Elliptic movements in 7- to-11-year-old children : Influence of Motor Rules. *Current psychology letters*, 19, Vol. 2, 2006. <https://doi.org/10.4000/cpl.1071>

- Bidet-Ildei, C., Orliaguet, J. P., & Coello, Y. (2011). Rôle des représentations motrices dans la perception visuelle des mouvements humains. *L'Année psychologique*, *111*(02), 409. <https://doi.org/10.4074/s0003503311002065>
- Blondis, T. A., Snow, J. H., Roizen, N. J., Opacich, K. J., & Accardo, P. (1994). Early Maturation of Motor-Delayed Children at School Age. *Pediatric Physical Therapy*, *6*(4), 220. [Hpps://doi:10.1097/00001577-199400640-00020](https://doi.org/10.1097/00001577-199400640-00020)
- Boissiere J., Fau S., & Pedro F. (2013). *Le numérique une chance pour l'école*. Armand Colin
- Bonneton-Botté, N., Bara, F., Marec-Breton, N., De La Haye-Nicolas, F., & Gonthier, C. (2018). Perception of the cursive handwriting movement in writers and pre-writers. *Reading and Writing*, *31*(4), 927–943. [https://doi:10.1007/s11145-018-9819-8](https://doi.org/10.1007/s11145-018-9819-8)
- Bonneton-Botte, N., Beucher-Marsal, C., Bara, F., Muller, J., Corf, L. L., Quéméneur, M., & Dare, M. (2019). Teaching cursive handwriting : A contribution to the acceptability study of using digital tablets in French classrooms. *Journal of Early Childhood Literacy*, *21*(2), 259-282. <https://doi.org/10.1177/1468798419838587>.
- Bonneton-Botté, N. & De La Haye, F. (2009). Apprentissage de l'écriture manuscrite : des difficultés perçues par les enseignants aux difficultés des élèves. Dans Marec-Breton, N., Besse A.S., De La Haye F., Bonneton N. & Bonjour E. (eds.) Apprentissage de la langue écrite : approche cognitive. Rennes : Presses Universitaires de France.
- Bonneton-Botté, N., de la Haye, F., Marec-Breton, N., & Bara, F. (2012). Détection et identification d'une caractéristique du mouvement d'écriture manuscrite chez des l'enfant. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, *66*(3), 164-171. <https://doi.org/10.1037/a0028369>
- Bonneton-Botté, N., Hili, H., de la Haye, F., & Noël, Y. (2015). Dessin de la main et habiletés numériques chez des enfants d'âge préscolaire. *Canadian Journal of Behavioural Science / Revue canadienne des sciences du comportement*, *47*(3), 207-215. <https://doi.org/10.1037/a0039037>

- Bonneton-Botté, N., Girard, N., Rogard, S. Anquetil, & E., Jamet E. (2021) La dictée sur tablette, une étude exploratoire. Colloque SFERE Provence. Apprentissages, stratégies et politiques éducatives. Marseille, 30 et 31 Mars 2021.
- Bonneton-Botté, N., Guilbert, J., & Bara, F. (2019). L'écriture manuscrite : un apprentissage moteur spécifique. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'enfant*, 163, 722-729.
- Bonneton-Botté, N., Ollivier, F., Hili, H., & Bara, F. (2022). Evaluation des bénéfices d'un dispositif d'entraînement à l'usage des doigts en mathématiques. *Canadian Journal of School Psychology*, 37(3), 289-303. <https://doi.org/10.1177/08295735221081960>
- Bosse, M. L., & Pacton, S. (2006). Comment l'enfant produit-il l'orthographe des mots? Philippe Dessus & Edouard Gentaz. Apprendre et enseigner à l'école, Dunod, pp.43-58, 2006. hal-00826018.
- Bourdeaud, M. J. (2017). *Tentative de rééducation de l'écriture cursive chez des enfants atteints de déficience intellectuelle*. (Mémoire : Psychomotricité). Université Paul Sabatier, Toulouse. Repéré à <http://www.psychomot.ups-tlse.fr/Bourdeaud2017.pdf>
- Bourdin, B., Cogis, D., & Foulin, J. N. (2010). Influence des traitements graphomoteurs et orthographiques sur la production de textes écrits : perspective pluridisciplinaire. *Langages*, n° 177(1), 57-82. <https://doi.org/10.3917/lang.177.0057>
- Brankaer, C., Ghesquière, P., & De Smedt, B. (2011). Numerical magnitude processing in children with mild intellectual disabilities. *Research in Developmental Disabilities*, 32(6), 2853–2859. <https://doi:10.1016/j.ridd.2011.05.020>
- Bray N.W, Huffman I, Grupe I. (1998). Un cadre conceptuel pour l'étude des déficiences et des compétences de mémorisation chez les enfants présentant un retard mental. In: Büchel, F, Paour, JL, Courbois, Y, Scharnhorst, U, editors. Attention, mémoire, apprentissage. Études sur le retard mental. Lucerne:Ed SPC.
- Bril, B. (2000). La genèse des premiers pas. In J. Rivière (Ed.). *Le développement psychomoteur du jeune enfant*, 53-85. Marseille : Solal Editeur.

- Bril, B. (2002). Apprentissage et contexte. *Intellectica. Revue de l'Association pour la Recherche Cognitive*, 35(2), 251-268. <https://doi.org/10.3406/intel.2002.1669>
- Bril, B. (2012). Culture et portage de l'enfant. In *Des bébés bien portés* (pp. 127-140). Érès.
- Bril, B., & Lehalle, H. (1996). *Le développement psychologique est-il universel ?* FeniXX.
- Brissiaud, R. (2013). *Apprendre à calculer à l'école : les pièges à éviter en contexte francophone*. Retz.
- Brumbl, H. (1972). Age Changes in Preference and Skill Measures of Handedness. *Perceptual and Motor Skills*, 34(1), 3-14. <https://doi.org/10.2466/pms.1972.34.1.3>
- Brunet, O., & Lézine, I. (2001). Brunet-Lezine psychomotor development test. *ECPA, Paris*.
- Brun-Henin, F., Velay, J. L., Beecham, Y., & Cariou, S. (2013). Troubles d'écriture et dyslexie : revue théorique, aspects cliniques et approche expérimentale. *Développements*, n° 13(4), 4-28. <https://doi.org/10.3917/devel.013.0004>
- Bullinger, A. (2003). Place et rôle de l'équilibre sensoritonique chez l'enfant d'âge scolaire. *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*, 51(6), 299-302. [https://doi.org/10.1016/s0222-9617\(03\)00076-x](https://doi.org/10.1016/s0222-9617(03)00076-x)
- Bullinger, A. (2013). *Le développement sensori-moteur de l'enfant et ses avatars*. Érès.
- Buntix, W., Cans, C., Colleaux, L., Courbois, Y., Debbané, M., Desportes, V., ... & Plaisance, E. (2016). Les déficiences intellectuelles.
- Burnett, C. (2010). Technology and literacy in early childhood educational settings : A review of research. *Journal of Early Childhood Literacy*, 10(3), 247-270. <https://doi.org/10.1177/1468798410372154>
- Butterworth, B. (1999). *The mathematical brain*. London : Mac Millan.
- Butterworth, B. (2005). The development of arithmetical abilities. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 46(1), 3-18. <https://doi:10.1111/j.1469-7610.2004.00374.x>
- Calvo-Merino, B., Grèzes, J., Glaser, D. E., Passingham, R. E., & Haggard, P. (2006). Seeing or Doing ? Influence of Visual and Motor Familiarity in Action Observation. *Current Biology*, 16(19), 1905-1910. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2006.07.065>

- 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. <https://doi:10.1111/cdep.12168>
- Caramia, S., Gill, A., Ohl, A., & Schelly, D. (2020). Fine Motor Activities in Elementary School Children: A Replication Study. *American Journal of Occupational Therapy, 74*(2), 7402345010p1. <https://doi:10.5014/ajot.2020.035014>
- Carbonneau, K. J., Marley, S. C., & Selig, J. P. (2013). A meta-analysis of the efficacy of teaching mathematics with concrete manipulatives. *Journal of Educational Psychology, 105*(2), 380-400. <https://doi.org/10.1037/a0031084>
- Carpenter, T. P., & Moser, J. M. (1984). The Acquisition of Addition and Subtraction Concepts in Grades One through Three. *Journal for Research in Mathematics Education, 15*(3), 179-202. <https://doi.org/10.5951/jresematheduc.15.3.0179>
- 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*, 514–533. <https://doi:10.1080/00221325.2012.717122>
- Charles, M., Soppelsa, R., & Albaret, J. M. (2004). BHK: échelle d'évaluation rapide de l'écriture chez l'enfant. ECPA.
- Chartrel, E., & Vinter, A. (2008). The impact of spatio-temporal constraints on cursive letter handwriting in children. *Learning and Instruction, 18*(6), 537–547. <https://doi:10.1016/j.learninstruc.2007.11.003>
- Chickering, A. W., & Ehrmann, S. C. (1996). Implementing the seven principles: Technology as lever. *AAHE Bulletin, 49*, 3-6
- 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. <https://doi.org/10.1177/0741088312451109>
- Cook, T. D., Campbell, D. T., & Day, A. (1979). *Quasi-experimentation: Design & analysis issues for field settings* (Vol. 351). Boston: Houghton Mifflin.

