

Étude du rôle des doigts dans le développement des compétences arithmétiques chez des enfants tout-venant ou à risque de développer un trouble développemental de la coordination : une étude longitudinale

Auteur : Hurtel, Camille

Promoteur(s) : Rousselle, Laurence

Faculté : Faculté de Psychologie, Logopédie et Sciences de l'Éducation

Diplôme : Master en logopédie, à finalité spécialisée en communication et handicap

Année académique : 2023-2024

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/19929>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Université de Liège
Faculté des Sciences Psychologiques et de l'Education
Liège

Filière : Logopédie – Communication et handicap

**Étude du rôle des doigts dans le développement des compétences arithmétiques chez
des enfants tout-venant ou à risque de développer un trouble développemental de la
coordination : une étude longitudinale**

Mémoire en vue de l'obtention du grade de master en logopédie

Présenté par
Camille HURTEL

Sous la direction de Madame
Laurence ROUSSELLE

Lectrices :

Madame Christelle MAILLART
Madame Marie GEURTEN

Année académique 2023 – 2024

REMERCIEMENTS

Avant tout, j'aimerais remercier ma promotrice, Laurence Rousselle, pour avoir accepté que je réalise ce mémoire. Un grand merci pour votre compréhension tout au long de l'élaboration de ce projet. Je tiens à remercier sincèrement Maëlle Neveu pour le suivi irréprochable dont j'ai bénéficié. Merci, Maëlle, pour ton implication, tes nombreux conseils et tes encouragements qui m'ont permis de mener à terme ce mémoire. Merci également à mes lectrices, Christelle Maillart et Marie Geurten, pour le temps que vous passerez à lire ce mémoire.

Je tiens également à remercier les étudiantes des années précédentes qui ont contribué à l'élaboration de cette étude longitudinale et à la récolte des nombreuses données. Merci aux écoles et aux enseignantes qui nous ont toujours accueilli à bras ouverts malgré l'organisation que cela impliquait. Un grand merci aux enfants d'avoir réalisé avec motivation l'ensemble de nos évaluations, ainsi qu'à leurs parents qui nous ont autorisé à suivre leurs enfants pendant trois ans.

Enfin, il me tient à cœur de remercier la Belgique de m'avoir accueilli et permis de trouver ma voie pour pratiquer le métier que j'aime. Un tout grand merci à toutes celles et ceux qui m'ont fait grandir tout au long de ces neuf années d'études et qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire. Je pense notamment à mes parents qui ont financé mes études et qui m'ont soutenu de loin. Mais aussi à Baptiste Robert pour sa relecture, son soutien quotidien, bienveillant et avisé. Je remercie tous.tes mes amis.es. Sans vous, rien de tout ça n'aurait été possible.

**À tous et à toutes, j'espère que la lecture de ce mémoire vous sera agréable,
limpide et intéressante.**

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	
Liste des tableaux	
Liste des figures	
Résumé	
INTRODUCTION	1
Chapitre 1 INTRODUCTION THÉORIQUE	2
PARTIE 1 : Développement typique des compétences numériques et arithmétiques chez l'enfant	2
1. Les précurseurs du développement arithmétique.....	3
a. Le système numérique approximatif (ou sens du nombre)	3
b. Le comptage verbal et le dénombrement.....	3
c. Le principe de cardinalité.....	5
2. Le développement des compétences arithmétiques	6
a. Les additions et les soustractions	6
b. Capacité associée : la mémoire de travail.....	8
PARTIE 2 : Utilisation des doigts dans le développement numérique et arithmétique de l'enfant	11
1. Le rôle des doigts dans le développement des compétences numériques.....	12
a. Le rôle des doigts dans l'acquisition du comptage et du dénombrement	12
b. Le rôle des doigts dans l'acquisition de la cardinalité	13
2. Le rôle des doigts dans le développement des compétences arithmétiques	15
3. Le rôle des habiletés sensori-motrices dans le développement des compétences numériques et arithmétiques.....	16
a. Les gnosies digitales	16
b. Les habiletés motrices fines.....	17
PARTIE 3 : Le développement arithmétique chez les enfants ayant de faibles habiletés motrices fines	19
1. Caractéristiques du trouble développemental de la coordination	19
2. Profil cognitif du trouble développemental de la coordination	20
a. Les cognitions mathématiques chez l'enfant avec TDC	20

b. Profil attentionnel et mnésique chez l'enfant avec TDC	21
synthèse.....	22
Chapitre 2 QUESTIONS DE RECHERCHE HYPOTHÈSES.....	24
Chapitre 3 MÉTHODOLOGIE.....	28
PARTIE 1 : Conception de la recherche	28
1. Population	28
2. Procédure	29
3. Matériel.....	29
a. Évaluation des habiletés sensori-motrices	29
b. Évaluation des compétences arithmétiques	30
c. Évaluation de la mémoire de travail	31
PARTIE 2 : Analyses	32
Chapitre 4 RÉSULTATS.....	33
PARTIE 1 : Habiletés digitales (gnosies digitales et habiletés motrices fines) et	
compétences arithmétiques.....	33
1. Analyses descriptives	33
2. Matrice de corrélations	34
3. Régression multiples hiérarchiques	36
a. Variables prédictives des compétences arithmétiques au temps 4	36
b. Variables prédictives des Fluences arithmétiques aux temps 1, 2 et 3.....	37
c. Variables prédictives de l'Arithmétique sans CT aux temps 2 et 3.....	39
PARTIE 2 : Stratégies de calcul chez les enfants à risque de développer un	
trouble développemental de la coordination	40
1. Habiletés sensori-motrices	40
a. Analyses descriptives	40
b. Test non-paramétrique de Mann-Whitney	40
2. Stratégies de calcul	41
a. Analyses descriptives	41
b. Test non-paramétrique de Mann-Whitney	42
c. Analyses visuelles	42
3. Compétences arithmétiques et performances en mémoire de travail	45
a. Analyses descriptives	45

b. Test non-paramétrique de Mann-Whitney	45
c. Analyses visuelles	46
Chapitre 5 DISCUSSION.....	48
Question 1 : Habiletés sensori-motrices et compétences arithmétiques	49
Question 2 : trouble développemental de la coordination et stratégies de calcul	52
Limites	56
Perspectives futures	57
CONCLUSION.....	59
BIBLIOGRAPHIE	
ANNEXES	
Annexe 1 : Synthèse du test U de Mann-Whitney 1	
Annexe 2 : Synthèse du test U de Mann-Whitney 2	
Annexe 3 : Synthèse du test U de Mann-Whitney 3	

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 - Moyenne d'âge (en mois) et écart-type à tous les temps de passation	28
Tableau 2 - Statistiques descriptives de compétences mnésiques, sensori-motrices et arithmétiques chez tous les enfants et dans chaque sous-groupe (enfants TV et enfants à risque de TDC)	34
Tableau 3 - Matrice de corrélation de Pearson entre les performances en mémoire de travail au temps 1, les habiletés sensori-motrices au temps 1 et les compétences arithmétiques à tous les temps	35
Tableau 4 - Synthèse des modèles de régression linéaire multiple hiérarchique, incluant la mémoire de travail, entre la variable indépendante "IDM T1" et les variables indépendantes "Fluences arithmétiques T4" et "Arithmétique sans CT T4"	37
Tableau 5 - Synthèse des modèles de régressions linéaires multiples hiérarchiques, incluant la mémoire de travail, entre les variables sensori-motrices et la variable dépendante "Fluences arithmétiques"	38
Tableau 6 - Synthèse des modèles de régression linéaire simple et multiples hiérarchiques, incluant la mémoire de travail, entre les variables sensori-motrices et la variable dépendante "Arithmétique sans contrainte de temps"	39
Tableau 7 - Statistiques descriptives des scores aux tâches d'habiletés sensori-motrices de chaque sous-groupe	40
Tableau 8 - Statistiques descriptives de la fréquence d'utilisation des différentes stratégies de calcul utilisées lors de la tâche "Arithmétique sans CT"	41
Tableau 9 - Taux de fréquence d'utilisation des différentes stratégies en fonction des deux sous-groupes.....	43
Tableau 10 - Statistiques descriptives des scores obtenus par les deux sous-groupes aux deux tâches arithmétiques et à la tâche de mémoire de travail	45

LISTE DES FIGURES

Figure 1 - Modèle développemental des compétences numériques précoces (Krajewski et Schneider, 2009).....	2
Figure 2 - Modèle de Roesch et Moeller (2015)	11
Figure 3 - Représentation conventionnelle des chiffres sur les doigts de 1 à 10 en Europe (JR, 2011. Affiches de 1 à 10 : doigts et chiffres. Les (bonnes) notes de JR. https://bonnesnotes.jejoueenclasse.fr/).....	12
Figure 4 - Représentation non symbolique et symbolique du chiffre 3	14
Figure 5 - Images présentées à l'enfant lors de la tâche des gnosies digitales	30
Figure 6 - Évolution de la fréquence d'utilisation de la stratégie des doigts	44
Figure 7 - Évolution de la fréquence d'utilisation de la stratégie de récupération	44
Figure 8 - Évolution de la fréquence d'utilisation du calcul procédural.....	44
Figure 9 - Évolution de la fréquence d'utilisation d'une stratégie inconnue.....	44
Figure 13 - Évolution des performances à la tâche de Fluences arithmétiques	46
Figure 14 - Évolution des performances à la tâche d'Arithmétique sans CT	46
Figure 15 - Évolution des performances en mémoire de travail	47

RESUME

Contexte : L'utilisation des doigts au cours de l'apprentissage des mathématiques est courante chez les enfants du monde entier. De nombreuses recherches sont, dès lors, menées pour mieux comprendre le rôle que jouent les doigts dans cet apprentissage. Afin de compléter les données existantes, nous nous sommes posés deux questions de recherche à travers cette étude longitudinale. La première est de *savoir quel rôle jouent les habiletés sensori-motrices des doigts dans le développement de l'arithmétique*. Ensuite nous avons questionné *l'évolution et l'utilisation des stratégies de calcul chez les enfants à risque de développer un trouble développemental de la coordination*.

Méthodologie : Nous avons donc évalué 67 enfants du début de leur première primaire à la fin de leur deuxième primaire, tous les 6 mois (i.e. quatre rencontres en tout). Cette cohorte fut divisée en deux sous-groupes, l'un contenant 63 enfants tout-venant, l'autre contenant 4 enfants à risque de développer un trouble développemental de la coordination. Lors de ces rencontres, nous avons évalué leur dextérité motrice à l'aide de trois tâches issues de la MABC-II, leurs gnosies digitales ainsi que leurs compétences arithmétiques (faits arithmétiques et arithmétique sans contrainte de temps) et leur mémoire de travail. Pour la tâche d'arithmétique sans contrainte de temps, nous relevions les stratégies employées par les enfants lors de la réalisation des calculs (doigts, récupération, calcul procédural, inconnue).

Résultats et discussion : Les résultats correspondant à notre première question de recherche ne nous permettaient pas de confirmer le rôle fonctionnel des habiletés motrices fines dans le développement de l'arithmétique. En revanche, les gnosies digitales prédisaient les compétences arithmétiques du début de la première primaire jusqu'au début de la deuxième primaire, indépendamment de l'influence de la mémoire de travail. Concernant notre deuxième question de recherche, nous avons analysé qualitativement l'évolution des stratégies et des performances de 4 enfants à risque de développer un trouble développemental de la coordination. Nos résultats montrent que ces enfants ont davantage utilisé leurs doigts pour résoudre des additions et des soustractions à 1 ou 2 chiffres. Ils possédaient les mêmes performances que les enfants tout-venant au niveau des deux tâches arithmétiques et de la mémoire de travail. Cependant, on notait des difficultés à la tâche d'arithmétique sans contrainte de temps en fin de deuxième primaire nous amenant à supposer un retard de développement de l'arithmétique traduit par des difficultés à se détacher des supports externes que sont les doigts à cause d'une difficulté à automatiser les procédures de calcul.

INTRODUCTION

Au quotidien, nous remarquons l'importance de maîtriser les mathématiques puisque nous sommes régulièrement au contact des chiffres et des nombres, par exemple, quand nous faisons nos courses ou nos comptes. Par conséquent les compétences numériques et arithmétiques doivent se développer efficacement tout au long de la vie.

À l'heure actuelle, de nombreuses études ont été menées pour mieux comprendre le développement de ces compétences chez les enfants d'âge préscolaire et scolaire ainsi que les facteurs favorables à l'apprentissage de celles-ci. Parmi ces facteurs, on compte notamment les doigts, avec les habiletés sensori-motrices qui y sont associées. Cependant, à ce jour, le débat persiste concernant l'implication des doigts dans le développement des compétences numériques et arithmétiques. Même si l'ensemble des études confirment le rôle fonctionnel et localisationniste des doigts dans l'arithmétique, très peu d'études longitudinales ont été menées afin d'éclaircir le rôle spécifique des habiletés digitales (sensori-motrices) dans le développement des compétences arithmétiques. Notamment, peu d'études ont analysé l'influence des habiletés motrices fines sur le développement de l'arithmétique, chez des enfants ayant un trouble développemental de la coordination. C'est dans ce cadre que notre étude s'inscrit puisque nous souhaitons étudier le rôle des doigts dans le développement des compétences arithmétiques chez des enfants tout-venant ou à risque de développer un trouble de la coordination.

Ce mémoire se décompose en cinq chapitres. Le premier consiste en une revue de la littérature qui permet d'introduire les concepts théoriques et les données actuellement disponibles dans la littérature scientifique. Ce chapitre contient trois parties dont la première se centre sur le développement classique de l'arithmétique chez l'enfant, la seconde s'intéresse au rôle que jouent les doigts dans ce développement et la troisième se penche particulièrement sur les enfants atteints d'un trouble développemental de la coordination. Le deuxième chapitre consiste à contextualiser nos questions de recherche et à établir nos hypothèses théoriques. Le troisième comporte la méthodologie employée pour réaliser la récolte des données auprès des enfants. Le chapitre suivant permet d'analyser statistiquement les résultats de l'étude. Enfin, nous discuterons de nos résultats en lien avec la littérature scientifique actuelle.

Chapitre 1

INTRODUCTION THÉORIQUE

PARTIE 1 : Développement typique des compétences numériques et arithmétiques chez l'enfant

L'objectif de cette première partie est de détailler le développement des compétences numériques et arithmétiques chez l'enfant typique, de ses premiers mois à la deuxième primaire. Le plan suit les étapes développementales du modèle de Krajewski et Schneider (2009) (Figure 1) qui se compose de trois niveaux de compétences qui s'acquièrent successivement : le niveau 1 correspondant aux compétences numériques de base (discrimination des quantités, comptage et dénombrement), le niveau 2 correspondant au concept de quantité-nombre (principe de cardinalité) et le niveau 3 correspondant à la compréhension des relations qu'entretiennent les nombres (début de l'arithmétique). Selon les auteurs, chaque niveau acquis, intégralement ou non, sert de point d'appui à l'enfant pour développer des compétences plus complexes ensuite. Notons que ces niveaux se recoupent et dépendent des variations interindividuelles.

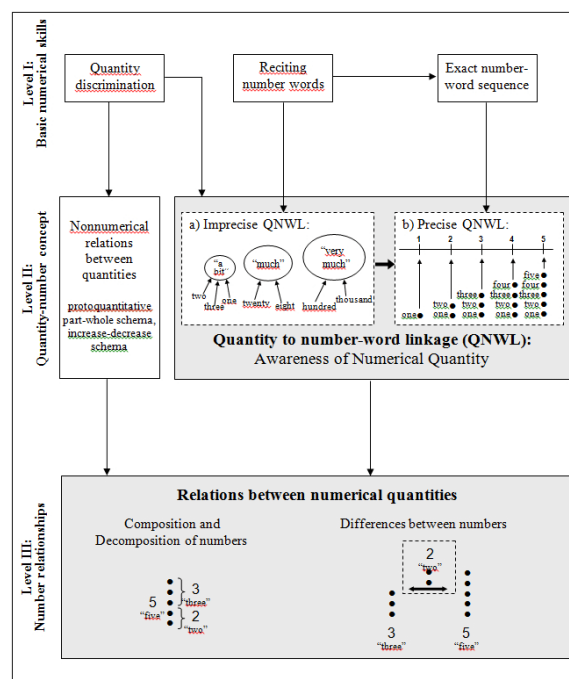


Figure 1 - Modèle développemental des compétences numériques précoces (Krajewski et Schneider, 2009)

1. Les précurseurs du développement arithmétique

a. Le système numérique approximatif (ou sens du nombre)

Le bébé est doté de compétences numériques précoces qui lui permettent de réaliser des traitements numériques approximatifs. Xu et Spelke (2000) ont mené une expérience auprès de nourrissons âgés de 6 mois pour tester s'ils étaient capables, ou non, de se représenter les nombres de manière approximative. En effet, les bébés étaient capables de distinguer visuellement une quantité de 8 éléments d'une quantité de 16 éléments. Selon les auteurs, ces résultats suggèrent que les bébés possèdent un véritable sens des nombres grâce à un système qu'on appelle « Approximate Number System » (ANS) ou système numérique approximatif. Il s'agit d'un système de représentations mentales et non verbales des grandeurs, qui permet de comprendre rapidement et intuitivement les nombres (Brannon, 2006; Dehaene, 2001). D'après Lipton et Spelke (2003), ces représentations numériques se précisent au cours du développement de l'enfant, les amenant à discriminer des quantités de plus en plus proches visuellement et auditivement. En outre, les bébés sont capables d'individualiser des groupes d'entités et de les traiter séparément pour les énumérer (Wynn et al., 2002). Finalement, il semblerait que ce système joue un rôle dans le développement des compétences arithmétiques puisque, dans leur étude longitudinale, Mazzocco, Feigenson et Halberda (2011) ont démontré que l'ANS mesuré à 3 ans prédisait les compétences en comptage, dénombrement et cardinalité à l'âge de 6 ans.

b. Le comptage verbal et le dénombrement

Pour apprendre à compter, les enfants vont devoir développer et utiliser la chaîne numérique verbale. Selon Wynn (1990), elle se développe à partir de 2 ans, lorsque l'enfant entre dans les activités langagières, et continue de se développer jusqu'à 8 ans. Pour l'auteur, l'enfant apprend à produire des « mots-nombres » ou « mots numériques » de manière incidente dans différents contextes de la vie quotidienne. L'enfant se rend alors compte que les mots « deux » et « cinq », par exemple, sont toujours utilisés dans le même contexte, ce qui l'amènera à créer une catégorie lexicale propre aux quantités. L'apprentissage de la chaîne numérique verbale se fait par l'intermédiaire de deux phases développementales distinctes : la phase d'acquisition et la phase d'élaboration (Fuson, 1988, cité par Gould, 2017).

Durant la phase d'acquisition, l'enfant de 2 ans apprend à énoncer les mots-nombres dans l'ordre. Selon Fuson, Richards et Briars (1982), la chaîne numérique verbale se compose alors de 3 parties distinctes énoncées par les enfants : une partie stable et conventionnelle (i.e. récitations répétées des mots-numériques « 1...2...3...4 » ; « 1...2...3...4 »), qui s'étend au fil du temps ; une partie stable et non conventionnelle (i.e. « 6...8...9 » ; « 6...8...9 ») ; et une partie non stable et non conventionnelle (i.e. « 14...16...13...5 » ; « 12...15...16...13 »). À ce stade, les mots sont un tout indifférencié, mais vers l'âge de 3 ans, l'enfant apprend à distinguer de mieux en mieux les mots-nombres et à les manipuler. Vient alors la phase d'élaboration qui se décompose en quatre niveaux de développement :

- 1- Niveau de la chaîne insécable où l'enfant récite les mots séparément mais n'est capable de compter qu'à partir de 1 ou de compter « jusqu'à ».
- 2- Niveau de la chaîne sécable où l'enfant peut compter entre les bornes (i.e. « jusqu'à » ou « à partir de »), compter à rebours ou identifier le nombre qui vient avant/après.
- 3- Niveau de la chaîne numérale où l'enfant considère les mots comme des unités au sens numérique et peut ainsi les compter, les mettre en correspondance, les ajouter et les soustraire.
- 4- Niveau de la chaîne terminale/bidirectionnelle où l'enfant peut compter à l'endroit, à rebours mais aussi compter N éléments à partir d'une borne ou encore compter de x à y pour dire combien d'éléments il y a.

Le développement du comptage se fait donc via le développement de la chaîne numérique verbale et est sous-tendu par 3 compétences (Potter & Levy, 1968) : la capacité à connaître les noms de chiffres dans le bon ordre, celle qui permet de ne compter qu'une seule et unique fois chaque élément et celle permettant de combiner les deux premières afin d'établir des relations entre les éléments d'une collection. Autrement dit, le comptage est l'aptitude à compter chaque élément d'un ensemble, à tour de rôle, et d'associer ces éléments à un mot-nombre et ce dans le bon ordre. La connaissance de la chaîne numérique verbale, ou de bonnes compétences en comptage verbal, est nécessaire à l'enfant pour aborder les tâches de dénombrement puisqu'il l'utilisera pour dénombrer les éléments d'une collection (Wynn, 1990).

Le dénombrement consiste à passer en revue les objets d'une collection afin de déterminer le cardinal précis de cette collection (Camos et al., 1999). Selon Gelman et Gallistel (1978) (cités par Camos, 1999), le dénombrement suit cinq principes que l'enfant doit intégrer. Le

premier est le principe de correspondance terme à terme où chaque élément de la collection qui est dénombré est associé à une seule et unique étiquette. Le second est le principe d'ordre stable où la séquence d'étiquettes est ordonnée et fixe. Le troisième est le principe de cardinalité où la dernière étiquette produite représente le nombre d'éléments qui se trouvent dans la collection (= cardinal). Le quatrième est le principe d'abstraction où l'enfant comprend que l'hétérogénéité, ou l'homogénéité de la collection n'influence pas le dénombrement. Par exemple, si on dépose devant l'enfant une pomme, une cuillère et une poupée, il devra comprendre qu'il doit dénombrer 3 éléments peu importe qu'ils soient différents. Enfin, le dernier est le principe de non-pertinence de l'ordre où l'enfant comprend que, peu importe l'ordre dans lequel il dénombre les éléments, cela n'impactera en rien le cardinal de la collection.

