
Etude du lien entre les compétences sensorimotrices fines au niveau des doigts et les compétences cardinales chez les enfants nés prématurément

Auteur : Leclercq, Auriane

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/2268.2/19916>

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.



Faculté de Psychologie, Logopédie et Sciences de l'Éducation

Étude du lien entre les compétences sensorimotrices fines au niveau
des doigts et les compétences cardinales chez les enfants nés
prématurément.

Mémoire présenté par **LECLERCQ Auriane**

*En vue de l'obtention du grade de Master en Logopédie à finalité spécialisée en
communication et handicap.*

Sous la direction de **ROUSSELLE Laurence**

Lectrices : **NEVEU Maëlle** et **MAILLART Christelle**

Année académique 2023-2024

Remerciements...

Je tiens tout d'abord à adresser mes remerciements à Madame Laurence Rousselle qui a accompagné ce projet au sein de son unité et m'a permis de le développer.

Mes plus sincères remerciements vont également à Maëlle Neveu, sans laquelle ce travail n'aurait pu aboutir. Je la remercie pour son aide précieuse, ses conseils avisés, son thé et sa disponibilité au cours des quatre années écoulées.

Un grand merci à Madame Christelle Maillart pour l'intérêt et le temps consacrés à la lecture de ce travail.

Je tiens également à remercier Lara, Manon mais aussi ma marraine et ma maman, qui ont participé à la relecture de ce travail afin d'y parfaire orthographe, grammaire et mise en page.

J'exprime ensuite toute ma reconnaissance à mon acolyte, Marine, pour son soutien sans faille au cours de mon cursus en Logopédie.

Pour terminer, j'adresse un merci particulier à tous ceux qui m'ont accordé leur soutien dans l'élaboration de ce mémoire ou, de manière plus générale, dans l'accomplissement de mes quatre années d'études.

TABLE DES MATIERES

Table des matières	
Liste des tableaux et figures	
Liste des abréviations	
I. Introduction générale.....	1
II. Introduction théorique : revue de la littérature.....	3
1. Quels liens entre doigts et nombres ?.....	3
a) Preuves en faveur d'un lien entre doigts et nombres	3
b) Rôle des doigts dans le développement numérique précoce	6
✓ Rôle des doigts dans les habiletés numériques de base (comptage et dénombrement).....	7
✓ Rôle des doigts dans l'acquisition de la cardinalité	10
✓ Rôle des doigts dans les activités arithmétiques de base	14
c) Conclusions	18
2. Prématurité	19
a) Les chiffres.....	19
b) Classification de la prématurité.....	20
c) Causes de la prématurité	21
d) Conséquences de la prématurité.....	21
3. Difficultés liées à la prématurité : les doigts et les nombres.....	23
a) Difficultés sensorimotrices.....	24
✓ Sensorialité	24
✓ Motricité.....	25
b) Difficultés en cognition numérique.....	28
✓ Etat des lieux	28
✓ D'où proviennent ces difficultés numériques rencontrées par les prématurés ?..	31
c) Un lien entre ces difficultés sensorimotrices et numériques ?	32

d)	En résumé.....	34
III.	Objectifs et question de recherche	36
1.	Sous-question n°1 : impact de la prématurité sur la construction des représentations cardinales ?.....	38
2.	Sous-question n°2 : difficultés liées à la compréhension ou à la production des configurations digitales ?	39
3.	Objectifs préliminaires	40
4.	Hypothèse subséquente	41
IV.	Méthodologie	42
1.	Population.....	42
2.	Protocole de testing	43
a)	Testing sensorimoteur	44
b)	Testing des compétences numériques de base	45
✓	Chaîne numérique verbale.....	45
✓	Dénombrement	45
c)	Testing des compétences cardinales.....	46
✓	Tâches « donne-moi »	46
✓	Tâches « montre-moi ».....	47
d)	Testing des premières compétences arithmétiques	49
V.	Présentation des résultats	50
1.	Caractéristiques de l'échantillon	50
a)	Caractéristiques générales	50
b)	Au niveau sensorimoteur.....	51
c)	Au niveau numérique	53
2.	Impact de la prématurité sur les représentations cardinales (question n°1).....	54
a)	Tâches « donne-moi »	54
b)	Tâches « montre-moi ».....	56
✓	Analyse globale	56

✓ La taille de la collection modifie-t-elle ces relations ?.....	56
3. Difficultés de compréhension ou de production des gestes cardinaux (question n°2).	57
4. Impact sur les premières opérations arithmétiques ?	58
5. Constitution d'un sous-groupe avec difficultés motrices objectives.....	58
✓ Caractéristiques sensorimotrices	59
✓ Caractéristiques numériques	60
a) Question 1 : Y a-t-il un impact des difficultés sensorimotrices liées à la prématurité sur le développement des représentations cardinales (verbales et digitales) ?.....	61
b) Les difficultés des enfants prématurés dans les activités cardinales sont-elles de l'ordre de la compréhension ou de la production des gestes cardinaux ?	63
c) Y a-t-il un impact en cascade sur le développement arithmétique ?.....	63
VI. Interprétation et discussion.....	64
1. Impact des difficultés sensorimotrices liées à la prématurité sur la construction des représentations cardinales	66
a) Difficultés sensorimotrices ?.....	66
b) Design des tâches cardinales	69
c) Âge des sujets.....	71
2. Difficultés au niveau des représentations cardinales (compréhension) et/ou de production des gestes cardinaux chez les prématurés ?	72
3. Effet en cascade sur les compétences arithmétiques précoces ?	74
4. Conclusions	75
5. Perspectives futures.....	76
VII. Bibliographie.....	78
Résumé.....	95