- Cooper, L. A., & Shepard, R. N. (1975). Mental transformation in the identification of left and right hands. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 1(1), 48-56. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.1.1.48>
- Courbois, Y. et Paour J.L. (2007). Le retard mental. In: Ionescu, S, Blanchet, A, editors. *Psychologie du développement et de l'éducation*. (377- 406). Paris : Presses Universitaires de France.
- Cratty, B. J. (1979). *Perceptual and motor development in infants and children*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall.
- Daigle, D., Ammar, A. et Montésinos-Gelet, I. (2013). *Compétence orthographique et dysorthographie : rôles des procédures explicites*. Rapport de recherche adressé au FRQ-SC (2010-ER-136836), Université de Montréal, Québec, Canada.
- Danna, J., & Velay, J. L. (2015). Basic and supplementary sensory feedback in handwriting. *Frontiers in Psychology*, 6. <https://doi:10.3389/fpsyg.2015.00169>.
- Danna, J., & Velay, J. L. (2017). On the Auditory-Proprioception Substitution Hypothesis : Movement Sonification in Two Deafferented Subjects Learning to Write New Characters. *Frontiers in Neuroscience*, 11. <https://doi.org/10.3389/fnins.2017.00137>
- 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. <https://doi.org/10.1037/0708-5591.49.2.118>
- Decety, J., Sjöholm, H., Ryding, E., Stenberg, G., & Ingvar, D. H. (1990). The cerebellum participates in mental activity : tomographic measurements of regional cerebral blood flow. *Brain Research*, 535(2), 313-317. [https://doi.org/10.1016/0006-8993\(90\)91615-n](https://doi.org/10.1016/0006-8993(90)91615-n)

- Decety, J., (1999). Se représenter agir : de l'équivalence fonctionnelle entre imaginer une action, la réaliser ou l'observer, *évolutions psychomotrices*, 11, (43), 3-18.
- Dehaene S., Piazza M., Pinel P., & Cohen L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20, 487-506. <https://doi:10.1080/02643290244000239>.
- Dehaene, S., Tzourio, N., Frak, V., Raynaud, L., Cohen, L., Mehler, J., & Mazoyer, B. (1996). Cerebral activations during number multiplication and comparison : a PET study. *Neuropsychologia*, 34(11), 1097-1106. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(96\)00027-9](https://doi.org/10.1016/0028-3932(96)00027-9)
- Di Luca, S., & Pesenti, M. (2011). Finger numeral representations: more than just another symbolic code. *Frontiers in Psychology*, 2, 272. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00272>.
- Diamond, A. (2000). Close Interrelation of Motor Development and Cognitive Development and of the Cerebellum and Prefrontal Cortex. *Child Development*, 71(1), 44–56. <https://doi:10.1111/1467-8624.00117>
- Doabler, C. T., Baker, S. K., Kosty, D. B., Smolkowski, K., Clarke, B., Miller, S. J., & Fien, H. (2015). Examining the Association between Explicit Mathematics Instruction and Student Mathematics Achievement. *The Elementary School Journal*, 115(3), 303-333. <https://doi.org/10.1086/679969>
- Dragemark Oscarson, A. (2009). Collaboration in understanding results – Self-assessment of EFL Writing. (n.d.). *Collaboration in Language Testing and Assessment*. <https://doi:10.3726/978-3-653-01526-3/15>.
- Dupont-Boime, J., & Thevenot, C. (2018). High working memory capacity favours the use of finger counting in six-year-old children. *Journal of Cognitive Psychology*, 30(1), 35–42. <https://doi.org/10.1080/20445911.2017.1396990>

- Ebersold, S. (2020). Pratiques inclusives, approche polycentrée et accessibilité. *Revista Educação Especial*, 33, 64-1.
- Erhardt, R. P., & Meade, V. (2005). Improving handwriting without teaching handwriting : The consultative clinical reasoning process. *Australian Occupational Therapy Journal*, 52(3), 199-210. <https://doi.org/10.1111/j.1440-1630.2005.00505.x>
- Erickson, K. I., Hillman, C. H., & Kramer, A. F. (2015). Physical activity, brain, and cognition. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 4, 27-32. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2015.01.005>
- Fagard, J. (2000). Le développement des habiletés manuelles. In J. Rivière (Ed.). *Le développement psychomoteur du jeune enfant* (pp. 109-150). Marseille : Solal Editeur.
- Fagard, J., Hardy-Léger, I., Kervella, C., & Marks, A. (2001). Changes in Interhemispheric Transfer Rate and the Development of Bimanual Coordination during Childhood. *Journal of Experimental Child Psychology*, 80(1), 1-22. <https://doi.org/10.1006/jecp.2000.2623>
- Fagard, J., Morioka, M., & Wolff, P. H. (1985). Early stages in the acquisition of a bimanual motor skill. *Neuropsychologia*, 23(4), 535-543. [https://doi:10.1016/0028-3932\(85\)90007-7](https://doi:10.1016/0028-3932(85)90007-7)
- Fastame, M. C. (2020). The contribution of motor functions to academic achievement in primary school: State of the art and future directions. *School Psychology International*, 41(6), 522-542. <https://doi:10.1177/0143034320954494>.
- Fayol, M. (2007). Les enseignants sont des experts, *Sciences Humaines*, n°180-S, p. 24-26.
- Fayol, M. (2022). *L'acquisition du nombre*. Que sais-je.

- Fayol, M., Grimaud, F., & Jacquier, M. (2013). Une expérience d'enseignement explicite de l'orthographe lexicale: Apprendre... oui mais comment? Des laboratoires aux salles de classes. *ANAE. Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant*, (123), 156-163.
- Fayol, M., & Miret, A. (2005). Écrire, orthographier et rédiger des textes. *Psychologie Française*, 50(3), 391-402. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2005.05.008>
- Ferriere, S., Cottier, P., Lacroix, F., Lainé, A., & Pulido, L. (2013). Dissémination de tablettes tactiles en primaire et discours des enseignants : entre rejet et adoption. *Sciences et Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Éducation et la Formation*, 20(1), 153-176. <https://doi.org/10.3406/stice.2013.1063>
- Fischer, J. P. (2010). Numerical performance increased by finger training: a fallacy due to regression toward the mean? *Cortex*, 46(2), 272–273. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2008.06.010>.
- Fischer, U., Suggate, S. P., & Stoeger, H. (2020). The Implicit Contribution of Fine Motor Skills to Mathematical Insight in Early Childhood. *Frontiers in Psychology*, 11. <https://doi:10.3389/fpsyg.2020.01143>
- Fleishman, E. A., & Rich, S. (1963). Role of kinesthetic and spatial-visual abilities in perceptual-motor learning. *Journal of Experimental Psychology*, 66(1), 6–11. <https://doi:10.1037/h0046677>
- Flewitt, R., Messer, D., & Kucirkova, N. (2014). New directions for early literacy in a digital age : The iPad. *Journal of Early Childhood Literacy*, 15(3), 289-310. <https://doi.org/10.1177/1468798414533560>
- Flores D'Arcaïs, G. B. (1994). Order of strokes writing as a cue for retrieval in reading Chinese characters. *European Journal of Cognitive Psychology*, 6(4), 337-355. <https://doi.org/10.1080/09541449408406519>

- Foulin, J. N. (1995). Pauses et débits : les indicateurs temporels de la production écrite. *L'année psychologique*, 95(3), 483-504. <https://doi.org/10.3406/psy.1995.28844>
- Fuchs, L. S., Fuchs, D., Craddock, C., Hollenbeck, K. N., Hamlett, C. L., & Schatschneider, C. (2008). Effects of small-group tutoring with and without validated classroom instruction on at-risk students' math problem solving : Are two tiers of prevention better than one ? *Journal of Educational Psychology*, 100(3), 491-509. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.100.3.491>
- Funk, M., Brugger, P., & Wilkening, F. (2005). Motor processes in children's imagery: The case of mental rotation of hands. *Developmental Science*, 8(5), 402-408. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2005.00428.x>
- Fuson, K. C. (1998). Pedagogical, mathematical, and real-world conceptual-support nets: a model for building children's multidigit domain knowledge. *Mathematical Cognition*, 4(2), 147–186. <https://doi.org/10.1080/135467998387370>
- Gallistel, C. R., & Gelman, R. (1992). Preverbal and verbal counting and computation. *Cognition*, 44(1-2), 43–74. [https://doi:10.1016/0010-0277\(92\)90050-r](https://doi:10.1016/0010-0277(92)90050-r)
- Garrote, A., Moser Opitz, E., & Ratz, C. (2015). Mathematische Kompetenzen von Schülerinnen und Schülern mit dem Förderschwerpunkt geistige Entwicklung. Eine Querschnittstudie. *Empirische Sonderpädagogik*, 7(1), 24-40.
- Geary, D. C. (2004). Mathematics and Learning Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 37(1), 4–15. <https://doi:10.1177/00222194040370010201>
- Geary, D. C. (2007). An Evolutionary Perspective on Learning Disability in Mathematics. *Developmental Neuropsychology*, 32(1), 471–519. <https://doi:10.1080/87565640701360924>