D'après Fischer (1981) (cité par Fischer, 1993), le dénombrement se finalise aux alentours de 5 ans et est loin d'être opérationnel. En effet, Wynn (1990, 1992) a mené deux expériences pour rendre compte du dénombrement chez les enfants en bas âge. La première consistait à leur demander de compter des objets puis de répondre à la question « combien ? ». Dans la deuxième, les enfants devaient donner à une marionnette N éléments. Dans les deux cas, les enfants, âgés d'au moins 3 ans et demi, dénombraient avant de répondre ou d'effectuer la tâche correctement. Par conséquent, l'auteur a remarqué que ce n'est pas parce que les enfants sont capables de répondre à la question « combien » qu'ils sont capables de créer une collection équivalente donc de comprendre à quoi correspond le dernier chiffre dénombré. Ce n'est que plus tard, que l'enfant commence à comprendre la signification de la cardinalité (Sarnecka & Carey, 2008).

c. Le principe de cardinalité

Le principe de cardinalité, c'est comprendre que le dernier mot-nombre prononcé, lors du dénombrement, correspond au nombre exact d'objets présents dans une collection (Gelman et Gallistel, 1978, cités par Camos, 1999). À travers la tâche de référence Give-N (« donne-moi n éléments »), Wynn (1992) a su déceler les différentes séquences de développement de ce principe. Cette tâche, comme énoncée plus haut, consiste à demander à l'enfant de donner N éléments à une poupée. Pour l'auteur, au niveau le plus précoce (vers 2 ans), l'enfant est qualifié de « renumeral-knower » puisqu'il n'est pas encore capable de distinguer la signification des différents chiffres qu'il prononce. Entre 2 ans et demi et 3 ans, l'enfant parvient à reconnaître

que « un » signifie « 1 » mais lorsqu'on lui demande de donner plus d'un objet, il ne comprend pas. Dans ce cas, on dit que c'est un « one-knower ». Progressivement, l'enfant parvient à comprendre la même chose pour « deux », puis « trois », puis « quatre », on le qualifie alors de « subset knower » (Le Corre & Carey, 2007). À partir du moment où l'enfant est capable de donner le nombre d'objets équivalent à quatre (vers 3 ans et demi), il semblerait qu'il parvienne à généraliser le principe de cardinalité à tous les mots numériques de sa plage de comptage (Sarnecka, 2021). Cependant, d'autres auteurs sont moins catégoriques, comme Rousselle et Vossius (2021) qui ont mis en évidence que l'acquisition du principe de cardinalité s'étalait sur une période bien plus longue qui s'étend jusqu'à environ 6 ans. Dans leur étude, certains enfants ne parvenaient pas à répondre à la tâche Give-N lorsque celle-ci comprenait un nombre d'objets supérieur à quatre. De plus, plusieurs d'entre eux obtenaient des performances instables pour certains mots-nombres. Cela a amené les auteurs à penser que les connaissances du cardinal des mots-numériques (grands ou petits) s'acquièrent nombre par nombre, de façon très progressive, et ne se généralisent donc pas du cardinal des petits nombres au cardinal des grands nombres.

Finalement, lorsque les enfants acquièrent ce principe, ils sont en mesure de comprendre que si on ajoute un objet à un ensemble, cela signifie avancer dans le comptage et si on enlève un objet, cela signifie reculer (Sarnecka et Carey, 2008). Selon Krajewski et Schneider (2009), la faculté de compter en avant et de compter en arrière est un bon prédicteur des habiletés arithmétiques supérieures.

2. Le développement des compétences arithmétiques

Une fois que les compétences numériques de base, citées ci-avant, sont installées, l'enfant va pouvoir s'appuyer sur ses connaissances en comptage, dénombrement et cardinalité pour entrer dans l'arithmétique (Krajewski & Schneider, 2009; Roesch & Moeller, 2015).

a. Les additions et les soustractions

Selon Clements et Sarama (2007), les jeunes enfants scolarisés en maternelle, commencent déjà à réaliser des problèmes arithmétiques simples tels que les additions et les soustractions. L'enfant est alors capable de comprendre que l'ajout d'objets à une collection agrandit la collection (addition) et que, inversement, la suppression d'objets engendre le rétrécissement d'une collection (soustraction).

Pour réaliser des additions, l'enfant développe, de concert, plusieurs stratégies de comptage verbal associées, ou non, à des objets concrets (ex. les doigts) (Shrager & Siegler, 1998). La première stratégie est le « Counting-All », qui consiste à commencer le comptage des deux opérandes à partir de 1 (ex. $3+2 = 1, 2, 3, 4, \underline{5}$). La deuxième stratégie est le « Counting-Max » où l'enfant commence à compter à partir de l'opérande le plus petit (ex. $3+2 = 2, 3, 4, \underline{5}$). Ces deux premières stratégies s'observent essentiellement en maternelle et sont considérées comme immatures et lentes (Baroody, 1987). La troisième stratégie, quant à elle, est plus efficace et économique et apparaît au début de la première année de primaire. Il s'agit du « Counting-Min », qui consiste à commencer à compter à partir de l'opérande le plus grand (ex. $3+2 = 3, 4, \underline{5}$). Entre la 1^{ère} et la 2^{ème} primaire, Geary et al. (1991) ont observé une transition dans l'utilisation des stratégies de calcul puisque les enfants passent de stratégies de comptage à des stratégies de récupération de faits arithmétiques, dont ils deviennent de plus en plus dépendants. Les faits arithmétiques sont des calculs simples stockés en mémoire à long terme (ex. les compléments de 10¹ ou addition des doubles) qui ne nécessitent pas l'utilisation de stratégies de comptage pour les résoudre (Laski et al., 2014). Au fil du temps, ces stratégies de récupération mûrissent et s'automatisent, amenant l'enfant à être de plus en plus rapide et efficace (Geary et al., 1991). Parallèlement, une autre stratégie sophistiquée de résolution se développe, il s'agit de la décomposition. Selon Laski et al. (2014), cette dernière consiste à transformer le problème d'origine en plusieurs petits problèmes simples en se basant notamment sur les faits arithmétiques (ex. $7+4$ devient $7+7 = 14 - 3 = 11$). Au fur et à mesure que l'enfant se familiarise avec les principes de calcul, il apprend à compter à partir du premier opérande, ou du plus grand, et forme ainsi des règles pour résoudre des combinaisons complexes (ex. $7+10 = 17$, donc $7+9 = 16$, ou $8+5 = 13$, donc $13 - 5 = 8$) (Baroody, 1999). En résumé, l'enfant utilise donc des stratégies peu efficaces au départ qui évolueront vers des stratégies plus automatisées et moins laborieuses menant à une réponse correcte. Entre 5 et 7 ans, il connaît et est donc capable d'utiliser plusieurs stratégies qu'il choisit d'utiliser en fonction du problème à résoudre et de ses connaissances préalables (Shrager & Siegler, 1998).

Le développement de la soustraction passe également par le développement de stratégies de résolution. Certains auteurs ont remarqué que les enfants utilisaient principalement deux stratégies distinctes pour résoudre des soustractions : le « Counting-Down » (compter à rebours) et le « Counting-Up » (Barrouillet et al., 2008; Carpenter & Moser, 1984). La première stratégie

¹ Savoir que $6+4 = 10$ sans avoir besoin de calculer.

consiste à compter à rebours à partir du premier opérande pour arriver à la solution (ex. $4-2 = 4, 3, 2 = 2$). La seconde, quant à elle, consiste à compter à partir du plus petit opérande pour arriver jusqu'au plus grand des deux et ainsi trouver la solution (ex. $4-2 = 2, 3, 4 = 2$). Le Counting-Down est la stratégie la moins efficace et la plus difficile, car elle demande des ressources cognitives de haut niveau, amenant ainsi l'enfant à être lent et imprécis dans ses réponses (Fuson & Fuson, 1992). Le Counting-Up est donc petit à petit privilégié en combinaison avec des stratégies employées pour la résolution d'addition (Steffe & von Glasersfeld, 1988). En effet, l'enfant ayant acquis des faits arithmétiques relatifs à de petites additions simples (ex. $3+2 = 5$), serait capable de s'appuyer dessus pour comprendre que $5-3 = 3$. Les procédures de calcul et les faits seraient alors dérivés de l'addition (Dehaene, 1992).

Pour que l'enfant puisse résoudre des additions et des soustractions, il est nécessaire qu'il puisse conserver et manipuler des informations via sa mémoire de travail (J. W. Adams & Hitch, 1997). En effet, les fonctions exécutives sont importantes pour basculer d'une stratégie à une autre (Fürst & Hitch, 2000).

b. Capacité associée : la mémoire de travail

D'après Baddeley (1992), la mémoire de travail fait référence à la capacité à stocker temporairement et à traiter simultanément des informations nécessaires à la réalisation de tâches cognitives complexes comme la compréhension, l'apprentissage et le raisonnement du langage. Elle serait constituée de 3 composants : l'administrateur central (contrôle attentionnel), le calepin visuospatial (manipulation des images visuelles) et la boucle phonologique (stocke et répète les informations vocales nécessaires à l'acquisition du vocabulaire). Toujours selon l'auteur, le contenu de la mémoire de travail se met à jour, en fonction des tâches à réaliser, de telle sorte que les anciennes informations stockées en mémoire à long terme se réordonnent ou sont exclues en faveur de nouvelles informations pertinentes. Dans leur méta-analyse, Friso-van Den Bos et al. (2013) mettent en évidence l'existence d'une relation positive et significative entre les performances mathématiques et chaque composant de la mémoire de travail. Cette dernière semble jouer un rôle important dans la récupération de faits arithmétiques et dans les procédures de comptage chez les enfants au début de l'apprentissage (Noël et al., 2004). Selon Geary, Hoard et Nugent (2012), la composante « administrateur central » prédirait la performance des enfants dans des tâches d'addition à un chiffre de la 1^{ère} à la 3^{ème} année de

primaire. De plus, elle permettrait à ces enfants de passer plus rapidement de stratégies de résolution simples (ex. compter) à complexes (ex. décomposition). Notons que le rôle des différents composants de la mémoire de travail dans les cognitions mathématiques dépend du stade d'apprentissage de l'enfant en termes de compétences mais aussi d'âge (Menon, 2016).

Généralement, la mémoire de travail intervient lors de la phase initiale de l'apprentissage mais son implication diminue à mesure que les procédures sont utilisées moins fréquemment et que les faits sont représentés dans la mémoire à long terme (Geary et al., 2004). Selon, David (2012), des difficultés au niveau de la mémoire de travail pourraient être à l'origine de difficultés à utiliser des stratégies abstraites comme la récupération de faits en mémoire à long terme. De plus, elle pourrait également expliquer des difficultés rencontrées au niveau des compétences de base en résolution de problèmes arithmétiques, comme cela l'a été démontré auprès d'enfants dyscalculiques (Fias et al., 2013; Geary et al., 2000; Shalev et al., 2005). Selon Geary et al. (2004), lorsque les enfants de première année de primaire font face à des problèmes d'addition complexes, ces derniers favorisent le comptage digital et verbal de manière sophistiquée (ex. utilisation de la méthode « min »). En effet, il arrive que les enfants utilisent leurs doigts afin d'alléger leur charge cognitive en mémoire de travail pour leur permettre de mieux performer dans des tâches numériques complexes comme les calculs mentaux (Alibali & DiRusso, 1999; Costa et al., 2011; Crollen & Noël, 2015). Mais lorsque l'enfant grandit, ses bonnes capacités en mémoire de travail lui permettent de faire moins d'erreurs de comptage des doigts et ainsi de faciliter le passage à la décomposition (Geary et al., 2004). Elle permettrait donc aux enfants âgés de 5 à 12 ans d'abandonner les supports externes (ex. les doigts) en faveur de stratégies mentales ou verbales lors de la réalisation de calculs (David, 2012).

Certains auteurs démontrent que l'utilisation des doigts peut indiquer la persistance d'un déficit au niveau de récupération de faits et correspondrait ainsi à une stratégie de secours lorsque les réponses ne peuvent pas être dérivées automatiquement ou par des manipulations mentales (Ostad, 1997). Geary et al (2004) ont en effet remarqué que les enfants ayant des difficultés au niveau des additions simples et complexes, avaient tendance à davantage utiliser le comptage des doigts et à commettre de nombreuses erreurs dues à l'absence de l'utilisation de stratégies efficaces. Il semblerait que cela soit lié, du moins en partie, à un déficit au niveau de la mémoire de travail concernant les élèves de première année de primaire. Dupont-Boime et Thévenot (2018) ont effectivement mis en évidence que les enfants de 6 ans (première année de primaire), ayant de faibles capacités en mémoire de travail, avaient tendance à tout compter

lorsqu'ils utilisaient leurs doigts dans des tâches d'addition. Autrement dit, ils se représentent les deux opérandes du calcul sur les doigts de façon laborieuse conduisant ainsi régulièrement à des erreurs. En revanche, ces mêmes auteurs ont également relevé que les enfants ayant des ressources élevées en mémoire de travail utilisaient aussi les doigts en combinaison avec des stratégies plus élaborées qui consistent à démarrer le comptage à partir du plus grand nombre (stratégie « min »). C'est également ce que Krenger et Thévenot (2024) ont déclaré à la suite de leur étude longitudinale sur des enfants âgés de 4 à 6 ans. Selon eux, l'utilisation des doigts demande beaucoup de ressources cognitives, notamment des capacités en mémoire de travail élevées.

En résumé, il semblerait que la mémoire de travail joue un rôle essentiel dans le développement des compétences arithmétiques, notamment dans l'utilisation de stratégies de comptage efficaces combinées à des stratégies digitales efficaces. Il se pourrait que les enfants en difficulté utilisent leurs doigts pour combler un déficit au niveau de leur mémoire de travail. Mais cette utilisation serait alors immature et combinée à des stratégies inefficaces.

PARTIE 2 : Utilisation des doigts dans le développement numérique et arithmétique de l'enfant

Depuis de nombreuses années, divers auteurs ont mis en évidence l'existence d'un lien entre les doigts et les cognitions numériques et arithmétiques (Gerstmann, 1940). Il semblerait qu'il y ait un lien structurel et fonctionnel entre ces deux types de traitement. Certains auteurs ont en effet mis en évidence l'existence d'aires cérébrales communes allouées aux doigts et aux cognitions numériques et arithmétiques (Andres et al., 2007, 2012). D'autres auteurs estiment que les doigts sont un outil utile et fonctionnel au développement des compétences numériques et arithmétiques (Crollen & Noël, 2015; Fayol & Seron, 2005). En 2015, Roesch et Moeller ont repris le modèle développemental de Krajewski et Schneider (2009) afin d'expliquer le rôle que jouent les doigts à chaque niveau de développement des compétences numériques et arithmétiques (Figure 2). Premièrement, lors du développement des compétences de base, les doigts seraient associés à un mot numérique spécifique. Ensuite, lors de l'acquisition du concept de cardinalité, chaque configuration de doigts peut correspondre au cardinal d'un ensemble. Finalement, lors du développement de la compréhension des relations numériques et des premiers calculs, les représentations des doigts permettraient de regrouper et de comparer des chiffres et des nombres. C'est donc sur la base de ce modèle que nous développerons cette partie.

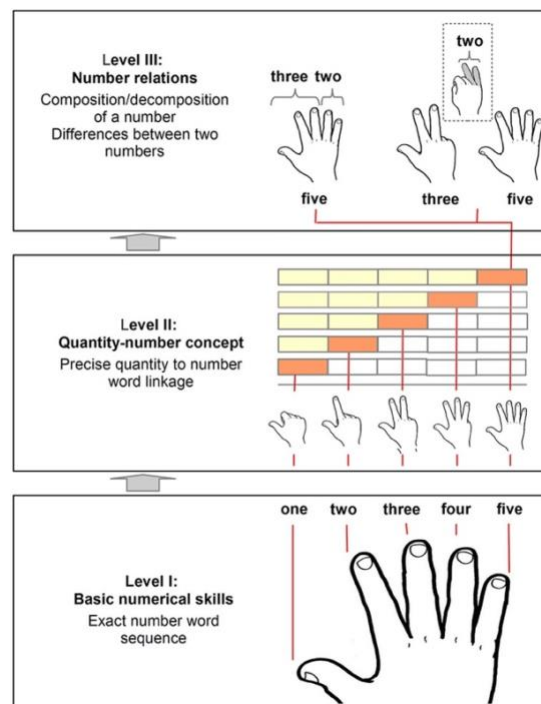


Figure 2 - Modèle de Roesch et Moeller (2015)

1. Le rôle des doigts dans le développement des compétences numériques

a. Le rôle des doigts dans l'acquisition du comptage et du dénombrement

Les doigts sont un outil de comptage naturellement accessible et universel qui permettrait à l'enfant de se représenter les mots numériques de manière concrète (Andres et al., 2008; Bender & Beller, 2012). Ainsi, lorsque l'enfant récite la chaîne numérique verbale, il y associe des gestes instinctifs et automatisés qui donneraient du sens à ses productions orales (Wiese, 2007). Ces représentations digitales seraient alors codées en fonction de la culture et des habitudes de comptage des doigts (Bender & Beller, 2011, 2012; Domahs et al., 2010). Si on prend l'exemple des occidentaux, la plupart d'entre eux commencent à compter avec leur main favorite (i.e. main droite pour les droitiers ; main gauche pour les gauchers) et associent le chiffre 1 à leur pouce, le chiffre 2 à leur index, le chiffre 3 à leur majeur, le chiffre 4 à leur annulaire et le chiffre 5 à leur auriculaire puis continuent en associant le chiffre 6 au pouce de l'autre main et ainsi de suite jusqu'à 10 (Lindemann et al., 2011) (Figure 3). Chaque doigt aurait alors une étiquette verbale associée dépendante de la culture.

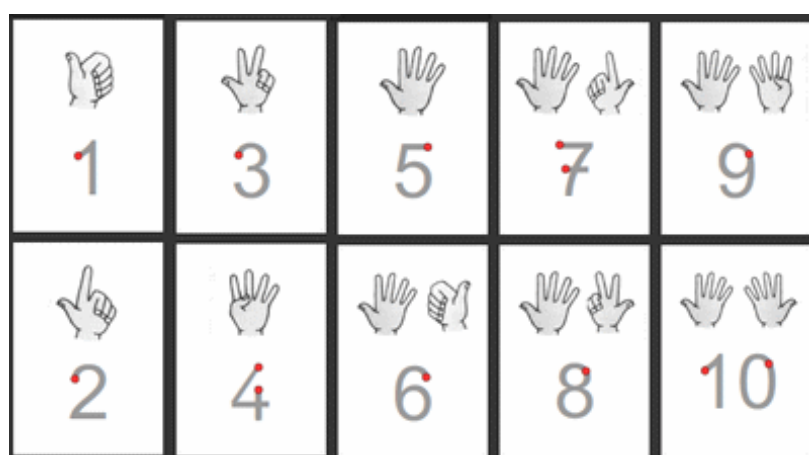


Figure 3 - Représentation conventionnelle des chiffres sur les doigts de 1 à 10 en Europe (JR, 2011). Affiches de 1 à 10 : doigts et chiffres. Les (bonnes) notes de JR. <https://bonnesnotes.jejoueeenclasse.fr/>

En partant de ce constat culturel, certains chercheurs se sont rendu compte que les doigts pouvaient ainsi intervenir dans l'acquisition des principes fondamentaux du dénombrement décrits par Gelman et Gallistel (1978) (cités par Alibali et DiRusso, 1999). En effet, les enfants utiliseraient leurs doigts pour pointer chaque élément d'une collection les amenant à faire correspondre le mot-nombre au doigt mobilisé lors du pointage (Alibali & DiRusso, 1999). Autrement dit, les doigts viendraient appuyer la compréhension du principe de correspondance

terme-à-terme². De plus, les doigts favoriseraient l'acquisition du principe d'ordre stable car chaque doigt de l'enfant est levé dans le même ordre et toujours associé au même mot-nombre (ex. le pouce est associé au « un ») (Wiese, 2003). Dans ce sens, Crollen et Noël (2015) ont démontré que les doigts pouvaient être utiles à des enfants de 5 ans lors de la réalisation d'une tâche de dénombrement sous contrainte. Pour cela, les chercheurs ont réparti les enfants en trois groupes expérimentaux. Le premier groupe pouvait réaliser la tâche à sa meilleure convenance, le second devait la faire en pressant une balle dans chaque main tandis que le troisième groupe devait la réaliser en pressant une balle avec ses pieds. Les enfants qui étaient privés de l'utilisation de leurs mains voyaient leurs performances être significativement inférieures par rapport aux enfants des deux autres groupes. Ceci est un argument en faveur de l'existence d'un lien fonctionnel entre les doigts et le dénombrement. Ainsi, les doigts permettraient de pointer les éléments d'une collection mais aideraient également les enfants à déterminer le nombre d'éléments présents dans cette collection (cardinal) à l'aide du levé successif de leurs doigts (Crollen et al., 2011).

b. Le rôle des doigts dans l'acquisition de la cardinalité

Pour rappel, le principe de cardinalité correspond au fait que l'enfant comprenne que le dernier mot-nombre prononcé équivaut à l'ensemble de la collection dénombrée (Gelman et Gallistel, 1978 cités par Camos, 1999). Tout comme pour le comptage, via la récitation de la chaîne numérique verbale, et le dénombrement, les doigts semblent favoriser l'acquisition du principe de cardinalité. Selon Di Luca et Pesenti (2008, 2011), la production de gestes digitaux aiderait l'enfant à entrer dans la cardinalité en créant des ponts entre les représentations digitales et le mot-nombre. En effet, des configurations digitales conventionnelles (canoniques), ayant un statut sémantique spécifique, se forment et sont finalement traitées comme des stimuli symboliques, de la même manière que les chiffres arabes (Figure 4) (Luca et al., 2010). Ces configurations digitales encodées en mémoire à long terme joueraient alors un rôle important dans la construction, l'accès et l'utilisation sémantique des nombres puisqu'elles permettent à l'enfant d'établir des relations entre un symbole oral et un symbole numérique concret (Guedin et al., 2018). Autrement dit, l'enfant devient capable de combiner des configurations de doigts à des valeurs cardinales précises.

² Chaque élément de la collection est associé à un seul mot-nombre.



Non symbolique	Symbolique
	 <div data-bbox="989 280 1149 353" style="border: 1px solid black; padding: 5px; display: inline-block;">« trois »</div>

Figure 4 - Représentation non symbolique et symbolique du chiffre 3

Cependant, Nicoladis et al. (2010), ont réalisé une étude auprès d'enfants âgés de 2 à 11 ans afin de savoir si les gestes numériques sont plus faciles à comprendre et à utiliser que les mots-nombres pour nommer le nombre d'éléments de la collection. Pour cela, ils ont utilisé la tâche « donne-moi » imaginée par Wynn (1992) qui consiste à demander à l'enfant de donner N objets (ex. donne-moi 5 poissons). Les résultats montrent que les enfants sont généralement plus précis quand ils utilisent les mots-nombres plutôt que les gestes, surtout chez les plus âgés. Selon les auteurs, les gestes n'aideraient pas les enfants à répondre correctement à la tâche et ne correspondraient donc pas à un outil indispensable à la compréhension du nombre et à l'acquisition du principe de cardinalité. À l'heure actuelle, le lien entre les doigts et le principe de cardinalité n'est pas clairement établi puisque Gunderson et al. (2015) ont obtenu des résultats contradictoires avec ceux de l'étude de Nicoladis et al. (2010). Les auteurs ont voulu mettre en évidence que les enfants, âgés de 3 à 5 ans et n'ayant pas encore acquis le principe de cardinalité, pouvaient communiquer et accéder à leurs représentations numériques à l'aide des gestes avant la parole. Pour cela, ils ont également administré une tâche « donne-moi » et ont observé si l'enfant utilisait plus facilement le mot-nombre ou le geste-nombre pour communiquer le nombre d'éléments présents dans une petite collection (1, 2, 3 ou 4 objets) ou dans une grande collection (5 ou 10 objets). Les résultats ont effectivement démontré que les enfants qui n'avaient pas acquis le principe de cardinalité étaient plus précis dans leurs réponses à l'aide des gestes. Les doigts semblent donc être un outil utile à l'enfant lorsque ce dernier n'a pas encore acquis le symbole verbal de la quantité. En revanche, selon les auteurs, si l'enfant est capable de produire le mot-numérique, il n'a pas besoin d'utiliser les gestes pour communiquer le nombre d'éléments de la collection en question.

Le débat sur l'existence, ou non, d'un rôle fonctionnel des doigts dans le développement des compétences numériques est toujours d'actualité. On ne sait toujours pas si les doigts peuvent être considérés comme indispensables ou comme outils d'aide.