LISTE DES TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 1: Résumé du protocole de testing	43
Tableau 2: Caractéristiques générales de l'échantillon.....	51
Tableau 3 : Distribution des enfants prématurés et tout-venants dans les différents niveaux cardinaux (en modalités verbale et digitale)	55
Tableau 4 : Distribution des enfants prématurés et tout-venants de l'échantillon restreint dans les niveaux cardinaux (en modalités verbale et digitale)	61
Figure 1: Illustration du rôle des représentations digitales intégré au modèle de développement numérique précoce de Krajewski & Schneider (2009) (Roesch & Moeller, 2015)	6
Figure 2: Système de comptage sur les doigts européen (Domahs et al., 2010).....	8
Figure 3: Illustration du design de la tâche "Donne-moi" verbale	46
Figure 4: Illustration du design de la tâche "Donne-moi" digitale.....	46
Figure 5: Illustration du design de la tâche "Montre-moi NVO-collection"	47
Figure 6: Illustration du design de la tâche "Montre-moi doigts-collection"	47
Figure 7: Illustration du design de la tâche "Montre-moi NVO-photos de doigts"	48
Figure 8: Illustration du design de la tâche "Montre-moi NVO-production digitale"	48

LISTE DES ABREVIATIONS

CAP = Centre de suivi des Anciens Prématurés

CHR = Centre Hospitalier Régional

IMC = Infirmité motrice cérébrale

NVO = Numéral Verbal Oral

OMS = Organisation Mondiale de la Santé

QI = Quotient Intellectuel

I. INTRODUCTION GÉNÉRALE

En tant qu'étudiante en logopédie déjà diplômée en neuropsychologie, la cognition mathématique est un champ d'intérêt particulier à mes yeux. En effet, si les troubles dans ce domaine sont pris en charge en logopédie, le développement des habiletés numériques est fortement influencé par des fonctions relevant de la neuropsychologie, comme les fonctions exécutives ou la mémoire de travail. Par ailleurs, dans une discipline comme dans l'autre, il s'agit d'un champ encore peu connu des professionnels, qui peinent dès lors à prendre les difficultés numériques en soin alors même qu'elles sont assez fréquentes puisqu'elles touchent 3 à 20% des enfants (en fonction des seuils utilisés pour le diagnostic) (Castaldi et al., 2020).

Pendant longtemps, les pédagogues ont estimé que les enfants n'entraient dans le développement numérique qu'à leur arrivée dans la scolarité primaire. On sait aujourd'hui que ce processus de développement commence bien avant l'enseignement formel lié aux nombres, dans la toute petite enfance (Krajewski et al., 2009 ; Stock et al., 2009). C'est pourquoi de nombreux chercheurs ont tenté de déterminer les prédicteurs du niveau en mathématiques, identifiant des facteurs tels que les fonctions exécutives (Verdine et al., 2014), le quotient intellectuel (QI) (Mayes et al., 2009) ou encore le niveau linguistique (Donlan et al., 2007). Ce n'est qu'au début des années 2000 que, sur base des hypothèses de Gerstmann (1940) émises soixante ans plus tôt, les auteurs se sont intéressés aux doigts et ont supposé qu'ils pourraient jouer un rôle dans l'acquisition des processus numériques (Butterworth, 1999). En effet, de nombreux enfants utilisent précocement leurs doigts pour compter et ceux-ci pourraient constituer un outil important pour l'acquisition du concept du nombre, des principes de comptage et des premiers traitements arithmétiques (Roesch & Moeller, 2015). L'utilisation des doigts pourrait, notamment, permettre de faciliter l'accès à la cardinalité (Roesch & Moeller, 2015), une compétence numérique essentielle puisqu'elle permet à l'enfant de concevoir la quantité associée aux nombres et ainsi de construire une représentation symbolique du nombre.

En parallèle de mon intérêt pour la cognition numérique, j'ai pu découvrir le monde de la prématurité lors de ma première année de master au travers d'un stage au Centre de suivi des Anciens Prématurés de la Citadelle. A l'heure actuelle, environ un bébé sur dix naît avant 37 semaines de grossesse révolues (Torchin et al., 2015), seuil sous lequel on le considère comme prématuré. Or, la naissance avant-terme s'accompagne fréquemment de problèmes

respiratoires, infectieux ou encore neurologiques (McCormick et al., 2011 ; Torchin et al., 2015) mais aussi d'un risque accru de retards dans les apprentissages scolaires (notamment mathématiques) et de déficits moteurs (Moreira et al., 2014) et sensoriels (Niutanen et al., 2020). Le lien existant entre sensorimotricité digitale et développement numérique est de plus en plus clair aux yeux de la communauté scientifique (Barrocas et al., 2020). Par ailleurs, les enfants nés prématurément semblent présenter un risque accru de faiblesses dans le développement de ces fonctions (Moreira et al., 2014). Si cette population présente effectivement des compétences digitales et numériques inférieures à celles des enfants nés à terme, alors, il est légitime de se poser la question suivante : la prématurité influence-t-elle le lien entre les compétences sensorimotrices digitales et les habiletés numériques précoces ?