- Gertsman, J. (1940). Syndrome of finger agnosia, disorientation for right and left, agraphia and acalculia. *Archives of Neurology and Psychiatry*, 44, 398-408.
<https://doi.org/10.1001/archneurpsyc.1940.02280080158009>.
- Gentaz, E. (2022). Comment favoriser les interactions vertueuses entre le monde de la recherche et le monde de l'éducation en France : trois propositions. Edito : *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'enfant*, 177.
- Gentaz, E. (2021). Que peuvent nous apprendre les recherches sur l'évolution de la démarche de la médecine fondée sur des preuves (Evidence-Based Medicine - EBM) ? Edito : *Approches Neuropsychologiques des apprentissages chez l'enfant*, 166.
- Gentaz, E. (2018). *La main, le cerveau et le toucher. Approches multisensorielles et Nouvelles technologies*. Malakoff : Dunod.
- Gentaz, E., Bara, F., Palluel-Germain, R., Pinet L., & Hillairet de Boisferon, A. (2009). Apports de la modalité haptique manuelle dans les premiers apprentissages scolaires. *In Cognito-Cahiers Romains de Sciences Cognitives*, 3(3), 1-38.
- Gerth, S., Dolk, T., Klassert, A., Fliesser, M., Fischer, M. H., Nottbusch, G., & Festman, J. (2016). Adapting to the surface: A comparison of handwriting measures when writing on a tablet computer and on paper. *Human Movement Science*, 48, 62-73
<https://doi.org/10.1016/j.humov.2016.04.006>
- Gesell, A. (1933). Maturation and the patterning of behavior.
- Gibson, J. J. (1979). The theory of affordances. *The people, place, and space reader*, 56-60.

- Gimbert, F., & Mazens, K. (2021). Quelles relations entre le laboratoire et la salle de classe? L'exemple de l'apprentissage du nombre chez les jeunes enfants. *Raisons éducatives*, (1), 195-214.
- Goodnow, J., Friedman, S. L., Bernbaum, M., & Lehman, E. B. (1973). Direction and Sequence in Copying. *Journal of Cross-Cultural Psychology*, 4(3), 263-282. <https://doi.org/10.1177/002202217300400301>
- Goodnow, J. J., & Levine, R. A. (1973). "The grammar of action" : Sequence and syntax in children's copying. *Cognitive Psychology*, 4(1), 82-98. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(73\)90005-4](https://doi.org/10.1016/0010-0285(73)90005-4)
- Goodway, J. D., Crowe, H., & Ward, P. (2003). Effects of Motor Skill Instruction on Fundamental Motor Skill Development. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 20(3), 298–314. <https://doi:10.1123/apaq.20.3.298>
- Gracia-Bafalluy, M., & Noël, M.P. (2008). Does finger training increase young children's numerical performance? *Cortex*, 44, 4, p. 368-75. <https://doi:10.1016/j.cortex.2007.08.020>
- Graham, S., Harris, K. R., Mason, L., Fink-Chorzempa, B., Moran, S., & Saddler, B. (2007). How do primary grade teachers teach handwriting? A national survey. *Reading and Writing*, 21(1-2), 49–69. <https://doi:10.1007/s11145-007-9064-z>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s11145-014-9517-0>
- Grégoire, J., Noël, M., & Van Nieuwenhoven, C. (2004). Tedi-Math. *Antwerpen: Harcourt*.
- Guedin, N., Thevenot, C., & Fayol, M. (2018). Des doigts et des nombres. *Psychologie Française*, 63(4), 379–399. <https://doi:10.1016/j.psfr.2017.07.001>

- Guinet, E., & Kandel, S. (2010). Ductus : A software package for the study of handwriting production. *Behavior Research Methods*, 42(1), 326-332. <https://doi.org/10.3758/brm.42.1.326>
- Guilbert, J., Alamargot, D., & Morin, M. F. (2019). Handwriting on a tablet screen : Role of visual and proprioceptive feedback in the control of movement by children and adults. *Human Movement Science*, 65, 30-41. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2018.09.001>
- Guilbert, J., Jouen, F., Lehalle, H., & Molina, M. (2013). Imagerie motrice interne et simulation de l'action chez l'enfant. *L'Année psychologique*, Vol. 113(3), 459-488. <https://doi.org/10.3917/anpsy.133.0459>
- Guthrie, E. R. (1935). Psychology of Learning.
- Haßler, B., Major, L., & Hennessy, S. (2015). Tablet use in schools: A critical review of the evidence for learning outcomes. *Journal of Computer Assisted Learning*, 32(2), 139–156. <https://doi:10.1111/jcal.12123>
- Hammill, D. D. (2004). What We Know about Correlates of Reading. *Exceptional Children*, 70(4), 453-469. <https://doi.org/10.1177/001440290407000405>
- Hattie, J., & Timperley, H. (2007). The power of feedback. *Review of Educational Research*, 77(1), 81–112. <https://doi:10.3102/003465430298487>
- Iverson, J. M. (2010). Developing language in a developing body : the relationship between motor development and language development. *Journal of Child Language*, 37(2), 229-261. <https://doi.org/10.1017/s0305000909990432>
- Izard, V., Sann, C., Spelke, E. S., & Streri, A. (2009). Newborn infants perceive abstract numbers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(25), 10382-10385. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812142106>

- James, K. H., & Atwood, T. P. (2009). The role of sensorimotor learning in the perception of letter-like forms : Tracking the causes of neural specialization for letters. *Cognitive Neuropsychology*, 26(1), 91-110. <https://doi.org/10.1080/02643290802425914>
- James, K. H., & Gauthier, I. (2006). Letter processing automatically recruits a sensory–motor brain network. *Neuropsychologia*, 44(14), 2937-2949. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.06.026>
- Jeannerod, M. (1994). The representing brain : Neural correlates of motor intention and imagery. *Behavioral and Brain Sciences*, 17(2), 187-202. <https://doi.org/10.1017/s0140525x00034026>
- Jeannerod, M. (2001). Neural Simulation of Action: A Unifying Mechanism for Motor Cognition. *NeuroImage*, 14(1), S103–S109. <https://doi:10.1006/nimg.2001.0832>
- Jeannerod, M., & Decety, J. (1995). Mental motor imagery: a window into the representational stages of action. *Current Opinion in Neurobiology*, 5(6), 727–732. [https://doi:10.1016/0959-4388\(95\)80099-9](https://doi:10.1016/0959-4388(95)80099-9)
- Jolly, C., & Gentaz, E. (2013). Évaluation des effets d’entraînements avec tablette tactile destinés à favoriser l’écriture de lettres cursives chez des enfants de Cours Préparatoire. *Sciences et Technologies de l’Information et de la Communication pour l’Éducation et la Formation*, 20(1), 495-512. <https://doi.org/10.3406/stice.2013.1080>
- Jordan, N. C., Kaplan, D., Ramineni, C., & Locuniak, M. N. (2008). Development of number combination skill in the early school years: when do fingers help? *Developmental Science*, 11(5), 662–668. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00715.x>
- Jordan, N. C., & Levine, S. C. (2009). Socioeconomic variation, number competence, and mathematics learning difficulties in young children. *Developmental Disabilities Research Reviews*, 15, 60–68. <https://dx.doi.org/10.1002/ddrr.46>