2. Le rôle des doigts dans le développement des compétences arithmétiques

Une fois que l'enfant a acquis la chaîne numérique verbale, le dénombrement et le principe de cardinalité, il va pouvoir faire son entrée dans l'arithmétique (Figure 2) (Roesch & Moeller, 2015).

Les enfants utilisent également leurs doigts pour résoudre des opérations arithmétiques basiques (Geary, 2004). En effet, les doigts sont un matériel concret, un échafaudage naturel, qui soutient la réflexion et le raisonnement de l'enfant lorsqu'il fait face à des problèmes arithmétiques (Jordan et al., 2008). Roesch et Moeller (2015) ont effectivement remarqué que les doigts pouvaient être utiles à l'enfant lors de l'acquisition des premiers concepts arithmétiques que sont l'addition et la soustraction. En effet, les représentations digitales qu'il possède lui permettraient de composer (3 et 2 égalent 5), de décomposer (5 est décomposable en 3 et 2) et de déterminer la différence qu'il existe entre deux nombres (2 est la différence entre 3 et 5). Par exemple, lorsqu'il additionne, l'enfant lèverait son pouce, son index et son majeur pour traduire le chiffre 3 et à cela il ajouterait l'annulaire et l'auriculaire afin d'arriver au résultat qui est 5. Baroody (1987) a montré que de nombreuses stratégies avec les doigts étaient effectivement mises en place par l'enfant à son entrée dans le calcul simple (additions, soustractions) mais cela est utile seulement pour les calculs dont la somme était inférieure ou égale à 10. En effet, pour les calculs plus complexes, la stratégie des doigts s'avère chronophage et moins utile donc elle doit être abandonnée au profit de calculs mentaux basés sur les faits arithmétiques (Farrington-Flint et al., 2009). Dans leurs nombreuses études, Jordan et ses collaborateurs (1992, 1994, 2008) confirment que plus l'enfant est âgé, plus l'utilisation des doigts est associée à de moins bons résultats en calcul. C'est-à-dire que la fréquence d'utilisation des doigts est un prédicteur solide et fiable de la précision des combinaisons de nombres en maternelle mais à la fin de la deuxième primaire, plus les doigts sont utilisés moins les réponses sont précises. De plus, les erreurs de comptage des doigts sont plus fréquentes lorsque les combinaisons amènent à des totaux supérieurs à 10. Cela suggère que l'enfant passerait naturellement d'un système de comptage des doigts (efficace au début) à un système de récupération de faits arithmétiques sans support digital car plus économique. En revanche, les doigts peuvent tout de même servir de stratégie de secours lorsque les solutions ne sont trouvées ni automatiquement, ni via le calcul mental (Crollen & Noël, 2015). Dans ce cas, cela peut traduire de problèmes de récupération de faits en mémoire à long terme ou d'un trouble d'apprentissage en mathématiques.

Le comptage des doigts semble être un tremplin utile aux compétences arithmétiques mais inefficace donc petit à petit laissé de côté en faveur de représentations numériques plus élaborées et abstraites. Notons que pour exécuter les gestes de comptage (ouverture de la main) et les gestes numériques à valeur cardinale (levée du pouce, de l'index et du majeur), les enfants doivent recourir aux habiletés sensori-motrices regroupant les gnosies digitales et les habiletés motrices fines (Barrocas et al., 2020).

3. Le rôle des habiletés sensori-motrices dans le développement des compétences numériques et arithmétiques

a. Les gnosies digitales

Les gnosies digitales correspondent à la capacité d'identifier et de discriminer les doigts suite à une stimulation tactile non visible (Noël, 2005). C'est en 1940 que Gerstmann met en avant, pour la première fois, l'existence d'un lien probable entre les gnosies digitales et les habiletés numériques et arithmétiques chez des adultes cérébrolésés. Dans leur étude longitudinale, Fayol, Barrouillet, Marinthe (1998) et Noël (2005) ont cherché à s'assurer qu'il existait bel et bien un lien entre les gnosies digitales et les performances numériques et arithmétiques chez des enfants de leur 3^{ème} maternelle à leur 1^{ère} primaire. Ils ont ainsi mis en évidence que les performances aux tâches de gnosies étaient un meilleur prédicteur des performances numériques et arithmétiques précoces par rapport à certains tests d'intelligence. D'après Reeve et Humberstone (2011), les gnosies digitales et le comptage des doigts dans le cadre de l'arithmétique se développent conjointement entre 5 et 7 ans. Selon eux, les gnosies et la mémoire de travail prédiraient de façon indépendante l'utilisation des stratégies de comptage et les capacités de calcul des enfants. Il semblerait que les enfants qui ont de bonnes gnosies digitales développent plus rapidement et efficacement des stratégies de comptage sur les doigts et ainsi obtiennent de meilleurs résultats en arithmétiques (Michaux et al., 2013). Certains aspects de l'arithmétique, comme les faits arithmétiques, seraient liés au niveau neuronal à la gnose des doigts puisque des zones cérébrales visuospatiales liées au traitement des nombres s'activent pour l'addition et la soustraction (Soylu, Raymond, et al., 2018). Gracia-Bafalluy et Noël (2008) ont cherché à savoir si le fait d'entraîner les gnosies digitales chez les enfants de 1^{ère} primaire améliorerait leurs performances arithmétiques. Ils ont effectivement relevé une amélioration des performances arithmétiques à la suite de l'intervention. De même, dans leur étude longitudinale, Penner-Wilger et al. (2007) ont remarqué que les enfants ayant de

meilleures gnosies digitales au départ étaient ceux qui obtenaient les meilleurs résultats aux tâches arithmétiques. Ainsi, elles seraient liées à la fois à la connaissance du système numérique mais aussi aux compétences en calcul. Cependant, les relations qu'entretiennent les gnosies et les habiletés arithmétiques ne sont pas clairement établies dans la littérature puisque de nombreux autres auteurs n'ont pas réussi à prouver l'existence d'une corrélation, ou alors très faible. C'est le cas notamment de Wasner et al. (2016) qui ont mis en évidence un lien très faible entre les gnosies digitales et les performances d'addition et de soustraction en 1^{ère} année de primaire. De plus, dans l'étude de Long et al. (2016) et de Newman (2016), les résultats indiquent que les gnosies digitales ne sont pas liées avec les compétences numériques de comptage et arithmétique d'addition, chez les plus jeunes enfants. Par contre, elles le seraient très faiblement, chez les plus âgés. Ce serait alors la représentation des configurations digitales qui prédirait davantage les compétences numériques plutôt que les gnosies digitales puisque dans l'étude de Van Rinsveld et al. (2020), ces dernières n'étaient en lien avec aucune compétence numérique, y compris de comptage.

D'autres habiletés au niveau des doigts peuvent jouer un rôle dans le développement de l'arithmétique comme les habiletés motrices fines. Les gnosies digitales et les habiletés motrices fines semblent d'ailleurs être en lien puisque de meilleures gnosies sont associées à de meilleures habiletés motrices fines, qui sont elles-mêmes nécessaires au comptage des doigts et au dénombrement (Soylu et al., 2018). De la même manière que les gnosies digitales, les habiletés motrices fines contribuent au développement des compétences numériques et arithmétiques (Penner-Wilger et al., 2007).

b. Les habiletés motrices fines

Les habiletés motrices fines (HMF), ou dextérité digitale/manuelle, correspondent à des mouvements fins et précis sollicitant de petits muscles impliqués dans le fonctionnement des extrémités du corps telles que les mains et les doigts (Gallahue & Ozmun, 2005). Ces habiletés pourraient être impliquées dans le développement des compétences numériques et arithmétiques. En 2006, la première étude longitudinale, cherchant à rendre compte du lien existant entre les habiletés motrices fines et les compétences numériques précoces (sens des nombres, opérations³) voit le jour. Son et Meisels (2006) mettent alors en évidence que les HMF prédisent le développement des habiletés numériques précoces chez 12 000 enfants, entre leur

³ Additions, soustractions, multiplications et divisions.

troisième maternelle et leur première primaire. Un an plus tard, Luo, Jose, Huntsinger et Pigott (2007) observent les mêmes résultats chez 10 000 enfants. Pour évaluer les HMF, ils ont utilisé la même méthodologie, à savoir la réalisation de tâches de manipulation d'objets tels que le pegboard⁴ ou l'enfilage de perles, par exemple. Par la suite, d'autres auteurs établissent que les HMF sont liées aux compétences numériques basées sur les doigts telles que le comptage, le dénombrement et la compréhension de la cardinalité (U. Fischer et al., 2018, 2022). Ainsi, les enfants ayant de meilleures habiletés motrices fines réussiraient mieux à se représenter les nombres avec les doigts et, par conséquent, à avoir de meilleures performances dans des tâches de comptage des doigts (Suggate et al., 2017). Concernant l'arithmétique, Barnes et al. (2011) ont cherché à savoir si les HMF en maternelle étaient de bons prédicteurs du développement des compétences arithmétiques 2 ans plus tard, chez des enfants atteints de Spina Bifida⁵. En effet, les enfants ayant de meilleures HMF se voyaient être plus performants aux tâches de comptage, de cardinalité, d'additions et de soustractions. Plus tard, Asakawa et Sugimura (2014) arrivent aux mêmes conclusions puisque, dans leur étude longitudinale, la dextérité digitales en début de maternelle prédisait les compétences en calculs en primaire. Selon eux, il existe une relation constante entre la dextérité des doigts et les compétences en calcul tout au long de la petite enfance. Cette relation se construit avant l'entrée à l'école et grandit entre 3 et 5 ans. C'est également ce qu'ont observé Van Rooijen et al. (2016) chez des enfants plus âgés entre leur première primaire et leur troisième primaire. En effet, la motricité fine de première primaire prédisait les performances en calcul de deuxième primaire, au même titre que la mémoire de travail et le comptage. De plus, la dextérité manuelle et la mémoire de travail étaient des précurseurs uniques des compétences arithmétiques précoces tout au long du développement, contrairement au comptage.

À l'heure actuelle, il existe peu d'études qui permettent de clarifier le rôle des composantes motrices (gnosies digitales et HMF) dans le développement des compétences numériques et arithmétiques. Penner-Wilger et al. (2007) ont observé que chacune d'entre elles prédisait de manière unique et significative la connaissance du système numérique et les compétences en calcul. Dans l'étude, les enfants qui avaient de meilleures HMF étaient avantagés dans les procédures de comptage et/ou de résolution de calculs. Cependant, on ne sait pas laquelle des deux composantes motrices est la plus prédictive du développement arithmétique.

⁴ Tâche de référence permettant d'évaluer les HMF (placer des chevilles dans des trous positionnés 3x4).

⁵ Anomalie congénitale : défaut de fermeture de la colonne vertébrale dû à un mauvais développement de la moelle épinière.

PARTIE 3 : Le développement arithmétique chez les enfants ayant de faibles habiletés motrices fines

Comme nous venons de le voir, les doigts joueraient un rôle important dans le développement des compétences arithmétiques chez les enfants tout-venant. Dans cette dernière partie, nous aborderons l'impact des habiletés motrices fines sur les compétences arithmétiques, dans le cadre d'un trouble développemental de la coordination.

1. Caractéristiques du trouble développemental de la coordination

Le terme « Developmental Coordination Disorder (DCD) » fait son apparition, pour la première fois, en 1994 au terme d'un consensus d'experts internationaux. Le terme anglais fut traduit par « Trouble Développemental de la Coordination (TDC) » dans la dernière version française du Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-5, APA, 2015) (Albaret et al., 2019). Selon l'American Psychiatric Association (APA, 2013), l'enfant atteint d'un TDC présente des difficultés spécifiques à la motricité fines et/ou globale qui impactent son bon fonctionnement dans des activités de la vie quotidienne telles que boutonner, attacher ses lacets, écrire ou encore faire du sport par exemple (Barnhart et al., 2003). Ce trouble impacte également la réussite scolaire puisqu'il est souvent associé à des soucis moteurs, cognitifs, sociaux et psychologiques (Dewey et al., 2002; Miyahara & Möbs, 1995; APA, 2013).

Quatre critères ont été établis dans le DSM-5 afin d'identifier et de diagnostiquer le trouble (APA, 2015 cité par Blank et al., 2019). Premièrement, l'enfant doit obtenir des performances nettement inférieures au niveau attendu pour son âge dans des tâches de coordination motrice (maladresse, imprécision et lenteur). Dans un second temps, ces difficultés doivent interférer significativement et de façon persistante avec les activités de la vie quotidienne impactant ainsi les performances scolaires, les activités professionnelles, les loisirs et les jeux. Troisièmement, les symptômes doivent apparaître durant la période développementale précoce. Enfin, tout ceci ne doit pas être expliqué par un handicap intellectuel, une déficience visuelle ou une affection neurologique. Notons que ce trouble touche entre 5 et 7% des enfants à prédominance masculine et qu'il persiste jusqu'à l'âge adulte (Asonitou et al., 2012; Cardoso et al., 2014; Kirby et al., 2008; Lingam et al., 2009).

2. Profil cognitif du trouble développemental de la coordination

a. Les cognitions mathématiques chez l'enfant avec TDC

Comme nous l'avons vu précédemment, le TDC peut être associé à divers troubles tels que des difficultés attentionnelles, des compétences sociales moindres ou encore des difficultés au niveau de la lecture et de l'orthographe (Asonitou et al., 2012; Bernardi et al., 2018; Biotteau et al., 2019; Lingam et al., 2010). Le trouble développemental de la coordination peut également être associé à des difficultés dans les domaines numériques et arithmétiques des mathématiques. En effet, Gomez et al. (2015) ont observé que les enfants, âgés de 7 à 10 ans, atteints d'un TDC rencontraient des difficultés à traiter les nombres symboliques et non symboliques probablement dû à un dysfonctionnement du système de représentations approximatives des grandeurs (ANS). Ces enfants étaient moins précis et plus lents dans des tâches d'estimation, de comparaison de quantités, de comptage et d'additions à un chiffre. Selon Gomez et Huron (2020), ce serait un dysfonctionnement oculomoteur qui réduirait les capacités des enfants à suivre les cibles en parallèle du pointage et qui impacterait indirectement leurs capacités de comptage. Comme nous l'avons vu précédemment, les compétences numériques de base sont nécessaires au développement de compétences arithmétiques plus complexes (cf. Figure 1). Ainsi, les difficultés rencontrées au niveau des compétences numériques de base, tel que le comptage, peuvent impacter négativement le développement des compétences arithmétiques ultérieures (Krajeswski et Schneider, 2009). Pieters et al. (2012) ont d'ailleurs remarqué que des enfants avec TDC de 9 ans obtenaient de moins bons résultats en matière de récupération de faits arithmétiques et de calcul procédural, comparativement à des enfants sans TDC. Pour les auteurs, il s'agissait d'un retard de développement, et non d'un déficit, qui variait entre 1 et 2 ans selon le degré de sévérité du trouble.

Dans leur revue systématique et méta-analyse, Subara-Zukic et al. (2022) ont synthétisé les résultats d'études expérimentales qui caractérisaient les fondements neurocognitifs du TDC. Les enfants atteints d'un TDC possèderaient des difficultés d'intégration visuo-motrice qui contribueraient à leur tour aux difficultés de coordination motrice, particulièrement dans des tâches qui nécessitent un couplage œil-membre, comme le comptage associé au pointage par exemple (Adams et al., 2014; Deconinck et al., 2006; Wilson et al., 2013). Selon certains auteurs, ils rencontreraient des difficultés à automatiser leurs schémas moteurs les amenant à contrôler leurs mouvements volontairement de façon lente et non efficace (Adams et al., 2014;

Gama et al., 2016; Visser, 2003). Schott et al. (2016), ont d'ailleurs mis en évidence que les enfants atteints de TDC auraient un déficit des fonctions exécutives qui elles-mêmes prennent en charge ce mode de contrôle volontaire du mouvement et interviennent lors de situations de double-tâche en inhibant et en déplaçant l'attention allouée.

b. Profil attentionnel et mnésique chez l'enfant avec TDC

Les tâches mettant en jeu les habiletés motrices fines (ex. comptage des doigts) nécessiteraient davantage de ressources attentionnelles chez les enfants atteints de TDC, notamment lors de situations de double tâche (Laufer et al., 2008). Cependant, la littérature n'est actuellement pas en mesure de le confirmer. En effet, d'autres auteurs ont remarqué que les ressources attentionnelles allouées à l'utilisation des habiletés motrices fines, surtout lors d'une double tâche, chez des enfants avec TDC étaient en quantité similaire à celles des enfants sans TDC (Krajenbrink et al., 2023). En revanche, aux troubles moteurs s'ajoutent régulièrement des faiblesses au niveau de la mémoire de travail (Alloway & Archibald, 2008). Or, pour rappel, Van Rooijen et al. (2016) ont mis en évidence le caractère prédictif et unique de la mémoire de travail et des habiletés motrices fines dans le développement de l'arithmétique. Ainsi, les enfants avec TDC peuvent se retrouver doublement pénalisés par leurs troubles moteurs et mnésiques (Rigoli et al., 2013).

Neveu, Schwartz et Rousselle (2024) ont cherché à explorer la fonctionnalité du comptage des doigts chez des enfants de 8 ans atteints de TDC. Les auteurs ont ainsi remis en question l'impact des troubles moteurs sur les performances numériques de comptage puisque la mémoire de travail expliquait la plus grande part de la variance des résultats, contrairement à la motricité fine. Ces résultats vont dans le sens de ceux obtenus par Startori et al. (2022) qui ont mis en évidence que les fonctions exécutives, dont la mémoire de travail, prédisaient davantage les compétences numériques et arithmétiques chez des enfants avec TDC âgés de 8 à 9 ans. Pour aller plus loin, Dionne et al. (2024) ont cherché à rendre compte de la fréquence et de la nature des difficultés mathématiques chez des enfants avec TDC scolarisés de la 1^{ère} à la 6^{ème} primaire. Ils se sont aperçus que les capacités motrices n'étaient pas associées aux capacités numériques et arithmétiques. Les compétences visuo-attentionnelles expliquaient davantage les performances obtenues par les enfants aux tâches de numération et de résolution de problèmes. Ceci rejoint les résultats de l'étude d'Alloway (2011) puisque les enfants avec TDC avaient des performances en mémoire de travail visuo-attentionnelle moindres.

SYNTHESE

Les compétences numériques se développent chez l'enfant, dès son plus jeune âge, bien avant son entrée à l'école. Elles fondent le socle d'une pyramide de compétences arithmétiques qui se complexifient au fur et à mesure du développement de l'enfant.

Au début de son développement, l'enfant apprend à réciter une suite de mots-nombres qui constitue la chaîne numérique verbale. Cette compétence lui sert alors de base pour développer ses habiletés de comptage et de dénombrement, qui, à leur tour, lui permettront de dire combien d'éléments sont présents dans une collection. Pour ce faire, il est nécessaire que l'enfant intègre le principe de « cardinalité » qui lui permet de comprendre que la dernière étiquette produite oralement représente le nombre d'éléments qui se trouvent dans une collection, aussi appelé « cardinal » d'une collection. Il s'agit là d'un plus haut niveau de compétences numériques qui soutient le développement de compétences arithmétiques ultérieures. Avant même son entrée à l'école, l'enfant parvient à réaliser des problèmes arithmétiques simples tels que les additions et les soustractions. Pour les réaliser, il emploie plusieurs stratégies de comptage verbal, plus ou moins efficaces, qui sont petit à petit abandonnées pour des stratégies mnésiques de récupération de faits arithmétiques, plus efficaces. Cependant, pour que l'enfant puisse réaliser ces calculs, il doit être capable de conserver et de manipuler les informations utiles grâce à sa mémoire de travail. C'est d'ailleurs pour cela que plusieurs études ont mis en évidence le rôle important que joue la mémoire de travail dans le développement de l'arithmétique. Si jamais l'enfant possède de faibles compétences en mémoire de travail, il peut se trouver en difficulté pour réaliser des calculs et avoir recours à ses doigts pour contourner ce problème.

L'utilisation des doigts dans le développement des mathématiques est de plus en plus documentée mais les connaissances à ce sujet restent encore floues. Ces derniers interviendraient et soutiendraient l'apprentissage des concepts numériques puisqu'il s'agit d'un matériel concret facilement accessible. En effet, le comptage et le dénombrement seraient soutenus par l'utilisation des doigts à l'aide du pointage de chaque élément en parallèle de l'énonciation du mot-nombre. Cela permettrait à l'enfant de garder une trace de ce qui a déjà été compté et de se représenter les nombres par des configurations digitales construites culturellement. Les doigts permettraient ainsi à l'enfant de passer de représentations non symboliques du nombre à des représentations symboliques (chiffre arabe). Notons que leur rôle dans le développement du principe de cardinalité fait encore débat dans la littérature.

L'utilisation des doigts dans le développement de l'arithmétique a, par ailleurs, été davantage documentée. En 2015, Roesch et Moeller établissent un modèle qui intègre les doigts dans l'acquisition des additions et des soustractions. Les représentations digitales que l'enfant possède lui permettent ainsi de composer, de décomposer et de déterminer la différence existante entre deux nombres. Il emploie alors de nombreuses stratégies avec les doigts pour acquérir ces premiers concepts arithmétiques qui doivent être abandonnées au profit de calculs mentaux, plus efficaces. Si l'utilisation des doigts persiste, cela peut être un marqueur de difficultés en mathématiques ou au niveau de la récupération des faits arithmétiques en mémoire à long terme. L'ensemble des gestes digitaux produits par l'enfant nécessitent le recours à des habiletés sensori-motrices telles que les gnosies digitales et les habiletés motrices fines. Selon la littérature, il existerait un lien fonctionnel entre les gnosies digitales et les compétences arithmétiques, notamment grâce au rôle qu'elles jouent dans l'établissement des représentations digitales des enfants. De même, les habiletés motrices fines semblent utiles au développement des habiletés arithmétiques, puisqu'elles permettraient à l'enfant de développer des stratégies efficaces de calcul digital. Cependant, peu d'études sont capables d'éclaircir le lien qu'entretiennent les gnosies digitales et les habiletés motrices fines et laquelle de ces deux capacités prédit le mieux les compétences arithmétiques chez l'enfant.

Le trouble développemental de la coordination permet d'éclaircir le lien qu'entretiennent les habiletés motrices digitales avec le développement de l'arithmétique. En effet, il s'agit d'un trouble neurodéveloppemental chronique qui touche les mouvements moteurs fins et qui se traduit par des soucis de planification, d'anticipation et d'automatisation de ces mouvements. Les enfants atteints d'un trouble développemental de la coordination auraient des difficultés motrices mais également cognitives, sociales et psychologiques. Ils possèderaient diverses difficultés au niveau attentionnel mais aussi au niveau du langage écrit et des mathématiques. À l'heure actuelle, peu d'études se sont intéressées aux difficultés mathématiques rencontrées chez des enfants, atteints de ce trouble. Il semblerait que les enfants avec TDC soient plus lents et moins précis dans des tâches d'estimation, de comptage, d'additions, de soustractions et de calcul procédural. En revanche, rien n'indique que les habiletés motrices fines jouent un rôle explicatif de ces difficultés. À de nombreuses reprises, la mémoire de travail semble jouer un rôle plus important que la motricité fine dans les difficultés rencontrées par ces enfants en mathématiques.