Si cette question a jeté les bases de ce mémoire, c'est plus spécifiquement au développement crucial de la cardinalité que nous nous intéresserons. Evidemment, les compétences numériques de base telles que le comptage et le dénombrement seront passées en revue. Toutefois, le focus sera mis sur la construction des représentations symboliques du nombre au travers du médiateur particulier que constituent les doigts, qui, par essence, sont palpables mais dont les configurations utilisées quotidiennement dans nos cultures acquièrent un statut symbolique. C'est ainsi que la question traitée par ce travail a été définie comme suit : **Quel est l'effet de la prématurité sur le rôle des doigts dans la construction des représentations cardinales ?**

II. INTRODUCTION THÉORIQUE : REVUE DE LA LITTÉRATURE

1. Quels liens entre doigts et nombres ?

a) Preuves en faveur d'un lien entre doigts et nombres

C'est entre 1924 et 1940 que Josef Gerstmann, un neurologue autrichien, décrit les premiers cas de patients atteints du syndrome qui portera son nom. Concrètement, il rapporte un ensemble de quatre symptômes concomitants chez des adultes cérébrolésés : l'agnosie digitale (incapacité à reconnaître, nommer, sélectionner et différencier ses propres doigts et ceux des autres), la désorientation gauche-droite (perte d'orientation se traduisant par une difficulté à distinguer la droite et la gauche), l'agraphie (impossibilité à écrire à la main) et l'acalculie (perte des habiletés arithmétiques et de traitement du nombre) (Gerstmann, 1940). Selon Gerstmann, l'agnosie digitale serait au centre du syndrome et pourrait, supposément, être à l'origine de l'acalculie qui l'accompagne (Rusconi, 2018). Décrivant cela, le docteur Gerstmann est le premier à mettre en lien les gnosies digitales et le traitement des nombres. Par la suite, d'autres auteurs décriront des cas d'enfants atteints du syndrome de Gerstmann dans une forme développementale (PeBenito et al., 1988), suggérant que le lien entre doigts et nombres s'enracine également dans l'enfance.

Avec l'essor des techniques d'imagerie médicale, les chercheurs ont effectivement mis en évidence que les activités recrutant les représentations mentales des doigts et celles nécessitant le recours au traitement numérique partagent un substrat neuronal commun (Andres et al., 2012 ; Berteletti & Booth, 2015 ; Dehaene et al., 1996 ; de Jong et al., 1996 ; Pinel et al., 2004).

De nombreuses études ont alors investigué la relation entre la sensorimotricité digitale¹ et les activités numériques. Ces études ont été reprises dans la récente revue systématique de la littérature menée par Barrocas et al. (2020) qui ont analysé la contribution respective des aspects gnosiques (conscience de la position et des mouvements de chacun de nos doigts) et des habiletés motrices fines au niveau des doigts dans les habiletés numériques en âge préscolaire. Dans leur revue, 7 des 20 études incluses concernaient les aspects gnosiques. Globalement, les résultats des premières montraient une forte association entre les variables d'intérêt. Toutefois, la conception des tâches utilisées et le contrôle des variables confondantes n'étaient pas optimaux dans ces études anciennes. Les recherches plus récentes, tentant de pallier ces biais,

¹ La sensorimotricité digitale reprend les capacités à mobiliser et à se représenter mentalement chacun de nos doigts de façon spécifique. Ces notions correspondent donc respectivement aux habiletés motrices fines et aux gnosies digitales (Barrocas et al., 2020).

montrent également une association significative entre les variables cibles mais démontrent que la part de variance des compétences numériques expliquée par les gnosies digitales est faible, ne dépassant pas 2%. Ils rappellent cependant que les études incluses sont majoritairement construites sur base de designs corrélationnels qui ne permettent pas de poser d'interprétations causales. Ainsi, il n'est pas exclu que, plus précocement dans le développement, les compétences pré-numériques soient acquises avec l'appui de stratégies digitales.

Outre les gnosies digitales, la synthèse méthodique de Barrocas et al. (2020) investiguait aussi le lien entre la motricité fine au niveau des doigts et les compétences numériques des enfants d'âge préscolaire au travers de 14 études incluses. A nouveau, les études anciennes pointaient déjà que les compétences motrices fines prédisent significativement le niveau scolaire dans le domaine mathématique en maternelle. Cependant, pour mesurer les compétences motrices fines, ces études n'ont utilisé que des scores composites reprenant plusieurs tâches (e.g. dessin, copie et construction d'une tour).

Plus récemment, les chercheurs se sont donc attelés à distinguer les différentes composantes motrices fines et ce sont deux types de distinctions qui ont émergé (Barrocas et al., 2020). Premièrement, on retrouve l'opposition entre les tâches d'intégration visuomotrice, qui requièrent une forte composante visuo-perceptive pour la coordination œil-main (ex. : construction d'une tour de cubes), et les tâches évaluant la précision des mouvements fins au niveau des doigts, constituant une mesure plus pure des habiletés motrices fines (ex. : pianotage). Deuxièmement, on retrouve l'opposition entre les tâches de manipulation fine d'objets, aussi appelées « dextérité » (ex. : mettre des pièces dans une tirelire), et celles d'écriture fine, aussi nommées « graphomotricité » (ex. : repasser sur une ligne). Respectivement, les capacités d'intégration visuomotrice et de graphomotricité prédiraient le mieux les habiletés numériques, bien que la précision motrice fine et la dextérité seraient également prédictives. Notons que ces résultats vont à l'encontre de ce qu'observent Fisher et al. (2020) qui démontrent que la dextérité, mais pas la graphomotricité, est spécifiquement associée aux représentations de la cardinalité et de l'ordinalité basées sur les doigts. Quoiqu'il en soit, on note quand même un grand recouvrement entre ces deux distinctions, la première portant plutôt sur les processus cognitifs impliqués dans les tâches et l'autre sur l'objet impliqué dans le comportement moteur (objet à manipuler ou outil scripteur). De plus, s'il semble a priori aisé de dire qu'une tâche de tracé d'un circuit, par exemple, requiert la graphomotricité, il semble également que la coordination entre le geste graphique et l'œil pour suivre le trajet relève de l'intégration visuomotrice et que le positionnement des doigts pour la tenue du crayon relève de la précision motrice fine. Ainsi, pour nombre de tâches, ces concepts s'entrelacent.