- Kandel, S., Hérault, L., Grosjacques, G., Lambert, E., & Fayol, M. (2009). Orthographic vs. phonologic syllables in handwriting production. *Cognition*, *110*(3), 440-444. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.12.001>
- Kandel, S., Orliaguet, J. P., & Viviani, P. (2000). Perceptual anticipation in handwriting : The role of implicit motor competence. *Perception & ; Psychophysics*, *62*(4), 706-716. <https://doi.org/10.3758/bf03206917>
- Kandel, S., & Perret, C. (2015). How does the interaction between spelling and motor processes build up during writing acquisition ? *Cognition*, *136*, 325-336. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2014.11.014>
- Karmiloff-Smith, A. (1992). *Beyond modularity: A developmental perspective in cognitive science*. Cambridge: MIT Press.
- Keele, S. W. (1968). Movement control in skilled motor performance. *Psychological Bulletin*, *70*(6, Pt.1), 387-403. <https://doi.org/10.1037/h0026739>
- Kim, H., Carlson, A. G., Curby, T. W., & Winsler, A. (2016). Relations among motor, social, and cognitive skills in pre-kindergarten children with developmental disabilities. *Research in Developmental Disabilities*, *53-54*, 43-60. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2016.01.016>
- Kluger, A. N., & De Nisi, A. (1996). The effects of feedback interventions on performance: A historical review, a meta-analysis, and a preliminary feedback intervention theory. *Psychological Bulletin*, *119*(2), 254–284. <https://doi:10.1037/0033-2909.119.2.254>
- Krauthausen, G., & Scherer, P. (2007). Inhaltsbereiche. Einführung in Die Mathematikdidaktik [Introduction to Didactics of Mathematics], 6–108. https://doi:10.1007/978-3-662-44964-6_1
- Kulhavy, R. W. (1977). Feedback in Written Instruction. *Review of Educational Research*, *47*(2), 211-232. <https://doi.org/10.3102/00346543047002211>

- Kurdek, L. A., & Sinclair, R. J. (2001). Predicting reading and mathematics achievement in fourth-grade children from kindergarten readiness scores. *Journal of Educational Psychology, 93*(3), 451. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.93.3.451>
- Labrecque, A.-M., Morin, M.-F., & Montésinos-Gelet, I. (2013). Quelle place est accordée à la composante graphomotrice de l'écriture dans les classes au début du primaire? Enquête auprès d'enseignants québécois. *Nouveaux Cahiers de La Recherche En Éducation, 16*(1), 104. <https://doi:10.7202/1025765ar>
- Labat, H., Ecalle, J., & Magnan, A. (2010). Effet d'entraînements bimodaux à la connaissance des lettres. Étude transversale chez des enfants de trois et cinq ans. *Psychologie Française, 55*(2), 113-127. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2009.12.002>
- Labat, H., Magnan, A., & Ecalle, J. (2013) Etude de l'effet d'une exploration auditive et haptique et des capacités de transfert inter-modal sur l'apprentissage des lettres auprès d'enfant porteur de trisomie 21 : Approche comparative avec un groupe d'enfants « tout-venant ». *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'enfant, 25, II*, (123), 212-218.
- Lafay, A., Thevenot, C., Castel, C., & Fayol, M. (2013). The role of fingers in number processing in young children. *Frontiers in psychology, 4*, 488. <https://doi:10.3389/fpsyg.2013.00488>
- Lakoff, G., & Núñez, R. E. (2000). *Where mathematics come from: How the embodied mind brings mathematics into being*. New York, NY: Basic Books.
- Lambert, E., & Espéret, E. (1997). Le début du langage écrit: les premières productions graphomotrices. *Arob@se, 1*(2), 1-15.
- Lankshear, C., & Knobel, M. (2003). New Technologies in Early Childhood Literacy Research : A Review of Research. *Journal of Early Childhood Literacy, 3*(1), 59-82. <https://doi.org/10.1177/14687984030031003>
- Lazlow, J.L. & Bairstow P.J. (1985). *Perceptual motor behavior: Developmental assessment and therapy*. New York: Praeder.

- Laurent, É. (2018). *L'impasse collaborative : pour une véritable économie de la coopération*. Éditions : Les liens qui libèrent.
- Lederman, S. J., & Klatzky, R. L. (1987). Hand movements : A window into haptic object recognition. *Cognitive Psychology*, *19*(3), 342-368. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(87\)90008-9](https://doi.org/10.1016/0010-0285(87)90008-9)
- Lequette, C., Pouget, G., Zorman M. (2008). Evaluation de la lecture en Fluence. Laboratoire Cogni-sciences. Université Pierre Mendès France.
- Long, I., Malone, S. A., Tolan, A., Burgoyne, K., Heron-Delaney, M., Witteveen, K., et al. (2016). The cognitive foundations of early arithmetic skills: it is counting and number judgment, but not finger gnosis, that count. *Journal of Experimental Child Psychology*, *152*, 327–334. <https://doi:10.1016/j.jecp.2016.08.005>
- Longcamp, M., Anton, J. L., Roth, M., & Velay, J. L. (2003). Visual presentation of single letters activates a premotor area involved in writing. *NeuroImage*, *19*(4), 1492-1500. [https://doi.org/10.1016/s1053-8119\(03\)00088-0](https://doi.org/10.1016/s1053-8119(03)00088-0)
- Longcamp, M., Lagarrigue, A., & Velay, J.-L. (2010). Contribution de la motricité graphique à la reconnaissance visuelle des lettres. *Psychologie Française*, *55*(2), 181–194. <https://doi:10.1016/j.psfr.2010.03.001>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2004.10.019>
- Lopez, C., & Vaivre-Douret, L. (2021). Influence of visual control on the quality of graphic gesture in children with handwriting disorders. *Scientific Reports*, *11*(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02969-7>
- Louis Dam, A., Kandel, S., & Orliaguet, J. P. (2000). Perception visuelle des mouvements humains : Anticipation visuelle et anticipation motrice. *Psychologie Française*, *45*(4),

333-342.

- Lucidi, A., & Thevenot, C. (2014). Do not count on me to imagine how I act: behavior contradicts questionnaire responses in the assessment of finger counting habits. *Behavior Research Methods*, 46(4), 1079–1087. <https://doi.org/10.3758/s13428-014-0447-1>.
- Luo, Z., Jose, P. E., Huntsinger, C. S., & Pigott, T. D. (2007). Fine motor skills and mathematics achievement in East Asian American and European American kindergartners and first graders. *British Journal of Developmental Psychology*, 25, 595–614. <https://doi.org/10.1348/026151007X185329>
- 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), 1603. <https://doi.org/10.3390/ijerph15081603>
- McKenna, C. (2012). There’s an App for That : How Two Elementary Classrooms Used iPads to Enhance Student Learning and Achievement. *Education*, 2(5), 136-142. <https://doi.org/10.5923/j.edu.20120205.05>
- Maldarelli, J. E., Kahrs, B. A., Hunt, S. C., & Lockman, J. J. (2015). Development of early handwriting : Visual-motor control during letter copying. *Developmental Psychology*, 51(7), 879-888. <https://doi.org/10.1037/a0039424>
- Marinthe, C., Fayol M., & Barrouillet, P. (2001). Gnosies digitales et développement des performances arithmétiques. In A. Van Hout, C. Meljac et JP. Fischer (eds), *Troubles du calcul et dyscalculies chez l’enfant*. Paris : Masson (239-254).
- Marquardt, C., Gentz, W., & Mai, N. (1999). Visual control of automated handwriting movements. *Experimental Brain Research*, 128(1-2), 224-228. <https://doi.org/10.1007/s002210050841>

- Martzog, P., Stoeger, H., & Suggate, S. (2019). Relations between Preschool Children's Fine Motor Skills and General Cognitive Abilities. *Journal of Cognition and Development*, 20(4), 443–465. <https://doi.org/10.1080/15248372.2019.1607862>.
- Martzog, P., & Suggate, S. P. (2019). Fine motor skills and mental imagery: Is it all in the mind? *Journal of Experimental Child Psychology*, 186, 59–72. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2019.05.002>
- Massion, J. (1994). Postural control system. *Current Opinion in Neurobiology*, 4(6), 877-887. [https://doi.org/10.1016/0959-4388\(94\)90137-6](https://doi.org/10.1016/0959-4388(94)90137-6)
- Maxwell, J., Masters, R., & Eves, F. (2003). The role of working memory in motor learning and performance. *Consciousness and Cognition*, 12(3), 376-402. [https://doi.org/10.1016/s1053-8100\(03\)00005-9](https://doi.org/10.1016/s1053-8100(03)00005-9)
- Medwell, J., Strand, S., & Wray, D. (2009). The links between handwriting and composing for Y6 children. *Cambridge Journal of Education*, 39(3), 329-344. <https://doi.org/10.1080/03057640903103728>
- Meulenbroek, R. G. J., Vinter, A., & Mounoud, P. (1993). Development of the start-rotation principle in circle production. *British Journal of Developmental Psychology*, 11(3), 307-320. <https://doi.org/10.1111/j.2044-835x.1993.tb00605.x>
- Meulenbroek, R. G. J., & van Galen, G. P. (1988). The Acquisition of Skilled Handwriting: Discontinuous Trends in Kinematic Variables. *Cognition and Action in Skilled Behaviour*, 273–281. [https://doi.org/10.1016/s0166-4115\(08\)60627-5](https://doi.org/10.1016/s0166-4115(08)60627-5)
- Ministère de l'éducation nationale (2002). Programme français d'enseignement de l'école maternelle. <http://eppee.ouvaton.org/spip.php?article66>
- Ministère de l'éducation nationale (2006). Documents d'accompagnement : le langage au cœur des apprentissages. <http://eppee.ouvaton.org/spip.php?article66>