Chapitre 2

QUESTIONS DE RECHERCHE

HYPOTHÈSES

Pour rappel, ce mémoire s'inscrit dans une étude longitudinale réalisée sur trois ans, entre mars 2021 et avril 2023. L'objectif principal de ce travail est d'éclaircir le rôle que jouent les doigts dans le développement des compétences arithmétiques chez des enfants tout-venant, ou à risque de développer un trouble développemental de la coordination, de leur début de première primaire à leur fin de deuxième primaire. Pour cela, nous nous demanderons d'abord si les habiletés motrices prédisent les compétences arithmétiques puis nous chercherons à savoir quelles stratégies emploient les enfants à risque de développer un trouble développemental de la coordination et comment ces stratégies évoluent avec le temps.

Question 1 : Habiletés digitales et compétences arithmétiques

Rappelons que, pour recourir à leurs doigts lors du comptage, les enfants doivent développer des habiletés digitales telles que les gnosies digitales et les habiletés motrices fines (Barrocas et al., 2020). Actuellement, le lien qui régit chacune de ces deux habiletés avec les compétences arithmétiques fait encore débat. Certains auteurs défendent l'existence d'un lien fonctionnel (Fayol et al., 1998; Noël, 2005) et/ou structurel (Soylu et al., 2018) entre les gnosies digitales et les compétences numériques et arithmétiques lors de la petite enfance. Cependant, d'autres auteurs sont moins catégoriques quant à la force de ce lien qui était soit très faible voire inexistant dans leurs études (Long et al., 2016; Newman, 2016; Wasner et al., 2016). Concernant les habiletés motrices fines, elles joueraient un rôle dans le développement des compétences numériques du début de la maternelle à la première année de primaire (Luo et al., 2007; Son & Meisels, 2006). Plus précisément, elles seraient significativement liées aux activités de comptage, de dénombrement et à la compréhension de la cardinalité (U. Fischer et al., 2018, 2022). En revanche, leur rôle dans le développement arithmétique reste peu documenté. Les études longitudinales les plus récentes sur le sujet sont celles d'Asakawa et Sugimura (2014) et de Van Rooijen et al. (2016), qui ont pu établir que la dextérité manuelle prédisait les

compétences en calcul obtenues plus tard dans le développement. Ainsi, chacune des deux composantes des habiletés sensori-motrices semble être en lien avec les compétences arithmétiques mais aucune étude ne permet aujourd'hui de dire laquelle des deux est la plus prédictive du développement arithmétique et à quel moment elle l'est. De plus, très peu d'études citées prenaient en compte la mémoire de travail comme variable pouvant influencer le caractère prédictif des habiletés digitales sur les compétences arithmétiques. Or, plusieurs résultats ont prouvé que la mémoire de travail jouait un rôle important dans le développement des compétences arithmétiques notamment dans la récupération de faits arithmétiques et dans les procédures de comptage au début de l'apprentissage (Noël et al., 2004).

Dans ce cadre, il nous semblait important d'éclaircir la part explicative de chacune de ces compétences digitales sur les compétences arithmétiques d'un point de vue développemental. Cependant, nous tenons à inclure la mémoire de travail afin de s'assurer de la véracité de la prédiction des habiletés digitales sur les compétences arithmétiques. Ainsi, notre première question de recherche est la suivante : « **Les habiletés digitales (gnosies digitales et habiletés motrices fines) en début de première primaire prédisent-elles les compétences arithmétiques en fin de deuxième primaire, indépendamment de la mémoire de travail ?** ». Afin de répondre à cette question, nous avons établi trois sous-questions : « *Les enfants ayant de meilleures habiletés sensori-motrices en début de première primaire obtiennent-ils de meilleures performances à la tâche de récupération de faits arithmétiques en fin de deuxième primaire ?* » ; La deuxième est la même mais concerne cette fois-ci la tâche d'arithmétique sans contrainte de temps qui nécessite l'emploi de stratégies de calcul pour réaliser des additions et des soustractions comportant un ou deux chiffres ; Enfin, « *Laquelle des deux habiletés digitales prédit le mieux les compétences arithmétiques au fil du développement de l'enfant ?* ».

Au vu des contradictions observées dans la littérature, on ne sait pas réellement à quoi nous attendre. On peut supposer que les gnosies digitales prédiront les résultats obtenus aux deux tâches d'arithmétique en fin de deuxième primaire ou alors bien plus tardivement dans le développement, comme l'a suggéré Newman (2016). Concernant les habiletés motrices fines, on peut s'attendre à ce que, celles évaluées en début de première primaire, prédisent les compétences arithmétiques en fin de deuxième primaire (Son & Meisels, 2006). Cependant, nous pouvons nous attendre à voir la force de cette prédiction diminuer lorsqu'on prendra en compte la mémoire de travail (Michel et al., 2020). Enfin, on peut s'attendre à ce que les gnosies et les habiletés motrices fines prédisent de manière unique chaque performance arithmétique,

comme l'ont suggéré Penner-Wilger et al. (2007), sans que l'une ne soit plus prédictive que l'autre.

Question 2 : Stratégies de calcul et trouble développemental de la coordination

Actuellement, nous savons que le trouble développemental de la coordination peut être associé à des difficultés au niveau des compétences numériques d'estimation, de comparaison de quantités et de comptage (Gomez et al., 2015; Gomez & Huron, 2020) mais également au niveau des compétences arithmétiques de récupération de faits en mémoire à long terme et de calcul mental (Pieters et al., 2012, 2015). Cependant, aucune étude n'a cherché à comprendre réellement comment les compétences arithmétiques se développent chez les enfants atteints de ce trouble. Or, il a été démontré à plusieurs reprises que les doigts jouaient un rôle important dans le développement de l'arithmétique, mettant en jeu les habiletés motrices fines (Asakawa & Sugimura, 2014; Roesch & Moeller, 2015). À l'heure actuelle, le profil cognitif de ces enfants reste un sujet qui anime la recherche scientifique. De nombreuses études mettent également en évidence la présence de difficultés au niveau de la mémoire de travail, particulièrement visuo-spatiale (Alloway, 2011; Alloway & Archibald, 2008; Maziero et al., 2020). Il semblerait que ce soit les difficultés en mémoire de travail, plutôt que la faiblesse au niveau des habiletés motrices fines, qui expliqueraient en partie les difficultés rencontrées en mathématiques chez les enfants atteints d'un trouble développemental de la coordination (Neveu et al., 2024). Cependant, aucune étude n'est en mesure de définir le rôle de ces habiletés d'un point de vue développemental.

C'est à partir de ce cadre théorique que nous avons établi notre deuxième question de recherche, à savoir : « **Quelle est l'évolution des stratégies de calcul employées par les enfants à risque de développer un trouble développemental de la coordination, comparativement aux enfants tout-venant ?** ». Pour répondre à cette question, nous nous sommes posé deux sous-questions : la première étant « *Les enfants à risque de développer un TDC utilisent-ils moins leurs doigts pour réaliser des calculs à un ou deux chiffres, comparativement aux enfants tout-venant ?* » ; la deuxième cherche à nous permettre d'expliquer plus en détails les résultats rencontrés « *Les enfants à risque de développer un TDC obtiennent-ils de moins bonnes performances arithmétiques et mnésiques que les enfants tout-venant ?* ».

En lien avec la littérature, chez les enfants tout-venant, nous nous attendons à ce que les stratégies des doigts soient employées au départ en grande majorité et que cette tendance diminue au fil du développement, en faveur de stratégies mentales (Jordan et al., 2008). Si l'utilisation des doigts persiste, cela peut être le signe de difficultés de récupération ou de manipulation de l'information pour la réalisation de calculs (Crollen & Noël, 2015). En revanche, chez les enfants à risque de développer un TDC, on ne sait pas réellement à quoi s'attendre en termes de stratégies. Cependant, on peut supposer qu'ils utiliseront moins leurs doigts étant donné les difficultés qu'ils rencontrent en les manipulant (Barnhart et al., 2003). Comme dans l'étude de Pieters et al. (2012, 2015), nous nous attendons à observer de moindres performances au niveau arithmétique chez les enfants à risque de TDC. On s'attend également à observer de moindres performances en mémoire de travail (Alloway & Archibald, 2008; Rigoli et al., 2013).

Chapitre 3

MÉTHODOLOGIE

PARTIE 1 : Conception de la recherche

1. Population

Pour rappel, cette étude vise à comprendre le rôle des doigts dans le développement arithmétique chez des enfants tout-venant ou à risque de développer un trouble développemental de la coordination. Pour cela, 79 enfants tout-venant, ou à risque de développer un trouble développemental de la coordination, ont été recrutés entre septembre 2019 et septembre 2020. Chacun devait répondre à 3 critères d'inclusion : avoir un quotient intellectuel supérieur à 85, être en 3^{ème} maternelle et n'avoir jamais doublé. Finalement, la population cible est composée de 67 enfants car nous avons exclu de nos données ceux qui étaient absents à une ou plusieurs étapes de passation. Cette population a été divisée en deux sous-populations : l'une composée de 63 enfants tout-venant (TV), l'autre composée de 4 enfants à risque de développer un trouble développemental de la coordination (TDC). Les enfants TDC ont été sélectionnés en fonction de l'évolution de leur indice de dextérité motrice (IDM). Nous avons considéré tous ceux qui avaient obtenu un IDM inférieur au percentile 16 à au moins 3 temps de passation. Étant donné qu'il s'agit de la dernière année de l'étude longitudinale, nous utiliserons l'ensemble des données récoltées aux temps 1, 2, 3, 4 donc du début de la première primaire à la fin de la deuxième primaire.

Tableau 1 - Moyenne d'âge (en mois) et écart-type à tous les temps de passation

	Temps 1 (Début 1^e P)	Temps 2 (Fin 1^e P)	Temps 3 (Début 2^e P)	Temps 4 (Début 2^e P)
Moyenne d'âge	75,23	80,92	88,59	94,09
Écart-type	3,57	3,54	3,52	3,45

2. Procédure

Les enfants ont dû réaliser une série d'épreuves dans un ordre précis (A ou B) attribué au départ à chaque enfant. Les séances de tests étaient réalisées à l'école et duraient entre 90 et 100 minutes par enfant. Ces dernières étaient à chaque fois divisées en deux parties dont la deuxième se réalisait sur l'ordinateur.

3. Matériel

Dans le cadre de notre étude, nous nous concentrerons seulement sur les tâches évaluant les habiletés motrices-fines, les compétences arithmétiques et la mémoire de travail.

a. Évaluation des habiletés sensori-motrices

La dextérité manuelle a été évaluée à l'aide de trois tâches issues de la batterie d'évaluation du mouvement chez l'enfant ou MABC-II (Henderson et al., 2007). À partir de ces trois tâches, un indice standardisé a été calculé en tenant compte de l'âge des enfants, appelé « Indice de Dextérité Motrice » (IDM). Notons que cet indice a également été calculé quelques mois avant le début des phases de tests.

La tâche placer les chevilles, permet d'évaluer la coordination unimanuelle de l'enfant en lui faisant réaliser une série de mouvements précis. L'examineur place un plateau contenant 12 trous devant l'enfant. Il place ensuite une boîte contenant 12 chevilles que l'enfant doit tenir fermement avec l'une de ses deux mains. Ce dernier doit alors s'aider de son autre main pour placer les chevilles sur le plateau. Un essai lui est accordé avant de commencer et ce, pour chaque main. Nous chronométrons les performances et nous relevons le meilleur temps pour chaque main. Nous faisons ensuite la moyenne des deux que nous retranscrivons sur le protocole papier.

La tâche enfiler le lacet permet d'évaluer la coordination bimanuelle. Durant cette tâche, on demande à l'enfant d'enfiler un lacet dans 8 trous situés sur la longueur d'une petite planche rectangulaire. Il doit également réaliser cet exercice le plus rapidement possible puisque nous le chronométrons. Il doit le faire à deux reprises et un essai lui est accordé avant de commencer. Nous retenons le meilleur temps que nous encodons sur le protocole papier.

La tâche du trajet permet quant à elle d'évaluer la précision visuo-motrice. Nous demandons à l'enfant de tracer une ligne continue au centre de la route pour que les bicyclettes rejoignent la maison. Il lui est indiqué qu'il ne doit pas dépasser ou faire de ratures et qu'il doit faire le trajet deux fois. L'enfant dispose également d'un essai avant de commencer réellement l'exercice. Notons que la première partie du trajet (avant le pont) est plus large que la deuxième partie. On relève chaque erreur et nous retenons le trajet contenant le moins d'erreurs que nous retranscrivons sur le protocole papier.

La tâche des gnosies digitales a été construite sur la base des travaux de Reeve et Humberstone (2011). Elle permet d'évaluer les capacités perceptivo-tactiles de l'enfant. Autrement dit, sa capacité à reconnaître, à l'aveugle, quels doigts sont touchés par l'examineur à l'aide de la kinesthésie. Pour réaliser la tâche, l'enfant doit poser ses mains à plat, la paume tournée vers la table et l'examineur doit utiliser un stylo pour toucher la 2^{ème} phalange des doigts. Pour aider l'enfant à répondre, nous disposons chaque fois devant lui l'image correspondante à sa main (cf. figure 6), il peut dans ce cas répondre par la couleur plutôt que par le nom du doigt touché. Dans un premier temps, nous lui expliquons que nous allons cacher ses mains, puis toucher un de ses doigts et qu'il devra nous indiquer lequel de ses doigts nous avons touché. Dans un second temps, nous lui touchons deux doigts consécutivement et l'enfant doit restituer les bons doigts dans le bon ordre de touché. Pour la première partie, nous attribuons un point par bonne réponse, pour la seconde partie, nous attribuons un point si les bons doigts sont rappelés et un autre point si l'ordre est correctement rappelé.

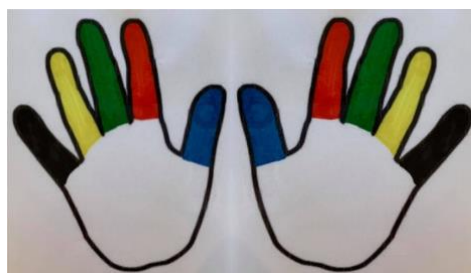


Figure 5 - Images présentées à l'enfant lors de la tâche des gnosies digitales

b. Évaluation des compétences arithmétiques

La tâche de fluences arithmétiques consiste à évaluer la rapidité avec laquelle l'enfant est capable de résoudre des calculs et d'accéder aux faits arithmétiques stockés en mémoire à long

terme. À trois reprises, l'expérimentateur énonce oralement des additions simples que l'enfant doit résoudre le plus rapidement possible en 90 secondes (ex. « 3+9 » ; « 8+5 » ; « 1+1 »). En parallèle, on note les réponses de l'enfant sur le protocole papier et on attribue un point par bonne réponse et zéro par mauvaise réponse. On fait ensuite la somme de la totalité des réponses correctes obtenues aux trois colonnes.

La tâche d'arithmétique sans contrainte de temps consiste à évaluer les compétences de l'enfant à réaliser des calculs en utilisant des stratégies. Il s'agit d'une série de calculs à résoudre comprenant des additions et des soustractions présentées à l'écrit sur l'ordinateur. L'enfant ne dispose pas du temps imparti pour résoudre ces calculs. Les réponses correctes sont enregistrées ainsi que les stratégies employées par l'enfant pour résoudre les problèmes et les temps de réponse. Chaque fois que l'enfant donne la solution, il lui est demandé de choisir entre 4 propositions : « J'ai calculé avec mes doigts » ; « J'ai calculé dans ma tête » ; « J'ai su la réponse tout de suite » (faits arithmétiques) ; « Je ne sais pas ». Chaque calcul présenté augmente progressivement en difficulté. Un point est attribué par bonne réponse et zéro point lors d'une mauvaise réponse. À la suite de 3 erreurs consécutives, l'épreuve s'arrête automatiquement.

c. Évaluation de la mémoire de travail

La tâche administrateur central permet d'évaluer la mémoire de travail et correspond à une épreuve d'empan à l'envers. Durant cette tâche, l'examineur lit à voix haute des lettres que l'enfant doit ensuite répéter dans l'ordre inverse (ex. « A-T » répété « T-A »). L'enfant peut commencer l'exercice une fois que l'examineur est certain qu'il a bien compris ce qu'on lui demande. Chaque séquence est lue lentement, à raison d'une lettre par seconde. Il y a 8 niveaux de séquences (allant de 2 à 9 lettres par séquence), comprenant chacun 3 séquences de lettres. Si l'enfant ne parvient pas à réaliser les deux premiers items, alors on lui présente le 3^{ème} item. On attribue un point par bonne réponse et nous retranscrivons le score total sur le protocole papier.

PARTIE 2 : Analyses

Pour rappel, nous voulons déterminer si les habiletés digitales, évaluées en début de 1^{ère} primaire (T1), prédisent le développement des compétences arithmétiques, évaluées en fin de 2^{ème} primaire (T4). Les variables indépendantes sont donc l'indice de dextérité manuelle au temps 1 (« IDM T1 ») et les scores obtenus à la tâche des gnosies digitales au temps 1 (« Gnosies T1 »). Les variables dépendantes concernent les scores obtenus à la tâche de fluences arithmétiques au temps 4 (« Fluences arithmétiques T4 ») et d'arithmétique sans contrainte de temps au temps 4 (« Arithmétique sans CT T4 »). Nous avons également inséré la tâche « administrateur central » au temps 1 (« MdT T1 »), correspondant à la mémoire de travail, comme variable à contrôler. Les résultats ont été analysés à l'aide du logiciel JASP (version 0.18.1 ; Intel). Pour interpréter nos résultats, nous avons choisi un seuil significatif de 0,05 et avons considéré les tailles d'effet de nos corrélations sur la base des critères de Cohen (1988) : corrélation faible à 0.10, modérée à 0.30 ou forte à 0.50.

Pour répondre à notre première question de recherche, nous avons d'abord analysé les liens existants entre les habiletés digitales et les compétences arithmétiques via une matrice de corrélations partielles de Pearson. Elle a été utile pour sélectionner les variables indépendantes qui corrôlaient significativement avec les variables dépendantes afin de les inclure dans nos modèles de régressions linéaires multiples hiérarchiques. Ces modèles nous permettaient d'identifier les variables qui prédisaient significativement les compétences arithmétiques obtenues en fin de 2^{ème} primaire, une fois que la mémoire de travail fut contrôlée. Par la suite, nous avons réalisé les mêmes analyses mais aux autres temps de la passation (temps 1, 2 et 3) afin d'identifier quelle variable digitale, entre les gnosies digitales et les habiletés motrices fines, prédisait le mieux les compétences arithmétiques d'un point de vue développemental.

Pour répondre à notre deuxième question de recherche, et étant donné le peu d'enfants à risque de développer un TDC contenu dans notre échantillon, nous avons réalisé des tests non paramétriques de Mann-Whitney. Cela nous permettait de vérifier s'il existait des différences significatives entre les deux sous-groupes concernant l'utilisation des différentes stratégies de calcul. Ensuite, nous avons comparé les moyennes obtenues par les enfants à risque de TDC aux tâches arithmétiques et en mémoire de travail, par rapport à celles obtenues par les enfants TV. Nous avons également réalisé des courbes linéaires pour comparer visuellement l'évolution de l'utilisation de chaque stratégie et des performances entre les deux sous-groupes.

Chapitre 4

RÉSULTATS

PARTIE 1 : Habiletés digitales (gnosies digitales et habiletés motrices fines) et compétences arithmétiques

1. Analyses descriptives

Tout d'abord, nous avons réalisé des statistiques descriptives qui décrivent les scores obtenus aux épreuves qui nous intéressent (Tableau 2). Elles permettent d'établir une vue d'ensemble des compétences mnésiques, sensori-motrices et arithmétiques chez tous les enfants de la cohorte. Ces données ont également été retranscrites après avoir divisé la cohorte en deux sous-groupes : tout-venant (TV) et à risque de développer un TDC (TDC).

Tableau 2 - Statistiques descriptives de compétences mnésiques, sensori-motrices et arithmétiques chez tous les enfants et dans chaque sous-groupe (enfants TV et enfants à risque de TDC)

Tâche	Toute la cohorte (n=67) moyenne \pm écart-type (min, max)	TV (n=63) moyenne \pm écart-type (min, max)	TDC (n=4) moyenne \pm écart-type (min, max)
<i>Mémoire de travail</i>			
MdT T1	2.15 \pm 0.94 (0 ; 4)	2.19 \pm 0.93 (0 ; 4)	1.50 \pm 1.00 (0 ; 2)
<i>Habiletés sensori-motrices</i>			
IDM T1	45.88 \pm 32.15 (1 ; 98)	51.66 \pm 16.99 (8 ; 92)	12.25 \pm 5.58 (8 ; 20)
Gnosies T1	20.54 \pm 5.14 (9 ; 30)	20.70 \pm 5.21 (9 ; 30)	18.00 \pm 3.27 (14 ; 22)
<i>Compétences arithmétiques</i>			
Fluences arithmétiques T1	8.60 \pm 5.51 (0 ; 21)	8.91 \pm 5.49 (0 ; 21)	3.75 \pm 3.50 (0 ; 8)
Fluences arithmétiques T2	18.81 \pm 7.64 (5 ; 38)	19.16 \pm 7.47 (5 ; 38)	13.25 \pm 9.39 (6 ; 27)
Fluences arithmétiques T3	27.96 \pm 9.69 (10 ; 55)	28.29 \pm 9.64 (10 ; 55)	22.75 \pm 10.44 (13 ; 36)
Fluences arithmétiques T4	37.18 \pm 11.98 (13 ; 60)	37.33 \pm 12.10 (13 ; 60)	34.75 \pm 11.09 (19 ; 45)
Arithmétique sans contrainte de temps T1	3.03 \pm 3.32 (0 ; 17)	3.11 \pm 3.38 (0 ; 17)	1.75 \pm 2.22 (0 ; 5)
Arithmétique sans contrainte de temps T2	6.75 \pm 5.98 (1 ; 27)	6.86 \pm 6.10 (1 ; 27)	5.00 \pm 3.56 (2 ; 9)
Arithmétique sans contrainte de temps T3	12.76 \pm 6.06 (0 ; 31)	13.00 \pm 6.08 (1 ; 31)	9.00 \pm 4.97 (4 ; 15)
Arithmétique sans contrainte de temps T4	18.55 \pm 8.92 (1 ; 34)	19.10 \pm 8.85 (1 ; 34)	10.00 \pm 5.16 (4 ; 16)

2. Matrice de corrélations

Avant de mener des tests statistiques plus poussés, nous avons réalisé une matrice de corrélations (Tableau 3) afin de rendre compte des liens existants entre nos différentes variables : covariable (mémoire de travail), variables indépendantes (indice de dextérité motrice et gnosies digitales), variables dépendantes (Fluences arithmétiques et Arithmétique sans contrainte de temps). Seules les variables significativement corrélées entre elles étaient ensuite utilisées dans nos modèles de régression. Nous retenons que les Fluences arithmétiques étaient positivement, et significativement, liées à la MdT T1, l’IDM T1 et les Gnosies T1 du début de la première primaire à la fin de la deuxième primaire. Cependant, en fin de deuxième primaire,

les gnosies digitales ne corrélaient plus avec les Fluences arithmétiques. La tâche d'Arithmétique sans CT, quant à elle, n'était liée à aucune variable en début de première primaire tandis qu'en fin de première primaire, seules les Gnosies T1 étaient positivement et significativement corrélée avec cette variable dépendante ($r = 0.39$; $p < .01$). En début de deuxième primaire, la tâche avait un lien avec la MdT T1 ($r = 0.28$; $p < .05$) et les Gnosies T1 ($r = 0.34$; $p < .01$) tandis qu'en fin de deuxième primaire, ce lien existait entre la MdT T1 ($r = 0.32$; $p < .01$) et l'IDM T1 ($r = 0.26$; $p < .05$). Notons que l'ensemble de ces corrélations étaient faibles à modérées ($r < 0.40$).