Au travers de ce mémoire, les tâches impliquant la manipulation d'objets (planche à trous, enfilage d'un lacet, tracé d'un circuit) seront reprises sous l'appellation de « tâches de dextérité » et les tâches impliquant uniquement des mouvements digitaux sans objets (pianotage, imitations de configurations manuelles) seront appelées « tâches de précision motrice fine ». En tout cas, quelles que soient les appellations choisies, l'ensemble des recherches montre clairement que les compétences motrices fines contribuent au développement des habiletés mathématiques (tant concernant la connaissance du système numérique que le comptage, le traitement de la magnitude et les habiletés arithmétiques de base) (Barrocas et al., 2020).

Sur le versant pathologique, la littérature s'est également étendue au-delà du syndrome de Gerstmann à d'autres pathologies impliquant des troubles de la motricité fine. Barnes et al. (2011) se sont, par exemple, intéressés aux enfants atteints de spina bifida, une maladie congénitale de la moëlle épinière qui se traduit par des troubles moteurs d'étendue plus ou moins large suivant le niveau de l'atteinte médullaire. Leurs résultats montrent que le niveau moteur fin de ces enfants, en âge préscolaire, prédit leurs compétences arithmétiques précoces avec et sans support imagé. Van Rooijen et al. (2010) ont, eux, mené une revue de la littérature centrée sur les enfants avec infirmité motrice cérébrale (IMC) et mis en évidence qu'ils présentent régulièrement un retard dans les habiletés arithmétiques simples, de comptage ou encore de subitizing².

En résumé, au-delà des observations du Dr Gerstmann, les études d'imagerie médicale, puis les études et revues systématiques publiées, montrent qu'il existe bel et bien une relation significative claire entre les compétences digitales (qui reposent tant sur la capacité à les différencier du point de vue sensoriel que sur la capacité à les mobiliser de façon adéquate) et les habiletés numériques chez les enfants, notamment d'âge préscolaire. Les études les plus récentes indiquent, cependant, que cette relation n'est pas directe (Barrocas et al., 2020) : les gnosies et la motricité digitales joueraient un rôle indirect sur l'acquisition des représentations numériques symboliques via le développement de représentations du nombre basées sur les doigts, constituant une étape intermédiaire. Les résultats obtenus par Fisher et al. (2020) dans leur étude ajoutent du crédit à ces observations puisqu'ils montrent également que l'association

² Capacité pré-attentionnelle qui permet de déterminer rapidement le cardinal d'un petit ensemble (contenant 1 à 4 éléments) grâce à des marqueurs codant les coordonnées spatiales des cibles sur lesquelles diriger le foyer attentionnel.

entre la dextérité et les compétences numériques est médiée par les représentations du nombre basées sur les doigts.

b) Rôle des doigts dans le développement numérique précoce

Les rapprochements neuroanatomiques ainsi que les divers articles qui appuient l'existence d'une relation entre doigts et nombres ont alors amené la question du rôle fonctionnel joué par les doigts dans les activités numériques. Si selon Crollen et al. (2011), l'utilisation des doigts n'est ni un passage obligatoire dans le cadre du développement numérique, ni un acte spontané chez tous les enfants dans les activités en lien avec les nombres (d'autant plus en l'absence de modèle), ils admettent quand même que les doigts constituent un outil intéressant. En 2015, Roesch & Moeller ont donc abordé la façon dont l'utilisation des doigts permet d'appuyer le développement des compétences numériques.

Comme la quantité représentée par un nombre est indépendante des caractéristiques des objets formant l'ensemble dénombré (couleur, taille, poids, ...), la représentation mentale du nombre est souvent vue comme étant un concept abstrait. Toutefois, Roesch & Moeller (2015) ont souhaité explorer l'idée selon laquelle notre représentation du nombre ne serait pas un pur produit de notre pensée mais tirerait son origine dans notre expérience sensorielle. Plus précisément, ces auteurs postulent que le comptage sur les doigts joue un rôle primordial dans le développement de la représentation mentale des numérosités qu'il concrétise.

Leur but a alors été de comprendre et d'intégrer le rôle des représentations du nombre basées sur les doigts dans le modèle actuel du développement numérique de Krajewski & Schneider (2009). Ce modèle propose 3 niveaux de compétences précoces qui mènent l'enfant à une compréhension profonde du lien entre les mots-nombres et la quantité qu'ils représentent. Selon Roesch & Moeller (2015), dans le premier niveau, l'utilisation des doigts soutient l'acquisition de la chaîne numérique verbale dans les activités de comptage. Les doigts sont aussi utilisés pour pointer les éléments dénombrés. Au deuxième niveau, les doigts représentent concrètement la quantité comptée, facilitant l'accès à la représentation cardinale. Enfin, au troisième niveau, ils sont un support aux premières compétences arithmétiques.

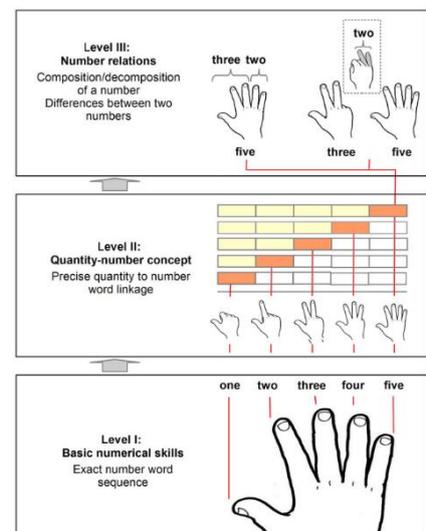


Figure 1: Illustration du rôle des représentations digitales intégré au modèle de développement numérique précoce de Krajewski & Schneider (2009) (Roesch & Moeller, 2015)

Dans la suite de ce travail, le modèle de Roesch et Moeller (2015) servira de trame afin d'approfondir la littérature spécifique sur le rôle des doigts dans chacun des niveaux décrits. Si le focus sera mis sur le domaine d'intérêt de ce travail, c'est-à-dire la cardinalité, les deux autres niveaux du modèle seront également passés en revue. En effet, le développement de la chaîne numérique verbale et des activités de dénombrement sert de base à la cardinalité et ne peut donc pas être négligé. Quant aux activités arithmétiques précoces, elles dépendent de la robustesse de la représentation symbolique du nombre. De cette façon, les compétences cardinales forgent les fondations du développement de ces habiletés plus élaborées.