- Ministère de l'éducation nationale (2008). Programme français d'enseignement de l'école maternelle <http://eppee.ouvaton.org/spip.php?article66>
- Ministère de l'éducation nationale (2012). Programme français d'enseignement de l'école maternelle. <http://eppee.ouvaton.org/spip.php?article66>
- Ministère de l'éducation nationale (2013). Référentiel de compétences des métiers de l'enseignement et de l'éducation
- Ministère de l'éducation nationale (2015). Programme français d'enseignement de l'école maternelle.
https://www.education.gouv.fr/bo/15/Special2/MENE1504759A.htm?cid_bo=86940
- Ministère de l'éducation nationale (2021). Programme français d'enseignement de l'école primaire. <https://www.education.gouv.fr/programmes-scolaires-41483>.
- Moeller, K., Martignon, L., Wessolowski, S., Engel, J., & Nuerk, H.-C. (2011). Effects of Finger Counting on Numerical Development ? The Opposing Views of Neurocognition and Mathematics Education. *Frontiers in Psychology*, 2. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00328>.
- Mojet, J. W. (1991). Characteristics of the developing handwriting skill in elementary education. In J. Wann, A.M. Wing & N. Sovik (Eds.), *Development of graphic skills* (pp.53-75). London: Academic Press.
- Morin, M. F., & Montésinos-Gelet, I. (2008). Effet d'un programme d'orthographe approchées en maternelle sur les performances ultérieures en lecture et en écriture d'élèves à risque. *Dossier thématique*, 33(3), 663-683. <https://doi.org/10.7202/018963ar>
- Nanard, M., & Nanard, J. (1999). Documents hypermédias - Conception. *Documents numériques Gestion de contenu*. <https://doi.org/10.51257/a-v1-h7210>

- Newell, K. M. (1986). Constraints on the Development of Coordination. *Motor Development in Children : Aspects of Coordination and Control*, 341-360. https://doi.org/10.1007/978-94-009-4460-2_19
- Newman, S. D. (2016). Does finger sense predict addition performance? *Cognitive Processing*, 17(2), 139–146. <https://doi.org/10.1007/s10339-016-0756-7>.
- Noël, M.-P. (2005). Finger gnosis: a predictor of numerical abilities in children? *Child Neuropsychology*, 11(5), 413–430. <https://doi:10.1080/09297040590951550>
- Noël, Y. (2012a). R2STATS: A GTK GUI for fitting and comparing GLM and GLMM in R. R package version 0.68-31. <http://CRAN.R-project.org/package=R2STATS>
- Ninio, A., & Liebllich, A. (1976). The Grammar of Action : « Phrase Structure » in Children's Copying. *Child Development*, 47(3), 846. <https://doi.org/10.2307/1128205>
- Nootens, P., Doyen, A. L., Noyer-Martin, M., & Simard-Dupuis, É. (2019). Apprentissage de l'orthographe lexicale et apports des dispositifs d'enseignement explicite. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant (ANAE)*, 163, 750-758.
- Norton, E. S., & Wolf, M. (2012). Rapid Automatized Naming (RAN) and Reading Fluency : Implications for Understanding and Treatment of Reading Disabilities. *Annual Review of Psychology*, 63(1), 427-452. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-120710-100431>
- Ollivier, F., Noël, Y., Legrand, A., & Bonneton-Botté, N. (2019). A teacher-implemented intervention program to promote finger use in numerical tasks. *European Journal of Psychology of Education*, 35(3), 589-606. <https://doi.org/10.1007/s10212-019-00441-9>
- Orliaguet, J. P., Kandel, S., & Boë, L. J. (1997). Visual Perception of Motor Anticipation in Cursive Handwriting : Influence of Spatial and Movement Information on the Prediction of Forthcoming Letters. *Perception*, 26(7), 905-912. <https://doi.org/10.1068/p260905>

- Otte, E., & van Mier, H. I. (2006). Bimanual interference in children performing a dual motor task. *Human Movement Science*, 25(4-5), 678–693. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2006.07.008>
- Pailhous, J., & Bonnard, M. (1989). Programmation et contrôle du mouvement. *Traité de psychologie cognitive, 1*.
- Paillard, J. (1991). Motor and representational framing of space. *Brain and space*, 163-182.
- Panadero, E., & Lipnevich, A. A. (2022). A review of feedback models and typologies : Towards an integrative model of feedback elements. *Educational Research Review*, 35, 100416. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2021.100416>
- Parkinson, J., Dyson, B. J., & Khurana, B. (2009). Line by line : the ERP correlates of stroke order priming in letters. *Experimental Brain Research*, 201(3), 575-586. <https://doi.org/10.1007/s00221-009-2077-x>
- Patchan, M. M., & Puranik, C. S. (2016). Using tablet computers to teach preschool children to write letters: Exploring the impact of extrinsic and intrinsic feedback. *Computers & Education*, 102, 128–137. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2016.07.007>
- Paz-Villagrán, V., Danna, J., & Velay, J. L. (2014). Lifts and stops in proficient and dysgraphic handwriting. *Human Movement Science*, 33, 381-394. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2013.11.005>
- PBS Learning Media (2015). The future of digital learning. Retrieved from <https://gpb.pbslearningmedia.org/resource/26524f73-498a-4607-ae61-66d6a8903e1f/the-future-of-digital-learning>
- Peereman, R., Lété, B., & Sprenger-Charolles, L. (2007). Manulex-infra : Distributional characteristics of grapheme—phoneme mappings, and infralexical and lexical units in child-directed written material. *Behavior Research Methods*, 39(3), 579-589. <https://doi.org/10.3758/bf03193029>

- Penner-Wilger, M., & Anderson, M. L. (2013). The relation between finger gnosis and mathematical ability: Why redeployment of neural circuits best explains the finding. *Frontiers in Psychology*, 4(DEC), 1–9. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00877>
- Pennington, B. F., & Lefly, D. L. (2001). Early reading development in children at risk for dyslexia. *Child Development*, 72, 816-833.
- Perruchet, P., (2008). Implicit learning. *Cognitive psychology of memory. Vol.2 Learning and memory: A comprehensive reference (J. Byrne, Ed.)*, Elsevier, 597-621, 978-0-12-370509-9. [hal-02934399](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02934399)
- Perruchet, P., Vinter, A., & Pacton, S. (2007). La conscience auto-organisatrice : une alternative au modèle dominant de la psychologie cognitive. *Éducation et didactique*, 1-3, 105-116. <https://doi.org/10.4000/educationdidactique.224>
- Piaget, J. (1936). La naissance de l'intelligence. Neuchâtel, Switzerland: Delachaux et Niestlé.
- Piaget, J. (1961). Psychologie et Pédagogie. Folio Edition.
- Piasta, S. B., & Wagner, R. K. (2010). Developing Early Literacy Skills : A Meta-Analysis of Alphabet Learning and Instruction. *Reading Research Quarterly*, 45(1), 8-38. <https://doi.org/10.1598/rrq.45.1.2>
- Piazza, M., Fumarola, A., Chinello, A. & Melcher, D. (2011, octobre). Subitizing reflects visuo-spatial object individuation capacity. *Cognition*, 121(1), 147-153. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2011.05.007>
- Picard, D. & Baldy, R. (2012). Le dessin de l'enfant et son usage dans la pratique psychologique. *Développements*, 10, 45-60. <https://doi.org/10.3917/devel.010.0045>

- Piek, J. P., Baynam, G. B., & Barrett, N. C. (2006). The relationship between fine and gross motor ability, self-perceptions and self-worth in children and adolescents. *Human Movement Science*, 25(1), 65-75. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2005.10.011>
- Pinet, L., & Gentaz, D. (2008). Évaluation d'entraînements multisensoriels de préparation à la reconnaissance de figures géométriques planes chez les enfants de cinq ans : étude de la contribution du système haptique manuel. *Revue française de pédagogie*, 162, 29-44. <https://doi.org/10.4000/rfp.753>
- 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, 783–800. <https://doi:10.3389/fpsyg.2016.00783>
- Plisson, A. (2010). La compétence orthographique d'élèves dyslexiques du primaire. Mémoire. <https://papyrus.bib.umontreal.ca/xmlui/handle/1866/4695>
- Poletti, C., Krenger, M., Dupont-Boime, J., & Thevenot, C. (2022). The Evolution of Finger Counting between Kindergarten and Grade 2. *Children*, 9(2), 132. <https://doi.org/10.3390/children9020132>
- 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, 1-9. <https://doi:10.3389/fpsyg.2013.00818>
- Provins, K. A., & Glencross, D. J. (1968). Handwriting, typewriting and handedness. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 20(3), 282–289. <https://doi:10.1080/14640746808400162>
- Prunty, M. M., Barnett, A. L., Wilmut, K., & Plumb, M. S. (2014). An examination of writing pauses in the handwriting of children with Developmental Coordination Disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 35(11), 2894-2905. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2014.07.033>