Tableau 3 - Matrice de corrélation de Pearson entre les performances en mémoire de travail au temps 1, les habiletés sensori-motrices au temps 1 et les compétences arithmétiques à tous les temps

Variables		MdT (AC) T1	IDM T1	Gnosies T1	Fluences arithmétiques T1
IDM T1	R de Pearson	0.40***	—	—	—
Gnosies T1	R de Pearson	0.18	0.12	—	—
Fluences arithmétiques T1	R de Pearson	0.37**	0.27*	0.31*	—
Fluences arithmétiques T2	R de Pearson	0.29*	0.26*	0.37**	0.36**
Fluences arithmétiques T3	R de Pearson	0.28*	0.25*	0.34**	0.36**
Fluences arithmétiques T4	R de Pearson	0.25*	0.26*	0.23	0.40***
Arithmétique sans CT T1	R de Pearson	0.13	0.10	0.05	0.30*
Arithmétique sans CT T2	R de Pearson	0.15	0.11	0.39**	0.35**
Arithmétique sans CT T3	R de Pearson	0.28*	0.15	0.34**	0.30*
Arithmétique sans CT T4	R de Pearson	0.32**	0.26*	0.14	0.14

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

3. Régression multiples hiérarchiques

a. Variables prédictives des compétences arithmétiques au temps 4

Dans un premier temps, nous souhaitons rendre compte de la part explicative de l'indice de dextérité motrice au temps 1 sur la tâche des Fluences arithmétiques au temps 4. Pour cela, nous avons réalisé une régression linéaire multiple hiérarchique dans laquelle nous avons sélectionné la MdT au temps 1 et l'IDM au temps 1, puisqu'elles seules corrélaient avec les Fluences arithmétiques au temps 4 (Tableau 3). Dans la première étape du modèle nous avons inséré la mémoire de travail au temps 1, tandis que l'IDM au temps 1 a été inséré dans la deuxième étape du modèle, en plus de la mémoire de travail. Autrement dit, nous avons inclus au modèle nul, la mémoire de travail afin de rendre compte de la part explicative des variables « IDM T1 » une fois la variable « MdT T1 » contrôlée (Tableau 4). La mémoire de travail expliquait 6% de la variance des performances obtenues ($F(1, 65) = 4.44; p < .05$) tandis que l'indice de dextérité motrice expliquait 9% de la variance totale ($F(2, 64) = 3.33; p < .05$). On remarque que la part explicative de l'IDM T1 sur les Fluences arithmétiques T4 n'était pas significative une fois la MdT T1 contrôlée ($t = 1.46; p = 0.149$). La mémoire de travail en début de première primaire expliquait donc une part plus importante des résultats obtenus à la tâche des Fluences arithmétiques en fin de deuxième primaire, comparativement aux habiletés motrices fines. La relation était positive, ce qui signifie que plus les performances en mémoire de travail en début de première primaire sont hautes, plus le score obtenu à la tâche des Fluences arithmétiques en fin de deuxième primaire est élevé.

Dans un second temps, nous avons cherché à connaître la valeur prédictive des habiletés motrices fines au temps 1 sur la tâche d'Arithmétique sans CT au temps 4. Pour cela, nous avons réalisé une régression linéaire multiple hiérarchique dans laquelle nous avons sélectionné la mémoire de travail au temps 1 et l'IDM au temps 1, puisqu'elles seules corrélaient avec la tâche Arithmétique sans CT au temps 4 (Tableau 3). Tout comme dans le modèle précédent, nous avons inséré la mémoire de travail au temps 1 dans la première étape du modèle, tandis que l'IDM au temps 1 a été inséré dans la deuxième étape, en plus de la mémoire de travail (Tableau 4). La MdT T1 expliquait 10% de la variance des performances obtenues ($F(1, 65) = 7.34; p < .01$) tandis que l'IDM T1 expliquait 12% de la variance totale ($F(2, 64) = 4.45; p < .05$). On remarque ici aussi que la part explicative de l'IDM T1 sur l'Arithmétique sans CT T4 n'était pas significative une fois la mémoire de travail contrôlée ($t = 1.23; p = 0.23$). La mémoire

de travail en début de première primaire expliquait donc une part plus importante des résultats obtenus à la tâche d'Arithmétique sans contrainte de temps en fin de deuxième primaire, comparativement aux habiletés motrices fines. La relation était positive, ce qui signifie que plus les performances en mémoire de travail en début de première primaire sont hautes, plus le score obtenu à la tâche d'Arithmétique sans contrainte de temps en fin de deuxième primaire est élevé.

Tableau 4 - Synthèse des modèles de régression linéaire multiple hiérarchique, incluant la mémoire de travail, entre la variable indépendante "IDM T1" et les variables indépendantes "Fluences arithmétiques T4" et "Arithmétique sans CT T4"

Modèle		R ²	ΔR ²	β
<i>Fluences arithmétiques T4</i>				
H ₀	MdT (AC) T1	0.06		0.25*
H ₁	IDM T1	0.09	0.03	0.19
	MdT (AC) T1			0.18
<i>Arithmétique sans CT T4</i>				
H ₀	MdT (AC) T1	0.10		0.32**
H ₁	IDM T1	0.12	0.02	0.16
	MdT (AC) T1			0.26*

Note. Le modèle nul aux temps 2 et 3 inclus la mémoire de travail au temps 1

NoteBis. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

b. Variables prédictives des Fluences arithmétiques aux temps 1, 2 et 3

À la suite de ces résultats, nous avons décidé de faire de même mais d'un point de vue développemental en nous basant sur les corrélations obtenues plus haut (Tableau 3).

Nous avons alors analysé la part explicative des habiletés motrices fines et des gnosies digitales au temps 1 sur les compétences en fluences arithmétiques aux temps 1, 2 et 3, après avoir contrôlé la mémoire de travail au temps 1 (Tableau 5). Nous avons suivi le même processus que pour les modèles précédents. De fait, nous avons inséré la MdT T1 dans l'étape 1 des modèles puis nous avons ajouté dans l'étape 2, les Gnosies T1 et l'IDM T1, en plus de la mémoire de travail. Cette dernière expliquait 14% de la variance des performances obtenues au T1 ($F(1, 65) = 10.37$; $p < .01$) à la tâche Fluences arithmétiques T1 tandis que les habiletés sensori-motrices expliquaient 21% de la variance totale ($F(3, 63) = 5.63$; $p < .001$). Les Gnosies T1 se sont révélées être un prédicteur significatif des Fluences arithmétiques T1 ($t = 2.14$; $p < .05$), tout comme la mémoire de travail T1, qui l'était également ($t = 2.24$; $p < .05$). Autrement

dit, la part explicative des performances en fluences arithmétiques en début de première primaire était partagée entre les gnosies digitales et la mémoire de travail en début de première primaire. Ensuite, au temps 2, la mémoire de travail expliquait 8% de la variance des performances obtenues ($F(1, 65) = 5.89; p < .05$) tandis que les habiletés sensori-motrices expliquaient 21% de la variance totale ($F(3, 63) = 5.50; p < .01$). Seules les Gnosies T1 étaient un prédicteur significatif des Fluences arithmétiques T2 ($t = 2.82; p < .01$), au-delà de l'influence de la MdT T1. Autrement dit, les gnosies digitales en début de première primaire expliquent davantage les résultats obtenus aux fluences arithmétiques en fin de deuxième primaire par rapport à la mémoire de travail. Enfin, au temps 3, la mémoire de travail expliquait 8% de la variance des performances obtenues à la tâche des Fluences arithmétiques ($F(1, 65) = 5.30; p < .05$) tandis que les habiletés sensori-motrices expliquaient 18% de la variance totale ($F(3, 63) = 4.66; p < .01$). Ici aussi, il n'y avait que les gnosies digitales en début de première primaire qui prédisaient significativement les résultats obtenus aux Fluences arithmétiques en début de deuxième primaire ($t = 2.53; p < .05$), après contrôle de la mémoire de travail T1.

Tableau 5 - Synthèse des modèles de régressions linéaires multiples hiérarchiques, incluant la mémoire de travail, entre les variables sensori-motrices et la variable dépendante "Fluences arithmétiques"

Modèle		R ²	ΔR ²	β
<i>Temps 1</i>				
H ₀	MdT (AC) T1	0.14		0.37**
H ₁	IDM T1	0.21	0.07	0.13
	Gnosies T1			0.24*
	MdT (AC) T1			0.28*
<i>Temps 2</i>				
H ₀	MdT (AC) T1	0.08		0.29*
H ₁	IDM T1	0.21	0.12	0.15
	Gnosies T1			0.32**
	MdT (AC) T1			0.17
<i>Temps 3</i>				
H ₀	MdT (AC) T1	0.08		0.28*
H ₁	IDM T1	0.18	0.11	0.15
	Gnosies T1			0.29*
	MdT (AC) T1			0.16

Note. Le modèle nul à tous les temps de passation inclus la mémoire de travail au temps 1

NoteBis. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

c. Variables prédictives de l'Arithmétique sans CT aux temps 2 et 3

À posteriori, nous voulions analyser la part explicative des gnosies digitales au temps 1 sur les compétences à la tâche d'Arithmétique sans CT aux temps 2 et 3 de passation (Tableau 6). Nous n'avons pas inclus l'IDM T1, puisque cette variable ne corrélait avec l'Arithmétique sans CT à aucun des temps de passation analysés ici (Tableau 3). De plus, le temps 1 n'a également pas été inclus dans le modèle puisqu'aucune des deux variables sensori-motrices ne corrélait avec l'Arithmétique sans CT T1. Le modèle de régression linéaire simple a révélé que les Gnosies T1 expliquaient 15% des résultats obtenus en Arithmétique sans CT T2 ($F(1, 65) = 11.46; p < .01$). Ces dernières prédisaient significativement les performances obtenues à tâche d'Arithmétique sans CT T2 ($t = 3.39; p < .01$). Pour finir, nous avons réalisé une régression linéaire multiple hiérarchique au temps 3 en insérant la MdT T1 à l'étape 1 du modèle et les Gnosies T1 à l'étape 2. La mémoire de travail expliquait 8% de la variance des performances obtenues en Arithmétique sans CT T3 ($F(1, 65) = 5.41; p < .05$), tandis que les gnosies expliquaient 16% de la variance totale ($F(2, 64) = 6.11; p < .01$). Seules les gnosies en début de première primaire prédisaient significativement les résultats obtenus à la tâche d'Arithmétique sans CT en début de deuxième primaire ($t = 2.52; p < .05$), et ce, indépendamment de l'influence des performances obtenues en mémoire de travail au temps 1.

Tableau 6 - Synthèse des modèles de régression linéaire simple et multiples hiérarchiques, incluant la mémoire de travail, entre les variables sensori-motrices et la variable dépendante "Arithmétique sans contrainte de temps"

Modèle		R ²	ΔR ²	β
<i>Temps 2</i>				
H ₁	Gnosies T1	0.15	0.15	0.387**
<i>Temps 3</i>				
H ₀	MdT (AC) T1	0.08		0.28*
H ₁	Gnosies T1	0.16	0.08	0.29*
	MdT (AC) T1			0.22

Note. Le modèle nul aux temps 2 et 3 inclus la mémoire de travail au temps 1

NoteBis. * $p < .05$, ** $p < .01$, *** $p < .001$

PARTIE 2 :

Stratégies de calcul chez les enfants à risque de développer un trouble développemental de la coordination

1. Habiletés sensori-motrices

a. Analyses descriptives

Avant tout, nous souhaitons établir le profil des habiletés sensori-motrices de chaque sous-groupe, à savoir les enfants tout-venant et les enfants à risque de développer un trouble développemental de la coordination. Nous avons donc réalisé des statistiques descriptives reprises dans le tableau 7. Elles permettaient d'établir une vue d'ensemble des capacités, au niveau des gnosies digitales et des habiletés motrices fines (indice de dextérité manuelle), de chacun de ces groupes.

Tableau 7 - Statistiques descriptives des scores aux tâches d'habiletés sensori-motrices de chaque sous-groupe

Stratégie	TV (n=63) moyenne ± écart-type (médiane)	TDC (n=4) moyenne ± écart-type (médiane)
<i>Indice de dextérité motrice</i>		
Temps 0 (avant testing)	48.6 ± 31.2 (50)	3.3 ± 2.1 (3.5)
Temps 1	51.7 ± 17 (51.7)	12.3 ± 5.6 (10.2)
Temps 2	50 ± 17.4 (50.7)	16.2 ± 1.7 (16.5)
Temps 3	48 ± 19.4 (45)	19.8 ± 12.8 (16.5)
Temps 4	46.4 ± 18.4 (44.7)	13.3 ± 17.4 (7)
<i>Gnosies digitales</i>		
Temps 1	20.7 ± 5.2 (20)	18 ± 3.3 (18)
Temps 2	21.9 ± 4.6 (21)	23 ± 4.6 (22.5)
Temps 3	22.5 ± 4.9 (24)	15 ± 6.5 (14.5)
Temps 4	23.4 ± 4.8 (24)	16.5 ± 5 (16)

b. Test non-paramétrique de Mann-Whitney

Nous avons par la suite comparé les moyennes obtenues par chaque sous-groupe aux tâches sensori-motrices. Pour cela, nous avons effectué un test de Mann-Whitney (Annexe 1). Le test nous a révélé que les habiletés motrices fines des enfants à risque de TDC ($Mdn = [3.5 ; 16.5]$)

étaient significativement moindres que celles des enfants TV ($Mdn = [44.7 ; 51.7]$), et ce, à tous les temps de passation ($W (N_{TV} = 63, N_{TDC} = 4) = [226.0 ; 246.5], p < .01$). Notons que l'effet était large pour chacune de ces comparaisons ($r_B = [0.80 ; 0.96]$). Le test a également mis en évidence que les enfants TV ($Mdn = 24.0$) obtenaient significativement de meilleures performances à la tâche des gnosies digitales que les enfants à risque de TDC ($Mdn = 14.5 ; 16$), au début et en fin de deuxième primaire (temps 3 et 4) ($W (N_{TV} = 63, N_{TDC} = 4) = 211.0 ; 216.0, p < .05$). Ici aussi, l'effet observé était large ($r_B = 0.68 ; 0.71$). Par contre, on n'observe pas de différence entre les moyennes de chaque sous-groupe en début et en fin de première primaire (temps 1 et 2).

2. Stratégies de calcul

a. *Analyses descriptives*

Nous nous sommes alors intéressés aux stratégies de calcul que les enfants utilisaient pour réaliser des problèmes arithmétiques. Nous avons donc réalisé des statistiques descriptives, reprises dans le tableau 8, qui permettent d'établir une vue d'ensemble de la fréquence d'utilisation des différentes stratégies de résolution de calcul à la tâche d'arithmétique sans contrainte de temps, chez les enfants TV et chez les enfants à risque de développer un TDC.

Tableau 8 - Statistiques descriptives de la fréquence d'utilisation des différentes stratégies de calcul utilisées lors de la tâche "Arithmétique sans CT"

Stratégie	TV (n=63)	TDC (n=4)
	moyenne \pm écart-type (%) (médiane)	moyenne \pm écart-type (%) (médiane)
<i>Comptage des doigts</i>		
Temps 1	18.0 \pm 22.2 (9.0)	48.5 \pm 36.1 (38.5)
Temps 2	20.5 \pm 23.0 (15.0)	9.8 \pm 11.3 (9.5)
Temps 3	19.1 \pm 22.3 (12.0)	39.8 \pm 12.2 (43.5)
Temps 4	15.4 \pm 19.1 (8.0)	20.8 \pm 24.9 (16.5)
<i>Récupération (faits arithmétiques)</i>		
Temps 1	35.7 \pm 32.4 (33.0)	15.3 \pm 13.8 (14.0)
Temps 2	39.8 \pm 27.3 (36.0)	36.0 \pm 25.5 (42.0)
Temps 3	27.6 \pm 19.3 (23.0)	16.5 \pm 11.3 (20.5)
Temps 4	29.9 \pm 21.5 (26.0)	8.8 \pm 8.1 (9.0)

Stratégie	TV (n=63)	TDC (n=4)
	moyenne \pm écart-type (%) (médiane)	moyenne \pm écart-type (%) (médiane)
<i>Calcul mental (procédure de calcul)</i>		
Temps 1	27.4 \pm 26.7 (20.0)	24.8 \pm 16.5 (33.0)
Temps 2	26.3 \pm 22.5 (20.0)	42.3 \pm 38.8 (25.0)
Temps 3	32.3 \pm 21.9 (28.0)	23.3 \pm 12.1 (26.0)
Temps 4	38.7 \pm 23.1 (36.5)	30.0 \pm 6.7 (29.0)
<i>Inconnue</i>		
Temps 1	18.9 \pm 25.2 (13.0)	11.0 \pm 15.6 (5.5)
Temps 2	13.4 \pm 17.9 (6.0)	12.3 \pm 9.3 (14.5)
Temps 3	21.0 \pm 15.9 (19.0)	20.5 \pm 3.1 (20.5)
Temps 4	16.0 \pm 16.4 (12.0)	40.3 \pm 23.9 (43.5)

b. Test non-paramétrique de Mann-Whitney

Ensuite, nous avons comparé la fréquence d'utilisation des différentes stratégies des enfants TV avec celle des enfants à risque de TDC, et ce, à tous les temps de passation (Annexe 2). Le test de Mann-Whitney a montré que les enfants TV ($Mdn = 12.0$) utilisent significativement moins le comptage des doigts que les enfants à risque de TDC ($Mdn = 43.5$) au temps 1 ($W(N_{TV} = 63, N_{TDC} = 4) = 52.5, p < .05$) et au temps 3 ($W(N_{TV} = 63, N_{TDC} = 4) = 47.5, p < .05$). Notons que ces effets sont larges ($r_B = -0.57$; $r_B = -0.62$). En revanche, les enfants TV ($Mdn = 26.0$) utilisent davantage de stratégies de récupération que les enfants à risque de TDC ($Mdn = 9.0$) au temps 4, et ce de manière significative ($W(N_{TV} = 63, N_{TDC} = 4) = 212.5, p < .05$) et large ($r_B = 0.71$). Également au temps 4, les enfants à risque de TDC ($Mdn = 43.5$) sont moins à même de dire quelle stratégie ils ont utilis, comparativement aux enfants TV ($Mdn = 12.0$), et ce, de manière significative ($W(N_{TV} = 63, N_{TDC} = 4) = 43.0, p < .05$) et large ($r_B = -0.65$). Il s'agit là des seules différences significatives que nous pouvons observer entre les deux sous-groupes.

c. Analyses visuelles

En vue de compléter les analyses statistiques, nous avons relevé le pourcentage d'utilisation des différentes stratégies par les deux sous-groupes (Tableau 9). En début de primaire, les enfants TV utilisaient davantage des stratégies de récupération (33%) et de calcul mental (29%) tandis que les enfants à risque de TDC utilisaient en grande majorité les doigts (45%) et calcul procédural (27%). En fin de primaire, on remarque la même tendance chez les enfants TV. En

revanche, les enfants à risque de TDC utilisaient davantage les stratégies de récupération (42%) plutôt que les stratégies des doigts mais continuaient à utiliser le calcul procédural (33%). En début de deuxième primaire, les enfants TV utilisaient davantage le calcul procédural (34%) et la récupération de faits (26%) pour réaliser des problèmes arithmétiques tandis que les enfants à risque de TDC utilisaient, une nouvelle fois, majoritairement leurs doigts (41%) et le calcul procédural (24%). En fin de deuxième primaire, les enfants TV utilisaient davantage le calcul procédural (43%) tandis que chez les enfants à risque de TDC, l'utilisation des doigts et du calcul procédural était majoritaire (29% pour les deux), mais on voit également qu'ils sont moins à même de dire quelle stratégie ils utilisent (32% d'utilisation d'une stratégie « inconnue » selon eux).

Tableau 9 - Taux de fréquence d'utilisation des différentes stratégies en fonction des deux sous-groupes

Temps de passation	Stratégie	TV (N = 63)	TDC (N = 4)
Temps 1	Doigts	20%	45%
	Récupération	33%	14%
	Calcul procédural	29%	27%
	Inconnue	17%	14%
Temps 2	Doigts	23%	11%
	Récupération	32%	42%
	Décomposition additive	30%	33%
	Inconnue	15%	14%
Temps 3	Doigts	19%	41%
	Récupération	26%	14%
	Décomposition additive	34%	24%
	Inconnue	21%	21%
Temps 4	Doigts	15%	29%
	Récupération	27%	9%
	Décomposition additive	43%	29%
	Inconnue	15%	32%

Par la suite, des courbes linéaires ont été réalisées afin d'analyser visuellement l'évolution de la fréquence d'utilisation de ces stratégies, en fonction du temps de passation et de chaque sous-groupe. Globalement, on observe que la fréquence d'utilisation des doigts diminue avec le temps pour chaque sous-groupe mais que les enfants à risque de TDC utilisent davantage cette stratégie comparativement aux enfants TV (Figure 6). Les stratégies de récupération sont plus utilisées par les enfants TV que par les enfants à risque de TDC (Figure 7). De plus, chez

ces deux sous-groupes, on remarque que la fréquence d'utilisation de cette stratégie diminue avec le temps. Concernant la stratégie du calcul mental, au départ, elle est utilisée à la même fréquence par les deux sous-groupes mais avec le temps, l'écart se creuse (Figure 8). Les enfants TV utilisent de plus en plus le calcul mental tandis que les enfants à risque de TDC l'utilisent à la même fréquence tout au long de l'étude. Enfin, on observe la tendance inverse avec la fréquence d'utilisation de stratégies « inconnues » selon les enfants (Figure 9).