✓ *Rôle des doigts dans les habiletés numériques de base (comptage et dénombrement)*

Le premier niveau du modèle correspond aux habiletés numériques basiques. A ce stade, l'enfant apprend la chaîne numérique verbale (dont la maîtrise devient de plus en plus précise et stable) et commence à percevoir les mots-nombres comme des unités distinctes mais n'emploie pas encore ces mots pour décrire des quantités (Krajewski & Schneider, 2009). Roesch & Moeller (2015) mettent en évidence qu'à ce niveau, de nombreux enfants utilisent le comptage sur les doigts spontanément, selon le pattern qui correspond à leur culture. Les doigts présentent en effet plusieurs avantages (Bender & Beller, 2012) : ils sont aisément accessibles, faciles à manipuler, en quantité suffisante et permettent une entrée multisensorielle.

Selon Roesch & Moeller (2015), à force de réciter la litanie en parallèle de la mobilisation des doigts, chaque mot-nombre est associé à un doigt spécifique (e.g. le 2 est associé à l'index). Cela aboutit à trois conséquences :

- Une meilleure compréhension du principe de correspondance terme-à-terme ;
- Une meilleure perception des mots-nombres en tant qu'unités phonologiques distinctes grâce à l'association de chacune d'elles avec un doigt (Alibaldi & DiRusso, 1999) ;
- Une meilleure compréhension du principe d'ordre stable et du concept d'ordinalité grâce à l'association entre une séquence motrice et une séquence verbale stables.

D'un point de vue fonctionnaliste, il est aisé de comprendre que, pour un **comptage** efficace sur ses doigts, l'enfant doit, d'une part, reconnaître chacun d'eux comme étant une entité à part entière et, d'autre part, les mobiliser de manière adéquate et précise (Barrocas et al., 2020). Fisher et al. (2022) démontrent cependant que la performance aux tâches de comptage sur les doigts (« compte jusqu'à 4 sur tes doigts ») est mieux prédite par les compétences motrices

finies que par les tâches de gnosies digitales. Pour eux, le comptage sur les doigts consiste à lever un doigt après l'autre jusqu'à atteindre le chiffre souhaité, ce qui demande avant tout une bonne agilité au niveau des doigts, sans requérir une conscience sensorielle de ceux-ci. Néanmoins, leur tâche de comptage sur les doigts a été particulièrement bien réussie par l'entièreté de leurs sujets (effet plafond), suggérant un comptage automatisé au sein de leur échantillon. Il se pourrait qu'au fil de l'acquisition du comptage sur les doigts, les aspects gnosiques revêtent une plus grande importance, chacun des doigts gagnant à être distingué des autres au niveau sensoriel pour s'insérer de façon spécifique dans la routine de comptage.

Si les études montrent que les doigts constituent un outil précieux lors du développement du comptage, Crollen et al. (2011) rappellent que leur utilisation n'est pas spontanée dans ce type d'activités et ne se développe qu'au contact de modèles. De cette manière, le pattern moteur déterminant comment les doigts sont mobilisés dans le comptage dépend fortement de la culture (Bender & Beller, 2012 ; Crollen et al., 2011). En Europe, la séquence de comptage consiste à lever les doigts adjacents les uns après les autres, en commençant par le pouce jusqu'à atteindre l'auriculaire, paume vers le haut. Sur notre continent, il est courant de commencer par lever les doigts de la main gauche avant de passer à ceux de la main droite, toutefois, en Belgique spécifiquement, nous ne démontrons pas de préférence marquée quant à la première main à mobiliser (Lindemann et al., 2011 ; Previtali et al., 2011).

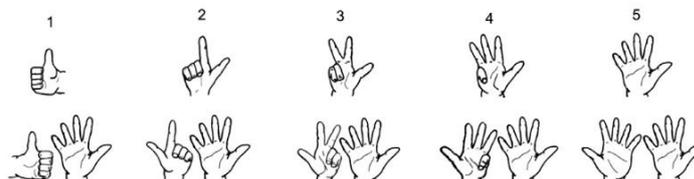


Figure 2: Système de comptage sur les doigts européen (Domahs et al., 2010)

La relation entre comptage manuel et représentation du nombre, culturellement teintée, persiste d'ailleurs à l'âge adulte alors que le comptage est automatisé. C'est ce qu'ont montré Di Luca et al. (2006) avec leur design expérimental. Ces auteurs ont présenté des nombres arabes (entre 1 et 10) à leurs sujets et leur ont donné pour consigne d'appuyer sur la touche du clavier correspondant à ce nombre. La position des 10 touches du clavier a été manipulée pour refléter tantôt la ligne numérique (1 situé le plus à gauche et 10 le plus à droite), tantôt les habitudes de comptage sur les doigts belges (expliquées ci-dessus). Leurs résultats montrent que la vitesse de réponse de leurs sujets au clavier augmente si le placement des touches sous leurs doigts correspond à leur habitude de comptage.