- Puranik, C. S., Lonigan, C. J., & Kim, Y. S. (2011). Contributions of emergent literacy skills to name writing, letter writing, and spelling in preschool children. *Early Childhood Research Quarterly, 26*(4), 465-474. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2011.03.002>
- Puranik, C. S., & Al Otaiba, S. (2012). Examining the contribution of handwriting and spelling to written expression in kindergarten children. *Reading and Writing, 25*(7), 1523–1546. <https://doi:10.1007/s11145-011-9331-x>.
- Puyjarinet, F. (2015). Intérêt de l'imagerie motrice dans la rééducation de la dysgraphie chez l'enfant. *Entretiens de Psychomotricité*.
- Puyjarinet, F., Soppelsa, R. & Connan, J.-F. (2020). Le test d'imagerie motrice implicite (TIMI-1) : standardisation et étalonnage chez des enfants de 7 à 11 ans. *A.N.A.E. : Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant, 167*, 480-494.
- Puyjarinet, F. (2019). Intérêts de la pratique de l'imagerie motrice dans la rééducation de l'écriture des enfants dysgraphiques. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant (ANAE), 31*(159), 1-11.
- Puma, S., & Tricot, A. (2021). Prendre en compte la mémoire de travail lors de la conception de situations d'apprentissage scolaire. *Analyse Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant, 171*, 217-225
- Puranik, C. S., & Lonigan, C. J. (2009). From scribbles to scrabble: preschool children's developing knowledge of written language. *Reading and Writing, 24*(5), 567–589. <https://doi:10.1007/s11145-009-9220-8>
- Puranik, C., Lonigan, C. J., & Kim, Y. S. (2011). Contributions of emergent literacy skills to name writing, letter writing, and spelling in preschool children. *Early Childhood Research Quarterly, 26*, 465-474. <https://doi: 10.1016/j.ecresq.2011.03.002>
- Reed, E. S., & Bril, B. (1996). The primacy of action in development. *Dexterity and its development, 431-451*

- Reeve, R., & Humberstone, J. (2011). Five-to 7-year-olds' finger gnosis and calculation abilities. *Frontiers in Psychology, 2*, 359. <https://doi:10.3389/fpsyg.2011.00359>
- Ren Z., & Wu, J. (2019). The Effect of Virtual Reality Games on the Gross Motor Skills of Children with Cerebral Palsy: A Meta-Analysis of Randomized Controlled Trials. *International Journal of Environmental Research and Public Health, 16*(20):3885. <https://doi.org/10.3390/ijerph16203885>
- Rey, A. (1959). *Manuel du test de copie et de reproduction de mémoire des figures géométriques complexes*. Paris: ECPA.
- Rintala, P., & Loovis, E. M. (2013). Measuring Motor Skills in Finnish Children with Intellectual Disabilities. *Perceptual and Motor Skills, 116*(1), 294-303. <https://doi.org/10.2466/25.10.pms.116.1.294-303>
- Rizzolatti, G., Fadiga, L., Gallese, V., & Fogassi, L. (1996). Premotor cortex and the recognition of motor actions. *Cognitive brain research, 3*(2), 131-141.
- Rogers, L. A., & Graham, S. (2008). A meta-analysis of single subject design writing intervention research. *Journal of Educational Psychology, 100*(4), 879–906. <https://doi:10.1037/0022-0663.100.4.879>
- Rosenblum, S., Goldstand, S., & Parush, S. (2006). Relationships Among Biomechanical Ergonomic Factors, Handwriting Product Quality, Handwriting Efficiency, and Computerized Handwriting Process Measures in Children With and Without Handwriting Difficulties. *The American Journal of Occupational Therapy, 60*(1), 28-39. <https://doi.org/10.5014/ajot.60.1.28>
- Rosenblum, S., Weiss, P. L., & Parush, S. (2003). Product and process evaluation of handwriting difficulties. *Educational Psychology Review, 15*, 41-81.
- Salmoni, A. W., Schmidt, R. A., & Walter, C. B. (1984). Knowledge of results and motor learning: A review and critical reappraisal. *Psychological Bulletin, 95*(3), 355–386.

- <https://doi.org/10.1037/0033-2909.95.3.355>
- Sato, M., & Lalain, M. (2008). On the relationship between handedness and hand-digit mapping in finger counting. *Cortex*, *44*, 393–399. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.005>.
- Schatschneider, C., Fletcher, J. M., Francis, D. J., Carlson, C. D., & Foorman, B. R. (2004). Kindergarten Prediction of Reading Skills : A Longitudinal Comparative Analysis. *Journal of Educational Psychology*, *96*(2), 265-282. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.96.2.265>
- Schild, U., Bauch, A., & Nuerk, H.-C. (2020). A Finger-Based Numerical Training Failed to Improve Arithmetic Skills in Kindergarten Children Beyond Effects of an Active Non-numerical Control Training. *Frontiers in Psychology*, *11*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.00529>
- Schmidt, R. A. (1975). A schema theory of discrete motor skill learning. *Psychological Review*, *82*(4), 225-260. <https://doi.org/10.1037/h0076770>
- Schmidt, R. A. (1982). More on motor programs. *Human motor behavior: An introduction*, 189-217.
- Schmidt, R. A., & Lee, T. D. (2005). *Motor Control and Learning. A Behavioral Emphasis* (5th ed.). Champaign, IL: Human Kinetics.
- Schneck, C. M., & Henderson, A. (1990). Descriptive analysis of the developmental progression of grip position for pencil and crayon control in nondysfunctional children. *American Journal of Occupational Therapy*, *44*, 893-900.
- Schwellnus, H., Cameron, D., & Carnahan, H. (2012). Which to Choose: Manuscript or Cursive Handwriting? A Review of the Literature. *Journal of Occupational Therapy, Schools, & Early Intervention*, *5*(3-4), 248–258. <https://doi.org/10.1080/19411243.2012.744651>
- Sensevy, G. (2011). *Le sens du savoir. Éléments pour une théorie de l'action conjointe en didactique* (p. 800). De Boeck.

- Sensevy, G. (2015). Serait-il pertinent d'identifier certaines ressources pour les enseignants et les élèves? L'exemple d'ACE. Communication présentée à la conférence de consensus sur les nombres et opérations, premiers apprentissages, Lycée Buffon, Paris XV. Consulté à l'adresse: <http://www.cnesco.fr/wpcontent/uploads/2015/11/26-Gerard-Sensevy.pdf>.
- Sensevy, G. (2020). À propos des lumières. L'intelligence et la coopération. M. Fabre & C. Chauviré (Éds.), *L'éducation et les Lumières. Enjeux philosophiques et didactiques contemporains*. Dijon: Raison et Passions.
- Seron X., Crollen, V. (2018). Le comptage sur les doigts comme support au développement des capacités numériques et arithmétiques. *Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant*, 156, 531-537.
- Sermier Dessemontet, R., Moser Opitz, E., & Schnepel, S. (2019). The Profiles and Patterns of Progress in Numerical Skills of Elementary School Students with Mild and Moderate Intellectual Disability. *International Journal of Disability, Development and Education*, 67(4), 409–423. <https://doi:10.1080/1034912x.2019.1608915>
- Share, D. L. (2004). Orthographic learning at a glance : On the time course and developmental onset of self-teaching. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87(4), 267-298. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2004.01.001>
- Siegler, R. S., & Shrager, J. (1984). Strategies choices in addition and subtraction: how do children know what to do? In C. Sophian (Ed.), *Origins in cognitive skills* (pp. 229–293). Hillsdale: Lawrence Erlbaum Associates.
- Simard-Dupuis, É. (2019). Influence des traitements graphomoteurs sur la production orthographique de mots isolés chez des élèves francophones du primaire. Thèse de doctorat.
- Simner, M. L. (1981). The grammar of action and children's printing. *Developmental Psychology*, 17(6), 866-871. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.17.6.866>