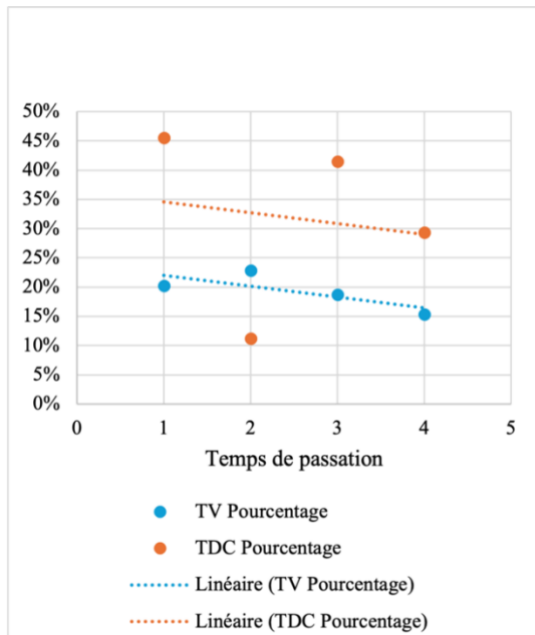


Figure 6 - Évolution de la fréquence d'utilisation de la stratégie des doigts

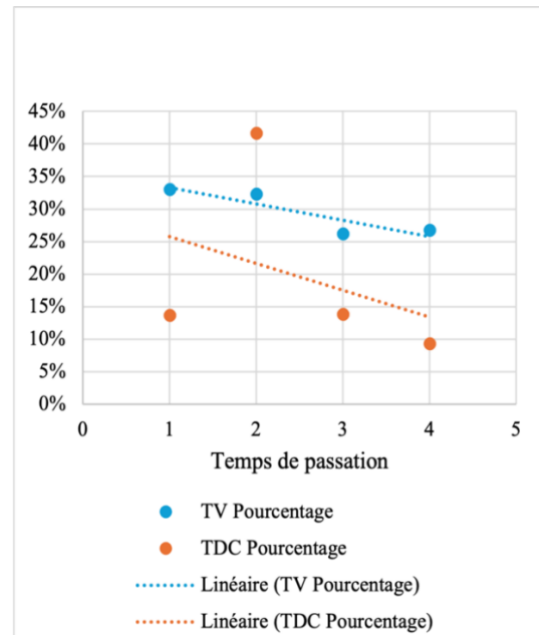


Figure 7 - Évolution de la fréquence d'utilisation de la stratégie de récupération

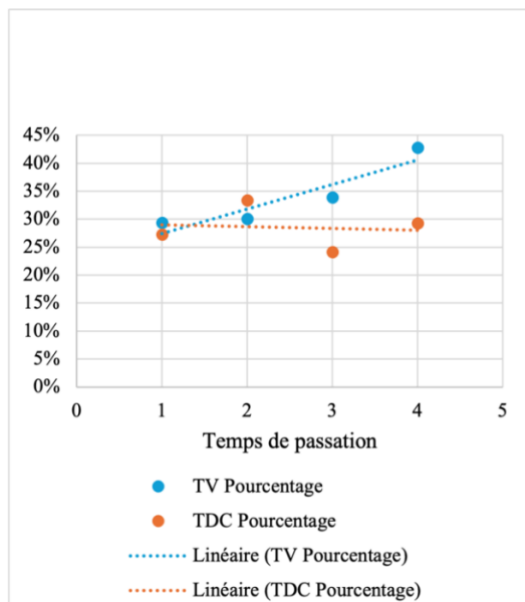


Figure 8 - Évolution de la fréquence d'utilisation du calcul procédural

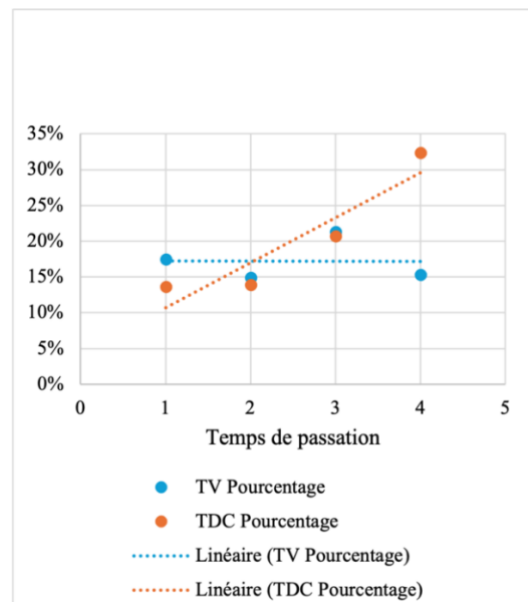


Figure 9 - Évolution de la fréquence d'utilisation d'une stratégie inconnue

3. Compétences arithmétiques et performances en mémoire de travail

a. *Analyses descriptives*

À posteriori, nous avons comparé les performances arithmétiques et mnésiques des enfants TV avec celles des enfants à risque de TDC. Pour cela, nous avons d'abord réalisé des statistiques descriptives reprises dans le tableau 10. Elles permettent d'établir une vue d'ensemble des performances obtenues pour chaque sous-groupe (enfants TV, enfants à risque de TDC) aux tâches arithmétiques (fluences arithmétiques et arithmétique sans contrainte de temps) et à la tâche évaluant la mémoire de travail.

Tableau 10 - Statistiques descriptives des scores obtenus par les deux sous-groupes aux deux tâches arithmétiques et à la tâche de mémoire de travail

Tâches	TV (n=63)	TDC (n=4)
	moyenne \pm écart-type (médiane)	moyenne \pm écart-type (médiane)
<i>Fluences arithmétiques (faits arithmétiques)</i>		
Temps 1	8.9 \pm 5.5 (8.0)	3.8 \pm 3.5 (3.5)
Temps 2	19.2 \pm 7.5 (19.0)	13.3 \pm 9.4 (10.0)
Temps 3	28.3 \pm 9.6 (27.0)	22.8 \pm 10.4 (21.0)
Temps 4	37.3 \pm 12.1 (38.0)	34.8 \pm 11.1 (37.5)
<i>Arithmétique sans contrainte de temps (procédures de calcul)</i>		
Temps 1	3.1 \pm 3.4 (2.0)	1.8 \pm 2.2 (1.0)
Temps 2	6.9 \pm 6.1 (6.0)	5.0 \pm 3.6 (4.5)
Temps 3	13.0 \pm 6.1 (13.0)	9.0 \pm 5 (8.5)
Temps 4	19.1 \pm 8.9 (17.0)	10 \pm 5.2 (10.0)
<i>Mémoire de travail</i>		
Temps 1	2.2 \pm 0.9 (2.0)	1.5 \pm 1.0 (2.0)
Temps 2	2.7 \pm 0.9 (3.0)	3.0 \pm 0.8 (3.0)
Temps 3	3.1 \pm 3.8 (3.0)	3.8 \pm 0.5 (4.0)
Temps 4	3.7 \pm 1.1 (4.0)	3.3 \pm 1.0 (3.5)

b. *Test non-paramétrique de Mann-Whitney*

Ensuite, nous avons comparé la moyenne des performances obtenue par les enfants TV avec celle obtenue par les enfants à risque de TDC, et ce à tous les temps de passation (Annexe 3).

Le test de Mann-Whitney met en évidence qu'il n'existe aucune différence significative entre les performances en fluences arithmétiques obtenues par les enfants TV et celles obtenues par les enfants à risque de TDC. Concernant les performances à la tâche d'arithmétique sans contrainte de temps, les enfants TV ($Mdn = 17.0$) obtiennent une moyenne significativement plus élevée que les enfants à risque de TDC ($Mdn = 10.0$) seulement au temps 4 donc en fin de deuxième primaire ($W (N_{TV} = 63, N_{TDC} = 4) = 202.5, p < .05$). Notons que cet effet est large ($r_B = 0.61$). Pour ce qui est de la mémoire de travail, on n'observe également pas de différence significative entre les deux sous-groupes.

c. Analyses visuelles

Pour compléter nos analyses statistiques, nous avons établi des courbes linéaires en lien avec l'évolution des performances au fil du temps de chaque sous-groupe aux 2 tâches d'arithmétique et à celle de mémoire de travail. On peut observer que, dans les deux tâches arithmétiques (Figure 14 et 15), les enfants TV et les enfants à risque de TDC évoluent positivement, mais les performances des enfants TDC sont plus faibles que celles des TV. On note que les performances des enfants à risque de TDC à la tâche d'arithmétique sans contrainte de temps évoluent plus lentement que celles des enfants TV. Concernant la mémoire de travail (Figure 16), elle évolue positivement de la même manière dans les deux groupes.

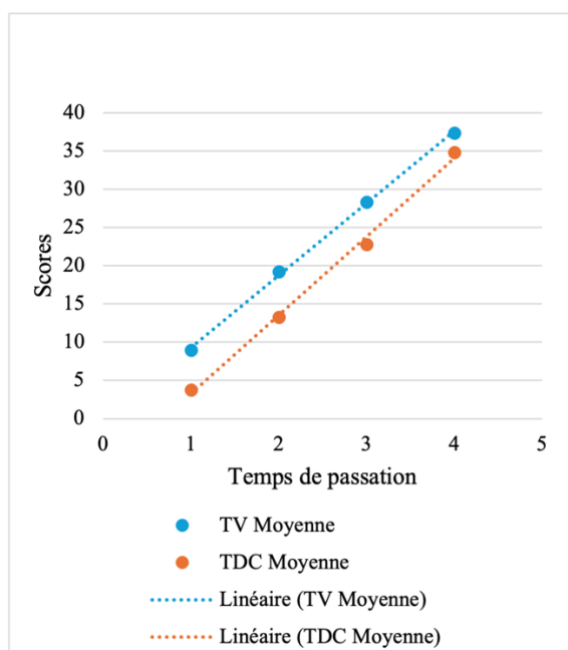


Figure 10 - Évolution des performances à la tâche de Fluences arithmétiques

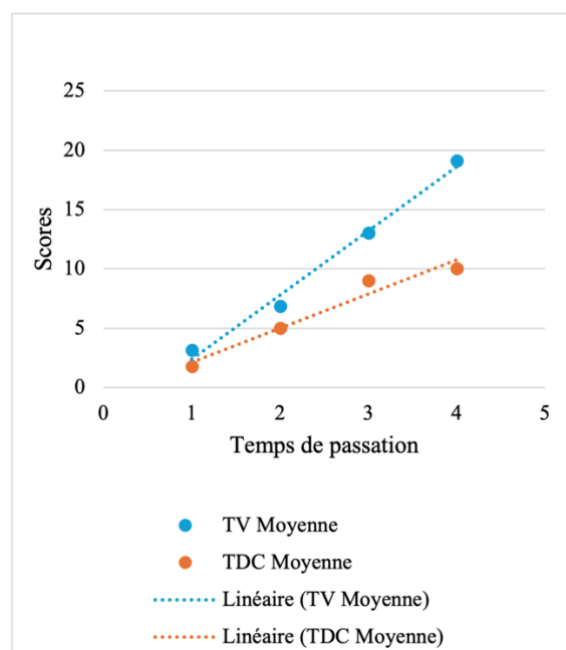


Figure 11 - Évolution des performances à la tâche d'Arithmétique sans CT

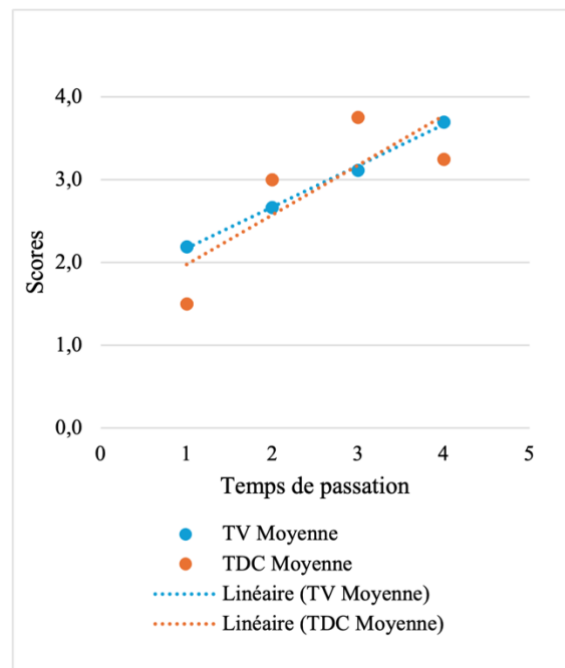


Figure 12 - Évolution des performances en mémoire de travail

Chapitre 5

DISCUSSION

Actuellement, de nombreuses études ont cherché à rendre compte du lien existant entre les doigts et les compétences numérique et arithmétiques mais peu ont cherché à mieux comprendre le rôle des habiletés sensori-motrices les compétences arithmétiques. Il semblerait que les HMF en début de maternelle prédisent les compétences en calcul en fin de maternelle (Asakawa & Sugimura, 2014; Barnes et al., 2011), tout comme les gnosies digitales (Fayol et al., 1998; Michaux et al., 2013; Noël, 2005). Cependant, des études longitudinales plus récentes sont moins catégoriques quant à la nature et à la puissance de ces lien qui peut être très faible, voire inexistant (Long et al., 2016; Newman, 2016; Van Rinsveld et al., 2020). Ce serait d'autres facteurs cognitifs, tels que la mémoire de travail, qui prédiraient les compétences arithmétiques (Michel et al., 2020). Cette dernière semble aider les enfants à passer de l'utilisation de stratégies digitales à celle de stratégies mentales (David, 2012). De plus, de récentes études contrebalancent le rôle des habiletés motrices fines sur les difficultés arithmétiques rencontrées chez des enfants atteints d'un trouble développemental de la coordination puisque d'autres processus cognitifs, comme les fonctions exécutives, semblent expliquer davantage ces difficultés (Neveu et al., 2024; Sartori et al., 2022).

Nous avons donc mené une étude longitudinale afin de mieux comprendre comment les doigts contribuent au développement de l'arithmétique, du début de la première primaire jusqu'à la fin de la première primaire, chez des enfants tout-venant ou à risque de développer un trouble développemental de la coordination. Dans le cadre de ce mémoire, nous avons exploré l'influence des habiletés sensori-motrices, impliquées dans l'utilisation des doigts, sur le développement des compétences arithmétiques à travers deux objectifs. Le premier tentait de déterminer si les composantes motrices (habiletés motrices fines et les gnosies digitales) en début de première primaire prédisaient les performances arithmétiques (faits arithmétiques et calcul procédural) en fin de deuxième primaire dans l'ensemble de notre population. Le second visait à étudier les stratégies employées tout au long de l'étude par quatre enfants à risque de développer un trouble développemental de la coordination, comparativement aux enfants tout-venant.

Pour vérifier nos hypothèses, nous avons donc réalisé cette étude longitudinale sur 67 enfants dont 63 tout-venants et 4 enfants à risque de TDC, du début de leur première primaire jusqu'à la fin de leur deuxième primaire. À chacun de ces enfants ont été administrés des tests évaluant la mémoire de travail, les gnosies digitales, les habiletés motrices fines ainsi que leurs compétences arithmétiques en termes de faits arithmétiques et de calcul procédural. Nous avons également relevé les stratégies utilisées lors de la réalisation des calculs procéduraux.

QUESTION 1 : HABILETES SENSORI-MOTRICES ET COMPETENCES ARITHMETIQUES

La première question de recherche que nous nous sommes posée est de savoir **si les habiletés sensori-motrices (gnosies digitales et habiletés motrices fines) des enfants en début de première primaire prédisent les performances arithmétiques de ces mêmes enfants en fin de deuxième primaire**. Afin de comprendre ce qu'il se passe au niveau développemental, nous nous sommes ensuite demandé *laquelle des deux habiletés digitales prédit le mieux les compétences arithmétiques des enfants, à chaque phase de tests ?* De nombreuses contradictions existent dans la littérature mais selon les études longitudinales les plus connues, on s'attendait à ce que les gnosies digitales prédisent les compétences arithmétiques (Fayol, Barrouillet et Marinthe, 1998, 2001 ; Noël, 2005 ; Penner-Wilger et al., 2007) tout comme les habiletés motrices fines (Asakawa et Sugimura, 2014 ; Penner-Wilger et al., 2007, Son et Meisels, 2006). Cependant, les gnosies digitales pourraient prédire les compétences arithmétiques plus tard dans le développement (Newman, 2016). Nous nous attendions également à ce que la mémoire de travail joue un rôle plus important que les habiletés motrices fines dans la prédiction des compétences arithmétiques (Michel et al., 2020).

Dans un premier temps, nos résultats indiquent que les gnosies digitales évaluées en début de première primaire ne possèdent aucun lien avec les deux compétences arithmétiques évaluées un an et demi plus tard. Nos résultats sont conformes avec ceux de Long et al. (2016) puisque, dans leur étude transversale, ils n'ont pas réussi à prouver l'existence d'une quelconque relation entre les gnosies digitales et les compétences de comptage et d'arithmétique. Elles ne prédisent donc pas les compétences arithmétiques des enfants évaluées ultérieurement. Ces données vont à l'encontre de notre hypothèse de départ et remettent en question la théorie fonctionnelle selon laquelle les gnosies digitales seraient essentielles au développement des compétences arithmétiques ultérieures (Gracia-Bafalluy et Noël, 2008). En

revanche, comme Newman (2016) l'a énoncé dans son étude, il se peut que les gnosies digitales prédisent les compétences arithmétiques de plus haut niveau, acquises au-delà de la deuxième primaire.

Comparativement aux gnosies digitales, les résultats de notre étude concernant les habiletés motrices fines suivent nos attentes de départ. En effet, ils démontrent que les HMF en début de première primaire sont positivement et significativement liées aux deux compétences arithmétiques en fin de deuxième primaire. Ainsi, tout comme Penner-Wilger et al. (2007) l'affirment, les enfants ayant de meilleures compétences au niveau des HMF sont également ceux qui ont de meilleures compétences en récupération de faits arithmétiques et de calcul procéduraux. Cependant, ces résultats équivalent ceux observés dans l'étude de Michel, Nolitor et Schneider (2020) ; une fois que nous avons intégré la mémoire de travail nous nous rendons compte que les HMF ne prédisent plus les compétences en arithmétique. Autrement dit, la mémoire de travail en début de première primaire explique davantage les résultats obtenus par les enfants un an et demi plus tard, dans les deux tâches arithmétiques. Ceci rejoint également les études précédentes qui ont mis en exergue que la mémoire de travail prédisait les compétences arithmétiques entre la première primaire et la troisième primaire (David, 2012 ; Geary, Hoard et Nugent, 2012 ; Newman, 2016 ; Noël, Seron et Trovarelli, 2004). Une explication probable est que les habiletés motrices fines peuvent effectivement prédire les compétences arithmétiques mais elles seraient médiées en grande partie par la mémoire de travail (Gashaj et al., 2019). Si on se réfère aux conclusions de Fischer, Suggate et Stoeger (2022), la mémoire de travail prédit davantage les compétences de comptage et de comptage des doigts que les habiletés motrices. Or, on sait que les compétences en comptage servent de base au développement des compétences arithmétiques (Roesch et Moeller, 2015). Donc, cela pourrait expliquer pourquoi la mémoire de travail prédisait davantage les compétences arithmétiques dans notre étude. Il est tout de même important de noter que les liens observés entre la mémoire de travail et les deux habiletés arithmétiques sont faibles, amenant ainsi à relativiser la force de nos résultats.

Dans un second temps, lorsqu'on analyse nos résultats d'un point de vue développemental, on s'aperçoit que la tâche de récupération de faits arithmétiques est liée aux gnosies digitales et aux habiletés motrices fines du début de la première primaire jusqu'au début de la deuxième primaire. Ce constat remet en question ce que nous énoncions plus haut car, après avoir effectué des régressions linéaires, on remarque que seules les gnosies prédisent

significativement les compétences arithmétiques obtenues par les enfants du début de la première primaire au début de la deuxième primaire. Ces données sont intéressantes et diffèrent de celles de l'étude de Newman (2016) car, selon l'auteur, les gnosies varient avec l'âge et impactent davantage les enfants plus âgés, l'amenant à conclure que si les gnosies ne sont pas correctement développées tôt, elles peuvent impacter négativement les compétences arithmétiques, plus tard. Selon nos résultats, il semblerait que les gnosies digitales soient davantage importantes au début de l'apprentissage arithmétique traduisant, peut-être, d'un rôle fonctionnel dans le développement des premières compétences arithmétiques (Gracia-Bafalluy et Noël, 2008). À cet âge, l'enfant commence à développer des stratégies de récupération (Geary et al., 1991) qui pourraient être liées au niveau neuronal à la gnosie des doigts (Soylu et al., 2018). Ainsi, les gnosies pourraient jouer un rôle fonctionnel et localisationniste dans le développement des faits arithmétiques. De plus, comme cela est mentionné dans l'étude de Penner-Wilger et al. (2007), les gnosies digitales expliquent une part unique et spécifique des compétences en récupération de faits arithmétiques puisque la mémoire de travail n'influençait pas les résultats.

Concernant la tâche d'arithmétique sans contrainte de temps, seules les gnosies digitales prédisaient les compétences en calcul procédural de la fin de la première primaire au début de la deuxième primaire. Ici aussi, la mémoire de travail n'entravait pas les résultats constatés. Cela rejoint également les études précédentes qui prônaient l'importance des gnosies digitales dans le développement des compétences arithmétiques, notamment celle de Reeve et Humberstone (2011) qui a mis en évidence que les gnosies digitales et la mémoire de travail étaient indépendamment liées aux performances en calcul des enfants au début de l'apprentissage formel. Ces résultats permettent de compléter ceux de l'étude de Penner-Wilger et al. (2007) puisque nous rendons compte que les gnosies digitales et les habiletés motrices fines n'expliquent pas de la même façon les compétences arithmétiques. En effet, les habiletés motrices fines ne semblent pas entretenir une relation constante avec les compétences en calcul durant l'entièreté de la petite enfance, contrairement à ce qui était indiqué dans l'étude de Asakawa et Sugimura (2014).

Notons que les relations établies entre les gnosies digitales et les compétences arithmétiques sont toutes faibles donc cela relativise la force de nos conclusions. D'un point de vue longitudinal, il semblerait toutefois que les gnosies digitales soient importantes au début de l'apprentissage de l'arithmétique tandis que les habiletés motrices fines le sont plus

tardivement, lorsque des stratégies de calculs plus efficaces doivent être engagées pour réaliser des problèmes arithmétiques de plus haut niveau (Laski et al., 2014).

QUESTION 2 : TROUBLE DEVELOPPEMENTAL DE LA COORDINATION ET STRATEGIES DE CALCUL

La seconde question de recherche que nous nous sommes posée est de savoir **quelle est l'évolution des stratégies de calcul employées par les enfants à risque de développer un trouble développemental de la coordination, comparativement aux enfants tout-venant ?** Plus précisément, nous voulions savoir si *les 4 enfants à risque de développer un TDC utilisent moins leurs doigts pour réaliser des calculs à un ou deux chiffres, comparativement aux enfants tout-venant* et si *ces mêmes enfants obtiennent de moins bonnes performances arithmétiques et mnésiques que les enfants tout-venant*. En lien avec la littérature, chez les enfants tout-venant, nous nous attendions à observer une diminution de l'utilisation des stratégies des doigts en faveur de stratégies mentales plus complexes et efficaces comme la récupération de faits arithmétiques et le calcul procédural (Farrington-Flint et al., 2009; Jordan et al., 2008). Actuellement, il n'existe pas de données concernant l'évolution des stratégies chez les enfants à risque de TDC. Cependant, puisqu'ils rencontrent des difficultés à automatiser et à contrôler leurs mouvements digitaux (Adams et al., 2014; Gama et al., 2016), on peut s'attendre à ce qu'ils utilisent moins ce type de stratégies pour résoudre des calculs. De plus, quelques études ont démontré l'existence de difficultés au niveau de la mémoire de travail chez ces enfants (Alloway & Archibald, 2008; Maziero et al., 2020; Neveu et al., 2024). Or, on sait que la mémoire de travail est impliquée au début de l'apprentissage des compétences arithmétiques (Geary et al., 2004) donc si des difficultés sont présentes à ce niveau, on peut s'attendre à ce que les enfants à risque de TDC éprouvent des difficultés au niveau de la récupération de faits arithmétiques ou de calcul procédural et donc utilisent moins ces stratégies abstraites (David, 2012).

Afin d'en savoir un peu plus sur l'emploi des stratégies de ces enfants, nous nous sommes demandé si *les 4 enfants à risque de développer un TDC obtiennent de moins bonnes performances arithmétiques et mnésiques que les enfants tout-venant*. En lien avec ce qui est dit dans la littérature, nous nous attendions à ce que les enfants à risque de TDC éprouvent des difficultés aux deux tâches arithmétiques (Pieters et al., 2012, 2015). De nombreuses études ont effectivement démontré que de faibles habiletés motrices fines pouvaient entraîner de faibles

compétences arithmétiques donc nous devions observer une différence entre les deux sous-groupes au niveau de l'arithmétique (Asakawa et Sugimura, 2014 ; Barnes et al., 2011). Enfin, comme dit plus haut, nous nous attendions à ce que la mémoire de travail soit plus faible que chez les enfants TV. Pour l'ensemble de nos résultats et des solutions que nous apportons à cette deuxième question de recherche, chacun des lecteurs doit prendre le recul nécessaire pour les assimiler car nous comparons 63 enfants tout-venant avec seulement 4 enfants à risque de TDC, ce qui est très faiblement représentatif d'une population plus générale. Nos résultats concernent donc simplement ces 4 enfants et non l'ensemble des enfants à risque de développer un trouble développemental de la coordination.