Outre l'aide qu'ils apportent dans l'apprentissage de la chaîne numérique verbale, les doigts sont aussi un outil important dans les activités de **dénombrement**. En effet, le dénombrement

d'une collection fait appel à la connaissance de la chaîne numérique verbale, au pointage de chaque élément tour à tour et surtout à la coordination fine entre ces deux activités (Bardi et al., 1997). Bardi et al. (1997) ont montré que les enfants dyspraxiques étaient significativement plus lents que leurs pairs contrôles et commettaient plus d'erreurs de pointage dans des tâches de dénombrement. Par ces résultats, ils mettent en évidence l'importance des activités motrices pour le pointage nécessaire au dénombrement.

Plus récemment, Crollen & Noël (2015) ont demandé à des enfants belges de 5 ans et demi de compter le nombre de fois qu'un son cible (condition « une cible ») ou que deux sons cibles (condition « deux cibles ») apparaissaient dans une séquence sonore au rythme aléatoire. Un tiers des enfants était assigné à la condition contrôle dans laquelle les mains étaient libres, autorisant l'utilisation des stratégies de comptage sur les doigts. Un second tiers d'enfants a rejoint le groupe « interférence manuelle » dans lequel l'utilisation des doigts était impossible car une tâche interférente requérant l'usage des mains était demandée (presser une balle à un rythme régulier avec chaque main). Le dernier groupe correspondait à la condition « interférence aux pieds » dans laquelle une tâche distractive était demandée mais n'empêchait pas l'utilisation des mains pour le comptage (presser une balle à un rythme régulier avec chaque pied). Les résultats montrent que, quand ils en ont l'opportunité, les enfants de l'étude utilisent leurs doigts pour dénombrer, d'autant plus si la tâche est cognitivement coûteuse (condition « 2 cibles »). Lorsqu'ils ne peuvent pas les utiliser, leurs performances de comptage chutent drastiquement, sans que cela ne puisse être attribué uniquement au caractère distracteur de la tâche, puisque la condition « interférence aux pieds » n'engendre pas une telle chute. Autrement dit, les mouvements interférents des doigts ont un impact négatif sur les procédures de dénombrement des enfants d'âge préscolaire même lorsque celles-ci ne demandent pas de pointage, suggérant que le comptage sur les doigts joue un rôle important dans ces processus. Le rôle des doigts est d'ailleurs d'autant plus important que la charge générée en mémoire de travail par les activités de dénombrement est lourde (comme le montre les résultats obtenus lorsque deux cibles concurrentes doivent être traitées). Ces résultats soutiennent donc l'idée que l'utilisation des doigts permet d'alléger la mémoire de travail lors des activités de dénombrement.

En parallèle, Fischer et al. (2017) ont montré que de bonnes performances aux tâches motrices de manipulation de petits objets (dextérité) étaient associées à une meilleure procédure de dénombrement et à une meilleure conceptualisation de celui-ci (c'est-à-dire à une meilleure propension à comprendre que le dénombrement vise à obtenir le cardinal de l'ensemble). De

façon intéressante, la relation démontrée entre motricité fine et conceptualisation du dénombrement était médiée par la procédure de dénombrement, sous-entendant qu'une meilleure utilisation des doigts lors du dénombrement permet, en cascade, d'accéder plus facilement à la conceptualisation de celui-ci.

En résumé, les doigts interviennent dans la construction des représentations numériques au travers des activités de comptage et de dénombrement dans l'enfance. Ces activités fondent les bases qui permettront ensuite la compréhension du principe de cardinalité.

✓ *Rôle des doigts dans l'acquisition de la cardinalité*

Le deuxième niveau du modèle est celui du concept de quantité du nombre, aussi appelé concept de cardinalité (Krajewski & Schneider, 2009) : on dit qu'un enfant a acquis le principe de cardinalité lorsqu'il comprend que la valeur du dernier mot-nombre prononcé représente la quantité d'objets comptés (Gelman & Galistel, 1978 cités par Stock et al., 2009). En réalité, l'acquisition du principe cardinal serait un processus développemental plus long que ne le pensait Wynn (1992), pionnière du domaine. En effet, il ne s'agirait pas d'acquérir le principe pour un, deux et trois puis de le généraliser à tous les nombres plus grands, mais bien d'attribuer une valeur quantitative précise et spécifique à chaque nombre, un à un, y compris aux plus grands, de façon progressive (Rousselle & Vossius, 2021). Cet apprentissage, que Wynn (1992) estimait acquis aux alentours de 3 ans et demi, serait donc loin de l'être à cet âge et s'étendrait en réalité à minima jusqu'à 6 ans. Les données actuelles (Rousselle & Vossius, 2021) montrent néanmoins une très grande variabilité dans la séquence développementale d'enfant en enfant, ce qui avait déjà été pointé par Wynn dans les années 90 !

Ce qui est complexe au cours de l'apprentissage des mots-nombres, c'est qu'ils ne désignent pas une propriété d'un objet unique mais bien d'un ensemble d'objets. Par exemple, « trois lapins » renvoie à une propriété de l'ensemble de lapins et ne s'applique pas à chacun des lapins séparément. Il s'agit donc d'un vocabulaire qui réfère à la relation qu'entretiennent des objets, particulièrement difficile à acquérir pour les jeunes enfants (Gibson et al., 2019). En plus, les enfants ne doivent pas seulement apprendre que les mots nombres renvoient à des quantités mais aussi à quelle quantité précise réfère chaque mot nombre spécifiquement (Barner, 2012). Ainsi, selon le modèle de Krajewski & Schneider (2009), dans un premier temps, l'enfant reconnaît que certains mots-nombres sont associés à des termes tels que « peu » ou « vraiment beaucoup » et apparaissent plus ou moins loin dans la chaîne numérique verbale. Sur cette base,