- Simonnet, D., Anquetil, E., & Bouillon, M. (2017). Multi-criteria handwriting quality analysis with online fuzzy models. *Pattern Recognition*, 69, 310-324. <https://doi:10.1016/j.patcog.2017.04.003>
- Simonnet, D., Girard, N., Anquetil, E., Renault, M., & Thomas, S. (2019) Evaluation of children cursive handwritten words for e-education. *Pattern Recognition Letters*, 121, 133-139. <https://doi:10.1016/j.patrec.2018.07.021>
- Smits-Engelsman, B., & Duysens, J. (2008). The line copy task for kinesthesia and internal movement representation : Application in children. *Human Movement Science*, 27(5), 682-694. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2008.03.005>
- Son, S. H., & Meisels, S. J. (2006). The Relationship of Young Children's Motor Skills to Later School Achievement. *Merrill-Palmer Quarterly*, 52(4), 755-778. <https://doi.org/10.1353/mpq.2006.0033>
- Spaepen, E., Gunderson, E. A., Gibson, D., Goldin-Meadow, S., & Levine, S. C. (2018). Meaning before order : Cardinal principle knowledge predicts improvement in understanding the successor principle and exact ordering. *Cognition*, 180, 59-81. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.06.012>
- 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. [https://doi.org/10.1016/s0022-0965\(03\)00024-9](https://doi.org/10.1016/s0022-0965(03)00024-9)
- Sue Young Choi, Young Sik Kang, & Lee, H. (2008). The effects of socio-technical enablers on knowledge sharing : an exploratory examination. *Journal of Information Science*, 34(5), 742-754. <https://doi.org/10.1177/0165551507087710>
- Suggate, S., Pufke, E., & Stoeger, H. (2018). Do fine motor skills contribute to early reading development? *Journal of Research in Reading*, 41(1), 1-19.

- Suggate, S., & Stoeger, H. (2017). Fine Motor Skills Enhance Lexical Processing of Embodied Vocabulary: A Test of the Nimble-Hands, Nimble-Minds Hypothesis. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 70(10), 2169–2187. <https://doi.org/10.1080/17470218.2016.1227344>
- Suggate, S., Stoeger, H., & Fischer, U. (2017). Finger-Based Numerical Skills Link Fine Motor Skills to Numerical Development in Preschoolers. *Perceptual and motor skills*, 124(6), 1085-1106. <https://doi.org/10.1177/0031512517727405>
- Sullivan, K. J., Katak, S. S., & Burtner, P. A. (2008). Motor learning in children: Feedback effects on skill acquisition. *Physical Therapy*, 88(6), 720–732. <https://doi.org/10.2522/ptj.20070196>
- Super, C. M., & Harkness, S. (1986). The Developmental Niche : A Conceptualization at the Interface of Child and Culture. *International Journal of Behavioral Development*, 9(4), 545-569. <https://doi.org/10.1177/016502548600900409>.
- Sweller, J. (1988). Cognitive Load During Problem Solving : Effects on Learning. *Cognitive Science*, 12(2), 257-285. https://doi.org/10.1207/s15516709cog1202_4
- Teulings, H. L. H. (1979). The Development of Directional Preference in Writing Movements. *Visible Language*, 13(3), 299-313.
- Thelen, E. (2005). Dynamic Systems Theory and the Complexity of Change. *Psychoanalytic Dialogues*, 15(2), 255-283. <https://doi.org/10.1080/10481881509348831>
- Thibon, L. S., Gerber, S., & Kandel, S. (2018). The elaboration of motor programs for the automation of letter production. *Acta Psychologica*, 182, 200–211. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2017.12.001>
- Thomas, M. S. C., Annaz, D., Ansari, D., Scerif, G., Jarrold, C., & Karmiloff-Smith, A. (2009). Using Developmental Trajectories to Understand Developmental Disorders. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 52(2), 336-358. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2009/07-0144\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2009/07-0144))

- Thomassen, A. J., & van Galen, G. (1992). *Handwriting as a motor task : Experimentation, modelling and simulation*. Amsterdam: North-Holland
- Treiman, R. (2019). Apprentissage statistique et orthographe. *Approche Neuropsychologique chez l'enfant*, 163, 739-749.
- Tricot, A. (2017). La connaissance et la solution. *Éducation et didactique*, 11(2), 57-61.
<https://doi.org/10.4000/educationdidactique.2725>
- Tricot, A., Plégat-Soutjis, F., Camps, J. F., Amiel, A., Lutz, G., & Morcillo, A. (2003). Utilité, utilisabilité, acceptabilité: interpréter les relations entre trois dimensions de l'évaluation des EIAH. In : *Environnements Informatiques pour l'Apprentissage Humain 2003* (pp. 391-402). ATIEF; INRP.
- Troadec, B. (2007). *Psychologie culturelle: le développement cognitif est-il culturel?* Belin.
- Tseng, M. H., & Chow, S. M. K. (2000). Perceptual-Motor Function of School-Age Children With Slow Handwriting Speed. *The American Journal of Occupational Therapy*, 54(1), 83-88. <https://doi.org/10.5014/ajot.54.1.83>
- Tseng, M. H., & Cermak, S. A. (1993). The Influence of Ergonomic Factors and Perceptual–Motor Abilities on Handwriting Performance. *The American Journal of Occupational Therapy*, 47(10), 919-926. <https://doi.org/10.5014/ajot.47.10.919>
- Vaivre-Douret, L. (2010). *Évaluation de la motricité gnosopraxique distale (EMG): adaptation du test d'imitation de gestes de Bergès-Lézine*. Pearson.
- Van der Fels, I. M., te Wierike, S. C., 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. <https://doi.org/10.1016/j.jsams.2014.09.007>

- Van der Kleij, F. M., Feskens, R. C. W., & Eggen, T. J. H. M. (2015). Effects of Feedback in a Computer-Based Learning Environment on Students' Learning Outcomes. *Review of Educational Research*, 85(4), 475-511. <https://doi.org/10.3102/0034654314564881>
- Velay, J. L., & Longcamp, M. (2013). Motor skills and written language perception: Contribution of writing knowledge to visual recognition of graphic shapes. In Y. Coello & A. Bartolo (EDS), *Language and Action in Cognitive Neuroscience*, 161-176. <https://doi:10.4324/9780203095508>
- Velay, J. L., Longcamp, M., & Zerbato-Poudou, M. T. (2004). De la plume au clavier: est-il toujours utile d'enseigner l'écriture manuscrite. *Comprendre les apprentissages: Sciences cognitives et éducation*, 69-82.
- Versace, R., Brouillet, D., & Vallet, G. (2018). *Cognition incarnée: Une cognition située et projetée*. Mardaga.
- Vincent, G., Courtebras, B. & Reuter, Y. (2012). La forme scolaire : débats et mises au point: Entretien de Guy Vincent avec Bernard Courtebras et Yves Reuter. *Recherches en didactiques*, 13, 109-135. <https://doi.org/10.3917/rdid.013.0109>
- Vinter, A., & Chartrel, E. (2010). Effects of different types of learning on handwriting movements in young children. *Learning and Instruction*, 20(6), 476-486. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2009.07.001>
- Vinter, A., & Marot, V. (2003). Les activités de dessin chez l'enfant : Un accès à l'étude de ses représentations mentales. *Approche Neuropsychologique de l'Apprentissage chez l'Enfant*, 72, 95-106.
- Vinter, A., & Perruchet, P. (1999). Isolating Unconscious Influences : The Neutral Parameter Procedure. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology A*, 52(4), 857-875. <https://doi.org/10.1080/027249899390846>

- Vinter, A., & Perruchet, P. (2000). Implicit Learning in Children Is Not Related to Age : Evidence from Drawing Behavior. *Child Development*, 71(5), 1223-1240. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00225>
- Vinter, A., & Perruchet, P. (2002). Implicit motor learning through observational training in adults and children. *Memory & Cognition*, 30(2), 256-261. <https://doi.org/10.3758/bf03195286>
- Vinter, A., Picard, D., & Fernandes, V. (2008). Graphic syntax and representational development. In C. Lange-Küttner & A. Vintner (Eds.), *Drawing and the non-verbal mind: A life-span perspective* (pp. 139–158). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511489730.008>
- Viviani, P., & Stucchi, N. (1992). Biological movements look uniform: evidence of motor-perceptual interactions. *Journal of experimental psychology: Human perception and performance*, 18(3), 603.
- Vygostki, L. (1985). *Pensée et Langage*. Paris : Editions Sociales.
- Vuijk, P. J., Hartman, E., Scherder, E., & Visscher, C. (2010). Motor performance of children with mild intellectual disability and borderline intellectual functioning. *Journal of Intellectual Disability Research*, 54(11), 955-965. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2788.2010.01318.x>
- Wallon, H., & Denjean, G. (1962). *Activité simultanée et similaire des deux mains chez les droitiers et les gauchers*. Presses universitaires de France.
- Warschauer, M. (2007). The paradoxical future of digital learning. *Learning Inquiry*, 1(3), 219–219. <https://doi:10.1007/s11519-007-0022-0>
- Wasner, M., Nuerk, H. C., Martignon, L., Roesch, S., & Moeller, K. (2016). Finger gnosis predicts a unique but small part of variance in initial arithmetic performance. *Journal of experimental child psychology*, 146, 1-16. <https://doi:10.1016/j.jecp.2016.01.006>