Normalement, au début de l'apprentissage formel des mathématiques, les enfants ont tendance à utiliser leurs doigts pour décharger leur mémoire de travail immature (Geary et al., 2004). Petit à petit, l'utilisation des doigts diminue en faveur de stratégies mentales plus complexes comme la récupération de faits arithmétiques ou le calcul mental (Baroody, 1987 ; Farrington-Flint et al., 2009) car la mémoire de travail s'améliore (David, 2012 ; Fias et al., 2013 ; Geary et al., 2000). Dans notre étude, c'est effectivement ce qu'on observe chez les enfants TV mais pas chez les 4 enfants à risque de TDC. En effet, ces derniers utilisaient plus leurs doigts que les enfants TV au début de la première et de la deuxième primaire. Plus précisément, les 4 enfants à risque de TDC utilisaient en grande majorité leurs doigts (45% au temps 1 et 41% au temps 3) et le calcul procédural (27% au temps 1 et 24% au temps 2) tandis que les enfants TV favorisaient les stratégies de récupération (33% au temps 1 et 26% au temps 3) et de calcul procédural (29% au temps 1 et 34% au temps 3). Les enfants TV semblaient donc être déjà passés à des stratégies mentales tandis que les 4 enfants à risque de TDC semblaient avoir plus de difficultés à passer de stratégies externes à des stratégies internes. Ces résultats sont étonnants puisque, ayant des difficultés au niveau des habiletés motrices fines, on ne s'attendait pas à ce que les enfants à risque de TDC utilisent autant leurs doigts pour réaliser des calculs. On pourrait alors se dire qu'ils utilisaient leurs doigts pour contrer des difficultés présentes au niveau de leur mémoire de travail, puisque nous savons que les enfants atteints de TDC peuvent éprouver des difficultés à ce niveau (Alloway et Archibald, 2008 ; Maziero et al., 2020 ; Neveu et al., 2024). Un argument supplémentaire est qu'en fin de deuxième primaire, on se rend compte qu'ils utilisaient moins de stratégies de récupération de faits que les enfants TV, ce qui peut être en lien avec des difficultés en mémoire de travail. Cependant, nous n'avons observé aucune différence entre les deux sous-groupes concernant leurs performances en mémoire de travail ou en récupération de faits arithmétiques. L'utilisation intensive et

persistante des doigts par les 4 enfants à risque de TDC ne peut donc pas s'expliquer par une faiblesse au niveau de la mémoire de travail ou de la récupération de faits en mémoire à long terme.

Pour en savoir plus, nous nous sommes concentrés sur la période de fin de deuxième primaire. Nous avons remarqué que les 4 enfants à risque de TDC utilisaient davantage des stratégies qu'ils qualifiaient « inconnues » ou des stratégies de doigts, comparativement aux enfants TV qui favorisaient des stratégies de calcul procédural et de récupération de faits. Parallèlement à ces résultats, les 4 enfants à risque ont obtenu de moindres performances à la tâche d'arithmétique sans contrainte de temps en fin de deuxième primaire. En se référant aux observations de l'étude de Farrington-Flint et al. (2009), il se pourrait que les 4 enfants à risque de TDC aient utilisé des stratégies inefficaces pour résoudre leurs calculs (ex. utilisation des doigts et stratégie de « comptage all ») tandis que les enfants TV ont utilisé des stratégies de haut niveau, efficaces (ex. récupération de faits et stratégie de « comptage min ») qui influencent directement les performances obtenues en calcul procédural.

Pour donner suite à ces observations, nous voulions discuter qualitativement des résultats de façon développementale. Lorsqu'on analyse visuellement la tendance évolutive de la stratégie des doigts, on voit que les deux sous-groupes utilisaient de moins en moins cette stratégie au fil du temps. De plus, les performances des 4 enfants à risque étaient légèrement moindres que celles des enfants TV dans les deux tâches arithmétiques mais elles augmentaient positivement. On pourrait alors se dire que les 4 enfants à risque de TDC possèdent un retard de développement de l'arithmétique plutôt qu'un déficit, comme l'ont énoncé Pieters et al. (2012). Une hypothèse envisageable est qu'ils auraient commencé à utiliser leurs doigts plus tardivement que les enfants TV et que cela ait pu impacter le développement de concepts fondamentaux tels que le comptage, le dénombrement et le principe de cardinalité⁶ (cf. Figure 2 : modèle de Roesch et Moeller, 2015). En effet, plusieurs études ont démontré que les doigts et le geste moteur permettent de se représenter spatialement les nombres et de créer des modèles de doigts correspondant à chaque opérande d'un calcul (Kullberg et Björklund, 2020 ; Kullberg et al., 2020 ; Newman et Soyulu, 2014). Donc, les 4 enfants à risque de TDC auraient ainsi pu utiliser leurs doigts inefficacement, au début de l'apprentissage des concepts numériques et arithmétiques, donc développer des stratégies de comptage infructueuses impactant

⁶ Comprendre que le dernier mot-numérique produit correspond au nombre d'éléments inclus dans une collection.

indirectement les performances arithmétiques obtenues plus tard, en fin de deuxième primaire. Une autre hypothèse explicative serait que les 4 enfants à risque de TDC possèdent un trouble spécifique des mathématiques. En effet, dans la littérature, certaines études ont prouvé que l'utilisation persistante des doigts peut être le signe de difficultés particulières en mathématiques (Geary et al., 2004 ; Jordan, Hanich et Kaplan, 2003 ; Jordan et al., 2008). Les enfants de notre échantillon auraient ainsi plus de mal à se séparer du support externe pour utiliser des stratégies internes, procédurales, plus efficaces. En effet, la période de test des enfants de notre étude se situe dans la période de transition entre ces deux types de stratégies (Geary et al., 1991). En première primaire, les enfants apprennent de nouveaux concepts numériques et arithmétiques mettant en jeu de nombreuses ressources cognitives. Par la suite, les procédures de calcul s'automatisent et allègent la mémoire de travail. Étant donné cela, les enfants TV ont réussi à automatiser des stratégies plus matures de récupération de faits en mémoire à long terme et de calcul procédural tandis que les 4 enfants à risque de TDC pourraient éprouver des difficultés à automatiser les procédures de calcul, donc à se détacher des doigts pour réaliser des problèmes arithmétiques. Ces difficultés d'automatisation rejoignent les résultats d'Adams et al. (2014), de Gama et al. (2016) et de Visser (2003) où les enfants ayant un TDC ont des difficultés à automatiser leurs schémas corporels.

LIMITES

Dans un premier temps, on relève de nombreuses limites concernant les phases de passation. Étant donné le nombre conséquent de tests que nous devions faire passer aux enfants, la durée de l'évaluation variait entre 1h30 et 1h45. Or, il est difficile pour un enfant âgé de 5, 6 ou 7 ans de rester concentré aussi longtemps. De plus, au fur et à mesure de l'avancée de l'étude, les participants manifestaient de la réticence à l'idée de passer l'ensemble des épreuves. Cela peut avoir impacté les performances obtenues par chacun d'eux et ainsi ne pas représenter leurs réelles capacités. Dans le cadre de ce mémoire, un effet de fatigue peut avoir joué un rôle important sur les épreuves d'arithmétique puisqu'elles étaient réalisées en fin de passation. Une autre limite est à relever et concerne les évaluateurs. Chaque année, différentes personnes réalisaient les tests et d'une année à l'autre, ces intervenants changeaient. Malgré les consignes de passation claires, la fidélité inter-juge ne peut être assurée car des erreurs de cotation peuvent avoir été commises, relativisant les performances obtenues par les enfants. Notons également que les conditions de passation étaient irrégulières. Pour plus de facilité, nous réalisions les évaluations à l'école. De fait, parfois nous avions accès à une pièce calme mais d'autres fois nous étions dans des environnements bruyants ou fortement distrayants pour l'enfant (ex. vue sur la cour de récréation, au fond de la classe, dans le self...). Tout ceci pourrait expliquer les variabilités interindividuelles et intra-individuelles constatées aux différents temps de passation.

Dans un second temps, nos données ne reflètent que peu ce qu'il peut se passer au niveau de la population mondiale. En effet, l'échantillon sur lequel nous avons réalisé nos statistiques est faible puisqu'il ne contient que 67 enfants. De plus, parmi ces enfants, nous n'avions que 4 enfants à risque de développer un trouble de la coordination, ce qui ne nous permettait pas de tirer des conclusions éclairées et justes. Ces enfants ont été sélectionnés car ils obtenaient un indice de dextérité manuelle en-deçà du percentile 16 à 3 moments de l'étude. Il s'agissait donc pour nous de la preuve que ces difficultés persistaient et pouvaient traduire d'un potentiel trouble développemental de la coordination. Pourtant, les tâches, issues de la MABC-II, qui ont permis d'évaluer la dextérité motrice en première primaire étaient standardisées pour les enfants âgés de 7 à 11 ans. Ces dernières étaient probablement trop difficiles pour les enfants de l'étude, à ce moment-là. Ainsi, l'échantillon d'enfants à risque de développer un TDC n'était sûrement pas représentatif. Ceci a pu influencer nos résultats statistiques étant donné les nombreuses incongruences et la faiblesse globale de la puissance de nos tests statistiques.

PERSPECTIVES FUTURES

Suite aux lacunes décelées dans cette étude, de nombreuses questions subsistent nous amenant à envisager des pistes de recherche pour le futur.

Tout d'abord, étant donné le peu de données dans la littérature, il serait intéressant de mener une étude longitudinale ayant pour objectif de rendre compte du rôle des habiletés motrices fines sur les compétences arithmétiques à travers le trouble développemental de la coordination. Afin que cela soit possible, il serait pertinent de récolter des données auprès de deux groupes d'enfants appariés au niveau de l'âge, du niveau scolaire, du sexe et du QI, dont l'un serait constitué d'enfants à risque de développer un trouble développemental de la coordination ($N \geq 50$) et l'autre d'enfants tout-venant ($N \geq 50$). Les habiletés motrices fines devraient être évaluées à l'aide de tests adaptés à l'âge des enfants pour que cela rende compte de leur niveau de dextérité motrice.

Ensuite, il serait intéressant d'inclure des enfants à partir de la première maternelle jusqu'à leur deuxième voire troisième primaire. En effet, nous savons qu'il s'agit d'une phase de transition importante dans le développement de l'arithmétique, donc dans l'utilisation de stratégies de calcul pour résoudre des problèmes arithmétiques (Geary et al., 1991). Or, c'est spécifiquement à ce moment-là que les doigts entrent en jeu. Il pourrait donc être judicieux de ne faire passer que des épreuves numériques et arithmétiques qui suivent l'évolution « classique » des apprentissages. Par conséquent, des épreuves évaluant les concepts de base tels que le comptage, le dénombrement et la cardinalité pourraient être proposées en plus des épreuves évaluant les concepts plus élaborés tels que la récupération de faits en mémoire à long terme et la résolution d'additions à un ou deux chiffres (en fonction du niveau scolaire de l'enfant).

Pour compléter les données, il semble également important de demander aux enfants d'indiquer quelle stratégie ils ont utilisée et comment ils ont spécifiquement fait, afin de rendre compte de façon plus objective de l'évolution de l'utilisation des différentes stratégies dans le développement de l'arithmétique, en particulier chez les enfants atteints de TDC. En effet, se concentrer sur les stratégies employées permet de compléter la littérature qui n'est actuellement pas en mesure de nous renseigner à ce niveau-là. De plus, il serait intéressant de filmer les mains des enfants pour savoir exactement comment ils utilisent leurs doigts pour résoudre les calculs.

Utiliser un échantillon d'enfants atteints d'un TDC permettrait également de savoir si les difficultés arithmétiques observées proviennent effectivement de leur trouble moteur ou si une autre explication est plausible. Ainsi, pour s'assurer du rôle des habiletés motrices fines dans le développement arithmétique, il semble pertinent d'évaluer et de contrôler l'influence de la mémoire de travail puisque de nombreuses études ont prouvé qu'elle jouait un rôle important dans le développement des compétences arithmétiques.

Pour terminer, l'ensemble des phases de tests devraient être réalisées dans des conditions strictes et similaires entre les enfants pour éviter qu'un facteur quelconque ne vienne entraver les performances de chacun. De plus, il semble également important que ce soient les mêmes évaluateurs qui assurent la passation afin de diminuer la variabilité inter-juge.

CONCLUSION

Le rôle des doigts dans le développement de l'arithmétique est encore questionné actuellement dans la recherche, notamment pour aider les professionnels à mieux comprendre comment l'enfant développe ses compétences arithmétiques. C'est pour cela que notre étude a été menée afin de rendre compte du rôle des doigts, et particulièrement des habiletés sensori-motrices dans le développement des compétences arithmétiques chez des enfants tout-venant ou à risque de développer un trouble développemental de la coordination.

Dans un premier temps, nous avons étudié la valeur prédictive des habiletés sensori-motrices en début de première primaire sur les performances arithmétiques en fin de deuxième primaire. Nos résultats ne nous ont pas permis de mettre en évidence le rôle fonctionnel des habiletés motrices fines, puisque la mémoire de travail expliquait davantage les performances obtenues aux tâches arithmétiques en fin de deuxième primaire. De plus, les gnosies digitales n'expliquaient également pas les performances arithmétiques. En revanche, nos résultats ont mis en évidence le rôle fonctionnel des gnosies digitales dans le développement de la récupération de faits arithmétiques et de la réalisation d'additions et de soustractions à 1 ou 2 chiffres jusqu'au début de la deuxième primaire. Notons que dans l'ensemble, la force de nos résultats est faible ce qui ne nous permet pas d'affirmer nos dires.

Dans un second temps, nous avons analysé qualitativement les stratégies utilisées par 4 enfants à risque de développer un trouble développemental de la coordination. De manière générale, et comparativement aux enfants tout-venant, ces 4 enfants utilisaient plus leurs doigts et moins la récupération de faits arithmétiques en mémoire à long terme. Nous avons donc comparé les performances aux tâches arithmétiques et à la tâche évaluant la mémoire de travail entre les deux sous-groupes. Les 4 enfants à risque de développer un trouble développemental de la coordination obtenaient des performances arithmétiques similaires aux enfants tout-venant, tout comme pour la mémoire de travail. Cependant, ils obtenaient des résultats plus faibles lorsqu'ils devaient résoudre des additions et des soustractions à 1 ou 2 chiffres en fin de deuxième primaire. Les 4 enfants à risque semblaient avoir plus de difficultés à automatiser des procédures de calcul efficaces les empêchant de se détacher du support externe que sont les doigts. En revanche, nous ne sommes pas en mesure de dire quelle variable a influencé ces observations. Nous supposons qu'il y ait eu des difficultés au niveau des concepts de base de l'arithmétique, ce qui pourrait expliquer ces résultats mais rien ne nous permet de l'affirmer.

BIBLIOGRAPHIE

- Adams, I. L. J., Lust, J. M., Wilson, P. H., & Steenbergen, B. (2014). Compromised motor control in children with DCD : A deficit in the internal model?—A systematic review. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 47, 225-244. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2014.08.011>
- Adams, J. W., & Hitch, G. J. (1997). Working Memory and Children's Mental Addition. *Journal of Experimental Child Psychology*, 67(1), 21-38. <https://doi.org/10.1006/jecp.1997.2397>
- Albaret, J.-M., Arnaud, C., Assaiante, C., Gonzalez-Monge, S., Huron, C., Jolly, C., Kaiser, M.-L., Liotard, P., Mazeau, M., Tallet, J., Vaivre-Douret, L., & Woollven, M. (2019). *Trouble développemental de la coordination ou dyspraxie* (p. Paris : Inserm : Éditions EDP Sciences (ISSN : 0990) [Report, Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM)]). <https://inserm.hal.science/inserm-03385007>
- Alibali, M. W., & DiRusso, A. A. (1999). The function of gesture in learning to count : More than keeping track. *Cognitive Development*, 14(1), 37-56. [https://doi.org/10.1016/S0885-2014\(99\)80017-3](https://doi.org/10.1016/S0885-2014(99)80017-3)
- Alloway, T. P. (2011). A comparison of working memory profiles in children with ADHD and DCD. *Child Neuropsychology*, 17(5), 483-494. <https://doi.org/10.1080/09297049.2011.553590>
- Alloway, T. P., & Archibald, L. (2008). Working Memory and Learning in Children With Developmental Coordination Disorder and Specific Language Impairment. *Journal of Learning Disabilities*, 41(3), 251-262. <https://doi.org/10.1177/0022219408315815>
- Andres, M., Luca, S. D., & Pesenti, M. (2008). Finger counting : The missing tool? *Behavioral and Brain Sciences*, 31(6), 642-643. <https://doi.org/10.1017/S0140525X08005578>
- Andres, M., Michaux, N., & Pesenti, M. (2012). Common substrate for mental arithmetic and finger representation in the parietal cortex. *NeuroImage*, 62(3), 1520-1528. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2012.05.047>
- Andres, M., Seron, X., & Olivier, E. (2007). Contribution of Hand Motor Circuits to Counting. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 19(4), 563-576.

<https://doi.org/10.1162/jocn.2007.19.4.563>

- 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>
- Asonitou, K., Koutsouki, D., Kourtessis, T., & Charitou, S. (2012). Motor and cognitive performance differences between children with and without developmental coordination disorder (DCD). *Research in Developmental Disabilities*, 33(4), 996-1005. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2012.01.008>
- Baddeley, A. (1992). Working Memory. *Science*, 255(5044), 556-559. <https://doi.org/10.1126/science.1736359>
- Barnes, M. A., Stubbs, A., Raghubar, K. P., Agostino, A., Taylor, H., Landry, S., Fletcher, J. M., & Smith-Chant, B. (2011). Mathematical Skills in 3- and 5-Year-Olds with Spina Bifida and Their Typically Developing Peers : A Longitudinal Approach. *Journal of the International Neuropsychological Society*, 17(3), 431-444. <https://doi.org/10.1017/S1355617711000233>
- Barnhart, R. C., Davenport, M. J., Epps, S. B., & Nordquist, V. M. (2003). Developmental Coordination Disorder. *Physical Therapy*, 83(8), 722-731. <https://doi.org/10.1093/ptj/83.8.722>
- Baroody, A. J. (1987). The Development of Counting Strategies for Single-Digit Addition. *Journal for Research in Mathematics Education*, 18(2), 141-157. <https://doi.org/10.5951/jresmetheduc.18.2.0141>
- 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>
- Barrocas, R., Roesch, S., Gawrilow, C., & Moeller, K. (2020). Putting a Finger on Numerical Development – Reviewing the Contributions of Kindergarten Finger Gnosis and Fine Motor Skills to Numerical Abilities. *Frontiers in Psychology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01012>
- Barrouillet, P., Mignon, M., & Thevenot, C. (2008). Strategies in subtraction problem solving in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 99(4), 233-251. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2007.12.001>

- Bender, A., & Beller, S. (2011). Fingers as a Tool for Counting – Naturally Fixed or Culturally Flexible? *Frontiers in Psychology*, 2. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00256>
- 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>
- Bernardi, M., Leonard, H. C., Hill, E. L., Botting, N., & Henry, L. A. (2018). Executive functions in children with developmental coordination disorder: A 2-year follow-up study. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 60(3), 306-313. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13640>
- Biotteau, M., Danna, J., Baudou, É., Puyjarinet, F., Velay, J.-L., Albaret, J.-M., & Chaix, Y. (2019). Developmental coordination disorder and dysgraphia: Signs and symptoms, diagnosis, and rehabilitation. *Neuropsychiatric Disease and Treatment*, 15, 1873-1885. <https://doi.org/10.2147/NDT.S120514>
- Blank, R., Barnett, A. L., Cairney, J., Green, D., Kirby, A., Polatajko, H., Rosenblum, S., Smits-Engelsman, B., Sugden, D., Wilson, P., & Vinçon, S. (2019). International clinical practice recommendations on the definition, diagnosis, assessment, intervention, and psychosocial aspects of developmental coordination disorder. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 61(3), 242-285. <https://doi.org/10.1111/dmcn.14132>
- Brannon, E. M. (2006). The representation of numerical magnitude. *Current Opinion in Neurobiology*, 16(2), 222-229. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2006.03.002>
- Camos, V., Fayol, M., & Barrouillet, P. (1999). L'activité de dénombrement chez l'enfant: Double tâche ou procédure? *L'Année psychologique*, 99(4), 623-645. <https://doi.org/10.3406/psy.1999.28497>
- Cardoso, A. A., Magalhães, L. C., & Rezende, M. B. (2014). Motor Skills in Brazilian Children with Developmental Coordination Disorder versus Children with Motor Typical Development. *Occupational Therapy International*, 21(4), 176-185. <https://doi.org/10.1002/oti.1376>
- 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/jresmetheduc.15.3.0179>
- Clements, D. H., & Sarama, J. (2007). Effects of a Preschool Mathematics Curriculum:

- Summative Research on the Building Blocks Project. *Journal for Research in Mathematics Education*, 38(2), 136-163. <https://doi.org/10.2307/30034954>
- Cohen, J. (1989) *Sector: Set correlation analysis*. Evenson, IL: SYSTAT.
- Costa, A. J., Silva, J. B., Pinheiro-Chagas, P., Krinzinger, H., Lonnemann, J., Willmes, K., Wood, G., & Haase, V. G. (2011). A Hand Full of Numbers : A Role for Offloading in Arithmetics Learning? *Frontiers in Psychology*, 2. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00368>
- Crollen, V., Mahe, R., Collignon, O., & Seron, X. (2011). The role of vision in the development of finger–number interactions : Finger-counting and finger-montring in blind children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 109(4), 525-539. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.03.011>
- Crollen, V., & Noël, M.-P. (2015). The role of fingers in the development of counting and arithmetic skills. *Acta Psychologica*, 156, 37-44. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2015.01.007>
- David, C. V. (2012). Working memory deficits in Math learning difficulties : A meta-analysis. *International Journal of Developmental Disabilities*, 58(2), 67-84. <https://doi.org/10.1179/2047387711Y.0000000007>
- Deconinck, F. J. A., Clercq, D. D., Savelsbergh, G. J. P., Coster, R. V., Oostra, A., Dewitte, G., & Lenoir, M. (2006). Adaptations to Task Constraints in Catching by Boys with DCD. *Adapted Physical Activity Quarterly*, 23(1), 14-30. <https://doi.org/10.1123/apaq.23.1.14>
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44(1), 1-42. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(92\)90049-N](https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90049-N)
- Dehaene, S. (2001). Précis of The Number Sense. *Mind & Language*, 16(1), 16-36. <https://doi.org/10.1111/1468-0017.00154>
- Dewey, D., Kaplan, B. J., Crawford, S. G., & Wilson, B. N. (2002). Developmental coordination disorder : Associated problems in attention, learning, and psychosocial adjustment. *Human Movement Science*, 21(5), 905-918. [https://doi.org/10.1016/S0167-9457\(02\)00163-X](https://doi.org/10.1016/S0167-9457(02)00163-X)
- Di Luca, S., & Pesenti, M. (2011). Finger Numeral Representations : More than Just Another Symbolic Code. *Frontiers in Psychology*, 2. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00272>