il comprend que les mots-nombres sont, en fait, associés à une quantité, même si cette quantité reste vague de sorte que deux mots-nombres référant à la même catégorie de quantité (e.g. 122 et 187 réfèrent tous les deux à « vraiment beaucoup ») ne sont pas clairement distingués. Dans un second temps, l'enfant parvient à réciter la chaîne numérique de façon correcte et stable jusqu'à 10 et à dénombrer des collections. A force d'expérience, il comprend qu'un même mot-nombre (e.g. « quatre ») renvoie toujours à l'exacte même numérosité (e.g. quatre objets) et que l'avancée dans la chaîne numérique verbale correspond à l'augmentation de la quantité (e.g. le temps mis pour arriver à « quatre » lors de la récitation de la litanie est toujours le même) (Krajewski & Schneider, 2009). C'est de cette façon qu'il va acquérir la compréhension cardinale de « un », puis « deux » et ainsi de suite, comme expliqué par Wynn (1992) et précisé par Rousselle & Vossius (2021). Il deviendra donc successivement « one-knower », puis « two-knower » et cetera, jusqu'à pouvoir attribuer une valeur cardinale à tous les mots-nombres contenus dans sa chaîne de comptage et ainsi devenir un « cardinal principle knower » (Rousselle & Vossius, 2021). Dans la littérature actuelle (Krajcsi et al., 2018), on admet que les enfants maîtrisant le principe cardinal pour les mots-nombres de 1 à 3 peuvent être regroupés sous l'appellation « small subset cardinal knowers », que ceux maîtrisant le principe pour les nombres de 4 à 6 se groupent pour former les « large subset cardinal knowers » et que ceux maîtrisant le principe à partir de 7 et au-delà ont atteint le niveau des « cardinal principle knowers ».

En résumé, acquérir le principe de cardinalité, c'est passer d'une représentation non-symbolique du nombre (le nombre est représenté par les éléments de la collection) à une représentation symbolique du nombre (les éléments de la collection sont représentés par un symbole tel qu'un numéral verbal oral (NVO)). Dans ce cadre, Roesch & Moeller (2015) postulent que l'utilisation des doigts permet de soutenir l'acquisition du concept de cardinalité. En effet, les configurations digitales possèdent à la fois des propriétés iconiques (car elles permettent d'établir des correspondances terme-à-terme entre les doigts et les éléments de la collection) et symboliques (car elles sont conventionnellement associées aux mots-nombres), faisant d'elles une forme de représentation intermédiaire entre la numérosité concrète et la représentation arbitraire du nombre (Di Luca & Pesenti, 2011). Pour Crollen et al. (2011), ce n'est d'ailleurs pas tant le caractère iconique des doigts en lui-même qui représente une aide dans le développement de la représentation exacte des grands nombres, mais bien le fait que ceux-ci soient employés au sein de la routine de comptage. Cela suggère que les configurations conventionnelles digitales forment bel et bien un pont entre le non-symbolique et l'abstraction.

Effectivement, les enfants de 7 ans (Noël, 2005) et les adultes (Di Luca & Pesenti, 2008) attribuent plus précisément et rapidement le cardinal correspondant à une configuration de doigts si celle-ci est canonique³ que si elle est atypique. Cela suggère que les enfants construisent une représentation holistique des nombres exprimés par des configurations typiques de doigts qui persiste à l'âge adulte et permet de déterminer plus vite le cardinal associé à ces patterns. De plus, Di Luca & Pesenti (2008) mettent en évidence que, dans une tâche de comparaison de nombres arabes, les sujets adultes trouvent plus rapidement la bonne réponse si celle-ci a été amorcée par une photo flashée représentant sa configuration digitale typique. Ces résultats supportent l'idée que les configurations canoniques de doigts activent automatiquement le sens des nombres associés, alors que ce n'est pas le cas des patterns atypiques. Toutefois, deux visions s'opposent quant au rôle joué par les doigts dans le développement des représentations cardinales.

Premièrement, celle de Nicoladis et al. (2010) pour qui le caractère iconique des doigts n'aiderait pas les enfants à faire le lien entre les numérosités et les représentations symboliques numériques. A l'appui de cette hypothèse, leurs données selon lesquelles leurs sujets, âgés de 2 à 5 ans, sont plus précis pour interpréter les NVO (symboliques) que les patterns de doigts (iconiques) dans les deux types de tâches utilisées pour évaluer la cardinalité (« donne-moi » et « montre-moi »). Pour ces auteurs, les enfants apprennent à raisonner sur les nombres au travers des mots-nombres sans passer par une représentation transitoire basée sur les doigts. Ce ne serait qu'au fil d'interactions sociales forçant l'exposition répétée aux mêmes patterns en association avec les mêmes quantités que l'enfant ferait la correspondance entre les configurations canoniques digitales et les items des ensembles comptés.

Ensuite, le point de vue de Gunderson et al. (2015) qui, dans leur design expérimental, obtiennent des résultats opposés à ceux de Nicoladis et al. (2010) : leurs sujets (âgés de 3 à 5 ans) ont eu plus de facilités à utiliser leurs doigts que les mots-nombres pour décrire les collections présentées. Notons que le niveau cardinal de chaque enfant a été évalué à l'aide d'une tâche « donne-moi » afin de s'assurer qu'aucun des sujets ne maîtrisait, d'emblée, le principe cible. Ainsi, Gunderson et al. (2015) concluent que pour les enfants qui n'ont pas encore solidement acquis le principe de cardinalité, les configurations de doigts agissent comme un outil qui permet de faire un pont entre la représentation non-symbolique et la représentation symbolique du nombre. Ils critiquent d'ailleurs les données de Nicoladis et al. (2010), leurs

³ Se dit d'une configuration conforme à la norme de représentation des nombres avec les doigts.

effets en faveur des mots-nombres étant principalement attribuables aux participants les plus âgés de l'échantillon, maîtrisant probablement déjà le principe de cardinalité préalablement à l'étude et n'ayant donc plus de raison d'utiliser les gestes, moins précis, pour exprimer les nombres (Gunderson et al., 2015).