- Weeks, D., & Anderson, L. (2000). The interaction of observational learning with overt practice : effects on motor skill learning. *Acta Psychologica*, *104*(2), 259-271. [https://doi.org/10.1016/s0001-6918\(00\)00039-1](https://doi.org/10.1016/s0001-6918(00)00039-1)
- Weisberg, S. M., & Newcombe, N. S. (2017). Embodied cognition and STEM learning: Overview of a topical collection in CR:PI. *Cognitive Research: Principles and Implications*, *2*(1), Article 38. <https://doi.org/10.1186/s41235-017-0071-6>
- Westendorp, M., Hartman, E., Houwen, S., Huijgen, B. C., Smith, J., & Visscher, C. (2014). A longitudinal study on gross motor development in children with learning disorders. *Research in Developmental Disabilities*, *35*(2), 357-363. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.11.018>
- Wilson, P., Maruff, P., Butson, M., Williams, J., Lum, J., & Thomas, P. (2007). Internal representation of movement in children with developmental coordination disorder : a mental rotation task. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *46*(11), 754-759. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2004.tb00995.x>
- Wolpert, D. M., & Flanagan, J. (2001). Motor prediction. *Current Biology*, *11*(18), R729-R732. [https://doi.org/10.1016/s0960-9822\(01\)00432-8](https://doi.org/10.1016/s0960-9822(01)00432-8)
- Wolpert, D. M., & Ghahramani, Z. (2000). Computational principles of movement neuroscience. *Nature Neuroscience*, *3*(S11), 1212-1217. <https://doi.org/10.1038/81497>
- Wolpert, D., & Kawato, M. (1998). Multiple paired forward and inverse models for motor control. *Neural Networks*, *11*(7-8), 1317-1329. [https://doi.org/10.1016/s0893-6080\(98\)00066-5](https://doi.org/10.1016/s0893-6080(98)00066-5)
- Wong, T. H., & Kao, H. S. R. (1991). The development of drawing principles in Chinese. *Development of graphic skills: Research perspectives and educational implications*, 93-112.

- Wulf, G. (2013). Attentional focus and motor learning : a review of 15 years. *International Review of Sport and Exercise Psychology*, 6(1), 77-104.
<https://doi.org/10.1080/1750984x.2012.723728>
- Zerbato -Poudou, M. T. (2007). *Apprendre à écrire de la PS à la GS*. Paris : Retz.
- Zesiger, P. (1995). *Écrire*. PUF. <https://doi:10.3917/puf.zesig.1995.01>
- Zesiger, P., Deonna, T., & Mayor, C. (2000). L'acquisition de l'écriture. *Enfance*, 53(3), 295-304. <https://doi.org/10.3406/enfan.2000.3186>
- Zhai, X., Chu, X., Chai, C. S., Jong, M. S. Y., Istenic, A., Spector, M., Liu, J. B., Yuan, J., & Li, Y. (2021). A Review of Artificial Intelligence (AI) in Education from 2010 to 2020. *Complexity*, 2021, 1-18. <https://doi.org/10.1155/2021/8812542>

Table des illustrations

Figure 1 : Score de détection (moyenne et écart-type) en fonction de la condition (normal, stop, direction). **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 2 : Fréquence de bonnes réponses justifiées en fonction des conditions (stop et direction) et du niveau scolaire (GS, CE1 et CM2). Les barres représentent les écarts-types..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 3 : Trois essais et leurs feedbacks sous forme de jauge colorée et d'étoile pour la première syllabe du mot « lion » **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 4 : Évolution des scores d'apprentissage en écriture en fonction du groupe (Tablette vs. Traditionnel) et du niveau initial des enfants en graphomotricité. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 5 : Exemple de feedback reçu par l'enfant après lecture du mot cadeau, la prononciation des graphèmes /a/ et /eau/ ne sont pas jugés corrects..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 6 : Exemple de tâche de copie du mot fleur, le mot peut être écouté, il est illustré par une image et le modèle à copier est masqué par un cache qui peut être écarté temporairement en cliquant dessus **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 7 : Exemple de diapositive proposée à l'enfant pour expliciter des stratégies pertinentes lors d'une tâche d'orthographe. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 8 : Exemple de feedback reçu par l'enfant lors d'un exercice visant des connaissances morphologiques : les erreurs apparaissent en rouge, les oublis soulignés en vert, les bonnes réponses apparaissent en vert..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 9 : Exemple d'analyse d'erreur par le moteur et feedback renvoyé à l'enfant au cours de trois essais successifs. L'omission de la lettre par l'enfant est signalée (« tu as oublié une ou plusieurs lettres »), au deuxième essai, le graphème cible qui a posé problème est entouré dans le modèle à produire. Au troisième essai, le mot correctement produit est entouré en vert. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 10 a (à gauche) et b (à droite) : Effet de la condition (P : papier ; T : Tablette) et du niveau de lecture au post-test sur scores moyens d'erreurs graphémiques pour les mots travaillés (GMT) et les mots nouveaux (GMN). Les scores des faibles lecteurs apparaissent en bleu (1) et les bons lecteurs en orange (2). Les barres représentent les intervalles de confiance. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 11 a (à gauche) et b (à droite) : Effet de la condition (P : papier ; T : Tablette) et du niveau de lecture au post-test sur le score moyen de plausibilité phonologique des mots travaillés (PMT) et les mots nouveaux (PMN). Les scores des faibles lecteurs apparaissent en bleu (1) et les bons lecteurs en orange (2). Les barres représentent les intervalles de confiance. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 12 (extrait de Ollivier et al., 2019) : Évolution du recours aux doigts (à gauche) et des performances en résolution problème (à droite) pour le groupe contrôle (en noir) et le groupe expérimental (en rouge)..... **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 13 : Tendance à l'interaction entre le facteur groupe (contrôle vs entraîné) et le facteur Imitation motrice (IMM : niveau Faible vs élevé) pour le score de calcul total. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance à 95%. **Erreur ! Signet non défini.**

Figure 14 : Tendance à l'interaction entre le facteur groupe (contrôle vs entraîné) et le facteur Imitation Motrice (IMM : niveau Faible vs élevé) pour la variable recours aux doigts. Les barres d'erreur indiquent les intervalles de confiance à 95%..... **Erreur ! Signet non défini.**

Motricité et apprentissage en contexte scolaire

Le cerveau à l'école... voilà une expression intrigante qui a occupé et occupe encore largement l'espace médiatique et les différents sites internet qui nourrissent les pratiques et réflexions de nombreux professionnels du milieu scolaire. Les progrès fantastiques menés dans le champ des neurosciences ces trente dernières années tant sur le plan théorique que technologique ont contribué à transformer les conceptions et pratiques de nombreux praticiens de l'éducation qui cherchent aujourd'hui à enseigner en considérant les caractéristiques neurodéveloppementales de leurs élèves. Ces connaissances, souvent focalisées sur le système nerveux central, ont pu laisser penser que le système perceptivo-moteur et l'environnement ne jouaient qu'un rôle secondaire dans le processus d'apprentissage. De fait, l'examen de la forme scolaire traditionnelle, à travers l'étude des instructions officielles ou des conceptions et pratiques des enseignants, montre que le système moteur est assez peu exploité au service des apprentissages fondamentaux du lire, écrire, compter. Les programmes officiels évoquent un corps qu'il faut apprendre à maîtriser (au cycle 1) et une motricité qui renvoie à un besoin physiologique de l'enfant que l'on pourra considérer lors des temps d'expression artistique et corporel ou d'activités physiques et sportives (du cycle 1 au cycle 3).

Pourtant, un autre champ de recherches, qui s'inscrit lui aussi dans le paysage des neurosciences, a révélé l'existence d'une cognition motrice capable d'anticiper, de simuler des actions et de participer à la compréhension des actions d'autrui à partir du système moteur du sujet. Parallèlement, certains chercheurs qui s'intéressent aux processus mnésiques défendent aujourd'hui le modèle d'une cognition incarnée et située. Dans cette perspective, l'action sensori-motrice qui s'inscrit dans un environnement physique et social est considérée comme étant à l'origine même de la connaissance. Comment ces connaissances scientifiques récemment acquises sur le système moteur peuvent-elles contribuer à nourrir la réflexion sur la forme scolaire (i.e., notre conception culturellement partagée de la façon dont doivent se transmettre les savoirs) et sur les pratiques d'enseignement ? Les recherches menées dans le champ de la psychologie et présentées dans cette synthèse ont été conduites en contexte scolaire et avec la participation des enseignants, elles interrogent la place de la motricité pour les apprentissages fondamentaux.