- Dionne, E., Majnemer, A., Beauchamp, M. H., & Brossard-Racine, M. (2024). Factors associated with mathematical capacity in children with Developmental Coordination Disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 147, 104710. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2024.104710>
- Domahs, F., Moeller, K., Huber, S., Willmes, K., & Nuerk, H.-C. (2010). Embodied numerosity : Implicit hand-based representations influence symbolic number processing across cultures. *Cognition*, 116(2), 251-266. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.05.007>
- 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>
- Farrington-Flint, L., Vanuxem-Cotterill, S., & Stiller, J. (2009). Patterns of problem-solving in children's literacy and arithmetic. *British Journal of Developmental Psychology*, 27(4), 815-834. <https://doi.org/10.1348/026151008X383148>
- Fayol, M., Barrouillet, P., & Marinthe, C. (1998). Predicting arithmetical achievement from neuro-psychological performance : A longitudinal study. *Cognition*, 68(2), B63-B70. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(98\)00046-8](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(98)00046-8)
- Fayol, M., & Seron, X. (2005). About Numerical Representations : Insights from Neuropsychological, Experimental, and Developmental Studies. In *The Handbook of Mathematical Cognition*. Psychology Press.
- Fias, W., Menon, V., & Szucs, D. (2013). Multiple components of developmental dyscalculia. *Trends in Neuroscience and Education*, 2(2), 43-47. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2013.06.006>
- Fischer, J.-P. (1993). De quelques notions-clés concernant l'acquisition du nombre. *Faits de langues*, 1(2), 7-16. <https://doi.org/10.3406/flang.1993.1294>
- Fischer, U., Suggate, S. P., Schmir, J., & Stoeger, H. (2018). Counting on fine motor skills : Links between preschool finger dexterity and numerical skills. *Developmental Science*, 21(4), e12623. <https://doi.org/10.1111/desc.12623>
- Fischer, U., Suggate, S. P., & Stoeger, H. (2022). Fine motor skills and finger gnosis contribute to preschool children's numerical competencies. *Acta Psychologica*, 226, 103576. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2022.103576>

- Friso-van den Bos, I., van der Ven, S. H. G., Kroesbergen, E. H., & van Luit, J. E. H. (2013). Working memory and mathematics in primary school children : A meta-analysis. *Educational Research Review*, 10, 29-44. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2013.05.003>
- FÜrst, A. J., & Hitch, G. J. (2000). Separate roles for executive and phonological components of working memory in mental arithmetic. *Memory & Cognition*, 28(5), 774-782. <https://doi.org/10.3758/BF03198412>
- Fuson, K. C., & Fuson, A. M. (1992). Instruction Supporting Children's Counting on for Addition and Counting up for Subtraction. *Journal for Research in Mathematics Education*, 23(1), 72-78. <https://doi.org/10.5951/jresemetheduc.23.1.0072>
- Fuson, K. C., Richards, J., & Briars, D. J. (1982). The Acquisition and Elaboration of the Number Word Sequence. In C. J. Brainerd (Éd.), *Children's Logical and Mathematical Cognition : Progress in Cognitive Development Research* (p. 33-92). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9466-2_2
- Gallahue, D. L., & Ozmun, J. C. (2005). Motor Development in Young Children. In *Handbook of Research on the Education of Young Children* (2^e éd.). Routledge.
- Gama, D. T., Ferracioli, M. de C., Hiraga, C. Y., & Pellegrini, A. M. (2016). Value of pre-cue information for motor tasks performed by children with developmental coordination disorder (DCD). *Motriz: Revista de Educação Física*, 22, 138-143. <https://doi.org/10.1590/S1980-6574201600030004>
- Geary, D. C. (2004). Mathematics and Learning Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 37(1), 4-15. <https://doi.org/10.1177/00222194040370010201>
- Geary, D. C., Brown, S. C., & Samaranayake, V. A. (1991). Cognitive addition : A short longitudinal study of strategy choice and speed-of-processing differences in normal and mathematically disabled children. *Developmental Psychology*, 27(5), 787-797. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.27.5.787>
- Geary, D. C., Hamson, C. O., & Hoard, M. K. (2000). Numerical and Arithmetical Cognition : A Longitudinal Study of Process and Concept Deficits in Children with Learning Disability. *Journal of Experimental Child Psychology*, 77(3), 236-263. <https://doi.org/10.1006/jecp.2000.2561>
- Geary, D. C., Hoard, M. K., Byrd-Craven, J., & Catherine DeSoto, M. (2004). Strategy choices in simple and complex addition : Contributions of working memory and counting

- knowledge for children with mathematical disability. *Journal of Experimental Child Psychology*, 88(2), 121-151. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2004.03.002>
- Geary, D. C., Hoard, M. K., & Nugent, L. (2012). Independent contributions of the central executive, intelligence, and in-class attentive behavior to developmental change in the strategies used to solve addition problems. *Journal of Experimental Child Psychology*, 113(1), 49-65. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2012.03.003>
- GERSTMANN, J. (1940). SYNDROME OF FINGER AGNOSIA, DISORIENTATION FOR RIGHT AND LEFT, AGRAPHIA AND ACALCULIA: LOCAL DIAGNOSTIC VALUE. *Archives of Neurology & Psychiatry*, 44(2), 398-408. <https://doi.org/10.1001/archneurpsyc.1940.02280080158009>
- Gomez, A., & Huron, C. (2020). Subitizing and counting impairments in children with developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 104, 103717. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2020.103717>
- Gomez, A., Piazza, M., Jobert, A., Dehaene-Lambertz, G., Dehaene, S., & Huron, C. (2015). Mathematical difficulties in developmental coordination disorder: Symbolic and nonsymbolic number processing. *Research in Developmental Disabilities*, 43-44, 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2015.06.011>
- Gould, P. (2017). Mapping the acquisition of the number word sequence in the first year of school. *Mathematics Education Research Journal*, 29(1), 93-112. <https://doi.org/10.1007/s13394-017-0192-8>
- Gracia-Bafalluy, M., & Noël, M.-P. (2008). Does finger training increase young children's numerical performance? *Cortex*, 44(4), 368-375. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.020>
- Guedin, N., Thevenot, C., & Fayol, M. (2018). Des doigts et des nombres. *Psychologie Française*, 63(4), 379-399. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2017.07.001>
- Gunderson, E. A., Spaepen, E., & Levine, S. C. (2015). Approximate number word knowledge before the cardinal principle. *Journal of Experimental Child Psychology*, 130, 35-55. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2014.09.008>
- Henderson, S. E., Sugden, D. A., & Barnett, A. L. (2007). *Movement assessment battery for children-2* ((2nd ed.)). Harcourt Assessment.
- Jordan, N. C., Hanich, L. B., & Kaplan, D. (2003). A Longitudinal Study of Mathematical

- Competencies in Children With Specific Mathematics Difficulties Versus Children With Comorbid Mathematics and Reading Difficulties. *Child Development*, 74(3), 834-850. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00571>
- Jordan, N. C., Huttenlocher, J., & Levine, S. C. (1992). Differential calculation abilities in young children from middle- and low-income families. *Developmental Psychology*, 28(4), 644-653. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.28.4.644>
- 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., & Huttenlocher, J. (1994). Development of calculation abilities in middle- and low-income children after formal instruction in school. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 15(2), 223-240. [https://doi.org/10.1016/0193-3973\(94\)90014-0](https://doi.org/10.1016/0193-3973(94)90014-0)
- Kirby, A., Sugden, D., Beveridge, S., & Edwards, L. (2008). Developmental co-ordination disorder (DCD) in adolescents and adults in further and higher education. *Journal of Research in Special Educational Needs*, 8(3), 120-131. <https://doi.org/10.1111/j.1471-3802.2008.00111.x>
- Krajenbrink, H., Lust, J. M., Wilmot, K., & Steenbergen, B. (2023). Motor and cognitive dual-task performance under low and high task complexity in children with and without developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 135, 104453. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2023.104453>
- Krajewski, K., & Schneider, W. (2009). Early development of quantity to number-word linkage as a precursor of mathematical school achievement and mathematical difficulties : Findings from a four-year longitudinal study. *Learning and Instruction*, 19(6), 513-526. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2008.10.002>
- Krenger, M., & Thevenot, C. (2024). The use of fingers in addition : A longitudinal study in children from preschool to kindergarten. *Cognitive Development*, 70, 101431. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2024.101431>
- Kullberg, A., & Björklund, C. (2020). Preschoolers' different ways of structuring part-part-whole relations with finger patterns when solving an arithmetic task. *ZDM*, 52(4), 767-778. <https://doi.org/10.1007/s11858-019-01119-8>

- Kullberg, A., Björklund, C., Brkovic, I., & Runesson Kempe, U. (2020). Effects of learning addition and subtraction in preschool by making the first ten numbers and their relations visible with finger patterns. *Educational Studies in Mathematics*, 103(2), 157-172. <https://doi.org/10.1007/s10649-019-09927-1>
- Laski, E. V., Ermakova, A., & Vasilyeva, M. (2014). Early use of decomposition for addition and its relation to base-10 knowledge. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 35(5), 444-454. <https://doi.org/10.1016/j.appdev.2014.07.002>
- Laufer, Y., Ashkenazi, T., & Josman, N. (2008). The effects of a concurrent cognitive task on the postural control of young children with and without developmental coordination disorder. *Gait & Posture*, 27(2), 347-351. <https://doi.org/10.1016/j.gaitpost.2007.04.013>
- Le Corre, M., & Carey, S. (2007). One, two, three, four, nothing more : An investigation of the conceptual sources of the verbal counting principles. *Cognition*, 105(2), 395-438. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.10.005>
- Lindemann, O., Alipour, A., & Fischer, M. H. (2011). Finger Counting Habits in Middle Eastern and Western Individuals : An Online Survey. *Journal of Cross-Cultural Psychology*, 42(4), 566-578. <https://doi.org/10.1177/0022022111406254>
- Lingam, R., Golding, J., Jongmans, M. J., Hunt, L. P., Ellis, M., & Emond, A. (2010). The Association Between Developmental Coordination Disorder and Other Developmental Traits. *Pediatrics*, 126(5), e1109-e1118. <https://doi.org/10.1542/peds.2009-2789>
- Lingam, R., Hunt, L., Golding, J., Jongmans, M., & Emond, A. (2009). Prevalence of Developmental Coordination Disorder Using the DSM-IV at 7 Years of Age : A UK Population-Based Study. *Pediatrics*, 123(4), e693-e700. <https://doi.org/10.1542/peds.2008-1770>
- Long, I., Malone, S. A., Tolan, A., Burgoyne, K., Heron-Delaney, M., Witteveen, K., & Hulme, C. (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.org/10.1016/j.jecp.2016.08.005>
- Luca, S. D., Lefèvre, N., & Pesenti, M. (2010). Place and summation coding for canonical and non-canonical finger numeral representations. *Cognition*, 117(1), 95-100. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.06.008>

- 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(4), 595-614. <https://doi.org/10.1348/026151007X185329>
- Maziero, S., Tallet, J., Bellocchi, S., Jover, M., Chaix, Y., & Jucla, M. (2020). Influence of comorbidity on working memory profile in dyslexia and developmental coordination disorder. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 42(7), 660-674. <https://doi.org/10.1080/13803395.2020.1798880>
- Mazzocco, M. M. M., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Impaired Acuity of the Approximate Number System Underlies Mathematical Learning Disability (Dyscalculia). *Child Development*, 82(4), 1224-1237. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2011.01608.x>
- Menon, V. (2016). Working memory in children's math learning and its disruption in dyscalculia. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 10, 125-132. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.05.014>
- Michaux, N., Masson, N., Pesenti, M., & Andres, M. (2013). Selective Interference of Finger Movements on Basic Addition and Subtraction Problem Solving. *Experimental Psychology*, 60(3), 197-205. <https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000188>
- Michel, E., Molitor, S., & Schneider, W. (2020). Executive Functions and Fine Motor Skills in Kindergarten as Predictors of Arithmetic Skills in Elementary School. *Developmental Neuropsychology*, 45(6), 367-379. <https://doi.org/10.1080/87565641.2020.1821033>
- Miyahara, M., & Möbs, I. (1995). Developmental dyspraxia and developmental coordination disorder. *Neuropsychology Review*, 5(4), 245-268. <https://doi.org/10.1007/BF02214648>
- Neveu, M., Schwartz, C., & Rousselle, L. (2024). Finger counting to relieve working memory in children with developmental coordination disorder : Insights from behavioral and three-dimensional motion analyses. *Journal of Experimental Child Psychology*, 243, 105909. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2024.105909>
- 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>
- Newman, S. D., & Soyulu, F. (2014). The impact of finger counting habits on arithmetic in adults and children. *Psychological Research*, 78(4), 549-556. <https://doi.org/10.1007/s00426->

- Nicoladis, E., Pika, S., & Marentette, P. (2010). Are number gestures easier than number words for preschoolers? *Cognitive Development*, 25(3), 247-261. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2010.04.001>
- Noël, M.-P. (2005). Finger gnosis : A predictor of numerical abilities in children? *Child Neuropsychology*, 11(5), 413-430. <https://doi.org/10.1080/09297040590951550>
- Noël, M.-P., Seron, X., & Trovarelli, F. (2004). Working memory as a predictor of addition skills and addition strategies in children. *Cahiers de Psychologie Cognitive/Current Psychology of Cognition*, 22(1), 3-25.
- Ostad, S. A. (1997). Developmental differences in addition strategies : A comparison of mathematically disabled and mathematically normal children. *British Journal of Educational Psychology*, 67(3), 345-357. <https://doi.org/10.1111/j.2044-8279.1997.tb01249.x>
- Penner-Wilger, M., Fast, L., LaFevre, J.-A., Smith-Chant, B. L., Skwarchuck, S.-L., Kamawar, D., & Bisanz, J. (2007). The Foundations of Numeracy : Subitizing, Finger Gnosis, and Fine Motor Ability. *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, 29(29). <https://escholarship.org/uc/item/8vb45554>
- Pieters, S., Desoete, A., Van Waelvelde, H., Vanderswalmen, R., & Roeyers, H. (2012). Mathematical problems in children with developmental coordination disorder. *Research in Developmental Disabilities*, 33(4), 1128-1135. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2012.02.007>
- Pieters, S., Roeyers, H., Rosseel, Y., Van Waelvelde, H., & Desoete, A. (2015). Identifying Subtypes Among Children With Developmental Coordination Disorder and Mathematical Learning Disabilities, Using Model-Based Clustering. *Journal of Learning Disabilities*, 48(1), 83-95. <https://doi.org/10.1177/0022219413491288>
- Potter, M. C., & Levy, E. I. (1968). Spatial Enumeration without Counting. *Child Development*, 39(1), 265-272. <https://doi.org/10.2307/1127377>
- Reeve, R., & Humberstone, J. (2011). Five- to 7-Year-Olds' Finger Gnosis and Calculation Abilities. *Frontiers in Psychology*, 2. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00359>
- Rigoli, D., Piek, J. P., Kane, R., Whillier, A., Baxter, C., & Wilson, P. (2013). An 18-month follow-up investigation of motor coordination and working memory in primary school

- children. *Human Movement Science*, 32(5), 1116-1126.
<https://doi.org/10.1016/j.humov.2013.07.014>
- Roesch, S., & Moeller, K. (2015). Considering digits in a current model of numerical development. *Frontiers in Human Neuroscience*, 8.
<https://doi.org/10.3389/fnhum.2014.01062>
- Rousselle, L., & Vossius, L. (2021). Acquiring the Cardinal Knowledge of Number Words : A Conceptual Replication. *Journal of Numerical Cognition*, 7(3), 411-434.
<https://doi.org/10.5964/jnc.7029>
- Sarnecka, B. W. (2021). Learning to represent exact numbers. *Synthese*, 198(5), 1001-1018.
<https://doi.org/10.1007/s11229-015-0854-6>
- Sarnecka, B. W., & Carey, S. (2008). How counting represents number : What children must learn and when they learn it. *Cognition*, 108(3), 662-674.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.05.007>
- Sartori, R. F., Nobre, G. C., Fonseca, R. P., & Valentini, N. C. (2022). Do executive functions and gross motor skills predict writing and mathematical performance in children with developmental coordination disorder? *Applied Neuropsychology: Child*, 11(4), 825-839. <https://doi.org/10.1080/21622965.2021.1987236>
- Schott, N., El-Rajab, I., & Klotzbier, T. (2016). Cognitive-motor interference during fine and gross motor tasks in children with Developmental Coordination Disorder (DCD). *Research in Developmental Disabilities*, 57, 136-148.
<https://doi.org/10.1016/j.ridd.2016.07.003>
- Shalev, R. S., Manor, O., & Gross-Tsur, V. (2005). Developmental dyscalculia : A prospective six-year follow-up. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 47(2), 121-125.
<https://doi.org/10.1017/S0012162205000216>
- Shrager, J., & Siegler, R. S. (1998). SCADS : A Model of Children's Strategy Choices and Strategy Discoveries. *Psychological Science*, 9(5), 405-410.
<https://doi.org/10.1111/1467-9280.00076>
- Son, S.-H., & Meisels, S. J. (2006). The Relationship of Young Children's Motor Skills to Later Reading and Math Achievement. *Merrill-Palmer Quarterly*, 52(4), 755-778.
- Soylu, F., Jr, F. K. L., & Newman, S. D. (2018). You Can Count on Your Fingers : The Role of Fingers in Early Mathematical Development. *Journal of Numerical Cognition*, 4(1),

107-135. <https://doi.org/10.5964/jnc.v4i1.85>

- Soylu, F., Raymond, D., Gutierrez, A., & Newman, S. D. (2018). The differential relationship between finger gnosis, and addition and subtraction : An fMRI study. *Journal of Numerical Cognition*, 3(3). <https://www.psycharchives.org/en/item/14ba606d-2ebd-4e07-88b3-181b3019c6e0>
- Steffe, L. P., & von Glasersfeld, E. (1988). On the Construction of the Counting Scheme. In L. P. Steffe & P. Cobb (Éds.), *Construction of Arithmetical Meanings and Strategies* (p. 1-19). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3844-7_1
- Subara-Zukic, E., Cole, M. H., McGuckian, T. B., Steenbergen, B., Green, D., Smits-Engelsman, B. C., Lust, J. M., Abdollahipour, R., Domellöf, E., Deconinck, F. J. A., Blank, R., & Wilson, P. H. (2022). Behavioral and Neuroimaging Research on Developmental Coordination Disorder (DCD) : A Combined Systematic Review and Meta-Analysis of Recent Findings. *Frontiers in Psychology*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.809455>
- 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>
- Van Rinsveld, A., Hornung, C., & Fayol, M. (2020). Finger Rapid Automatized Naming (RAN) predicts the development of numerical representations better than finger gnosis. *Cognitive Development*, 53, 100842. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2019.100842>
- Van Rooijen, M., Verhoeven, L., & Steenbergen, B. (2016). Working memory and fine motor skills predict early numeracy performance of children with cerebral palsy. *Child Neuropsychology*, 22(6), 735-747. <https://doi.org/10.1080/09297049.2015.1046426>
- Visser, J. (2003). Developmental coordination disorder : A review of research on subtypes and comorbidities. *Human Movement Science*, 22(4), 479-493. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2003.09.005>
- 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.org/10.1016/j.jecp.2016.01.006>
- Wiese, H. (2003). Iconic and non-iconic stages in number development : The role of language.

Trends in Cognitive Sciences, 7(9), 385-390. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00192-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00192-X)

Wiese, H. (2007). The co-evolution of number concepts and counting words. *Lingua*, 117(5), 758-772. <https://doi.org/10.1016/j.lingua.2006.03.001>

Wilson, P. H., Ruddock, S., Smits-Engelsman, B., Polatajko, H., & Blank, R. (2013). Understanding performance deficits in developmental coordination disorder : A meta-analysis of recent research. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 55(3), 217-228. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2012.04436.x>

Wynn, K. (1990). Children's understanding of counting. *Cognition*, 36(2), 155-193. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(90\)90003-3](https://doi.org/10.1016/0010-0277(90)90003-3)

Wynn, K. (1992). Children's acquisition of the number words and the counting system. *Cognitive Psychology*, 24(2), 220-251. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(92\)90008-P](https://doi.org/10.1016/0010-0285(92)90008-P)

Wynn, K., Bloom, P., & Chiang, W.-C. (2002). Enumeration of collective entities by 5-month-old infants. *Cognition*, 83(3), B55-B62. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(02\)00008-](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(02)00008-2)

ANNEXES

ANNEXE 1 : SYNTHÈSE DU TEST U DE MANN-WHITNEY 1

Comparaison de la moyenne obtenue aux deux tâches sensori-motrices entre les deux sous-groupes à tous les temps de passation.

Stratégie	W	p	Corrélation biserial de rang
<i>Indice de dextérité manuelle</i>			
Temps 0 (avant testing)	233.0	0.005	0.85
Temps 1	246.5	0.001	0.96
Temps 2	241.0	0.002	0.91
Temps 3	229.5	0.006	0.82
Temps 4	226.5	0.008	0.80
<i>Gnosies digitales</i>			
Temps 1	170.0	0.249	0.35
Temps 2	109.0	0.661	-0.14
Temps 3	211.0	0.025	0.68
Temps 4	216.0	0.017	0.71

ANNEXE 2 : SYNTHÈSE DU TEST U DE MANN-WHITNEY 2

Comparaison de la fréquence d'utilisation des différentes stratégies entre les deux sous-groupes à tous les temps de passation.

Stratégie	W	p	Corrélation bisérial de rang
<i>Comptage des doigts</i>			
Temps 1	52.5	0.047	-0.57
Temps 2	157.0	0.336	0.29
Temps 3	47.5	0.037	-0.62
Temps 4	120.0	0.924	-0.03
<i>Récupération (faits arithmétiques)</i>			
Temps 1	166.5	0.225	0.37
Temps 2	125.0	0.945	0.03
Temps 3	161.0	0.361	0.28
Temps 4	212.5	0.018	0.71
<i>Calcul mental (procédure de calcul)</i>			
Temps 1	126.0	0.911	0.04
Temps 2	96.0	0.483	-0.21
Temps 3	152.5	0.491	0.21
Temps 4	147.5	0.536	0.19
<i>Inconnue</i>			
Temps 1	138.0	0.657	0.13
Temps 2	111.0	0.765	-0.90
Temps 3	123.5	0.958	-0.20
Temps 4	43.0	0.029	-0.65

Note. Pour le test de Mann-Whitney, la taille de l'effet est donnée par la corrélation bisériale de rang.

ANNEXE 3 : SYNTHÈSE DU TEST U DE MANN-WHITNEY 3

Comparaison des performances arithmétiques et mnésique entre les deux sous-groupes.

Stratégie	W	p	Corrélation biserial de rang
<i>Fluences arithmétiques (faits arithmétiques)</i>			
Temps 1	196.5	0.063	0.56
Temps 2	187.5	0.106	0.49
Temps 3	167.5	0.277	0.33
Temps 4	142.0	0.682	0.127
<i>Arithmétique sans contrainte de temps (procédures de calcul)</i>			
Temps 1	176.0	0.166	0.40
Temps 2	140.5	0.700	0.12
Temps 3	176.5	0.184	0.40
Temps 4	202.5	0.044	0.61
<i>Mémoire de travail</i>			
Temps 1	175.5	0.140	0.39
Temps 2	94.5	0.372	-0.25
Temps 3	77.0	0.171	-0.39
Temps 4	152.0	0.475	0.21

Note. Pour le test de Mann-Whitney, la taille de l'effet est donnée par la corrélation bisériale de rang.