A l'appui des hypothèses de Gunderson et al. (2015), Gibson et al. (2019) ont remarqué que les enfants de 4 ans produisent souvent des erreurs de correspondance entre leur production orale de NVO et leur production de configuration digitale (par exemple, en disant « deux » en levant 3 doigts) lorsqu'ils doivent déterminer le cardinal d'un ensemble. De façon intéressante, ils ont démontré que les enfants sujets à ce type d'erreur sont plus enclins que les autres à acquérir la valeur cardinale d'un nouveau mot-nombre (ici, trois), à l'aide d'un enseignement court et spécifique autour de ce nombre. Ainsi, les erreurs de correspondance constitueraient un signe indiquant que l'enfant est prêt à bénéficier de cette intervention pour améliorer son niveau cardinal (par exemple, passer de 2-knower à 3-knower). Cela signifie que l'utilisation des doigts peut refléter le développement de la compréhension des mots-nombres chez les enfants et constitue un outil dans lequel peut s'ancrer une représentation cardinale symbolique (Gibson et al, 2019), comme avancé par Gunderson et al. (2015).

Allant toujours dans le sens de Gunderson et al. (2015), Fayol & Seron (2005) émettent l'hypothèse que le travail des configurations canoniques de doigts dans la petite enfance faciliterait l'accès au principe de cardinalité, hypothèse qu'ont voulu vérifier Orrantia et al. (2022). Pour ce faire, ces chercheurs ont proposé un entraînement visant l'amélioration de l'accès à la cardinalité à des enfants de 3 ans au travers de séances d'intervention quotidiennes, dispensées par leur instituteur, durant 3 semaines. Ces enfants ont été répartis en deux groupes. Le premier groupe a réalisé des activités de comptage qui mettent l'accent sur le fait que le dernier mot-nombre prononcé correspond au cardinal de l'ensemble. Cette intervention dite « comptage + étiquetage » a déjà montré des preuves d'efficacité dans la littérature. Les enfants du second groupe, nommé « comptage + étiquetage + doigts », ont reçu la même intervention mais enrichie d'un recours aux configurations digitales habituelles. Les résultats indiquent que les enfants du groupe « comptage + étiquetage + doigts » améliorent plus leur compréhension du principe de cardinalité que ceux du groupe « comptage + étiquetage ». Cela soutient l'idée que la représentation numérique iconique fournie par les doigts est bel et bien une source d'aide pour l'acquisition de la connaissance de la valeur cardinale chez l'enfant.

Sur base des données récentes, les auteurs (Di Luca & Pesenti, 2008, 2011 ; Gibson et al., 2019 ; Gunderson et al., 2015 ; Orrantia et al., 2022) tendent donc à penser que les représentations

digitales constituent un outil facilitant l'accès à la représentation symbolique du nombre du fait leurs propriétés à la fois iconique et symbolique. Plus précisément, Fisher et al. (2022) ont montré que la performance aux tâches de cardinalité (« montre-moi 4 avec tes doigts ») était mieux prédite par les gnosies digitales que par les compétences motrices fines, probablement parce que montrer un certain nombre de doigts requiert, avant tout, d'avoir conscience des doigts à lever, donc d'avoir une bonne représentation gnosique de ceux-ci.

Les auteurs mentionnent toutefois que les représentations digitales ne remplacent pas les autres types de représentation du nombre (e.g. nombre arabe, numéraux verbaux, ...) ni ne sont indispensables dans l'acquisition de la sémantique du nombre (les enfants qui n'utilisent pas leurs doigts pour représenter les nombres n'accusent pas nécessairement de retard dans le développement numérique) (Crollen et al., 2011). Ils affirment cependant qu'elles fournissent une aide précieuse à la compréhension profonde et rapide du sens du nombre, notamment du concept de cardinalité (Di Luca & Pesenti, 2011 ; Orrantia et al., 2022 ; Roesch & Moeller, 2015).

✓ *Rôle des doigts dans les activités arithmétiques de base*

Dans l'enfance...

Le troisième niveau du modèle de Krajewski & Schneider (2009) renvoie à la compréhension des relations entre les nombres, prémices des premiers traitements arithmétiques. Ici, l'enfant comprend qu'une quantité peut être décomposée en deux sous-ensembles référant à deux numérosités différentes (5 peut se décomposer en 2 et 3) et, inversement, que recombinaison de ces deux ensembles donnera à nouveau la quantité de départ (remettre 2 et 3 ensemble donne 5) : ce sont les principes de composition et décomposition. Les auteurs avancent aussi qu'à ce stade, l'enfant découvre que deux ensembles numériques diffèrent par une troisième numérosité (e.g. il y a une différence de 2 entre un ensemble de 3 et un ensemble de 5). A ce stade, les doigts permettent de garder une trace des items comptés pour soulager la mémoire de travail mais... pas uniquement ! Ils permettent aussi de visualiser les compositions et décompositions en rapprochant ou en espaçant des sous-ensembles de doigts et de représenter les différences de magnitude entre deux ensembles (Roesch & Moeller, 2015).

Il semble donc assez naturel, pour la plupart des enfants, d'utiliser leurs doigts pour soutenir leurs premières activités arithmétiques. C'est pourquoi, récemment, Neveu et al. (2023a) ont mené une revue exploratoire visant à identifier et résumer toutes les études qui ont investigué

la relation entre l'utilisation des doigts et l'arithmétique dans l'enfance. Parmi les 75 études incluses, certaines adoptaient un point de vue éducationnel et d'autres un point de vue cognitif. Celles adoptant une approche éducationnelle ont envisagé la question des stratégies digitales utilisées dans les activités arithmétiques : *Quelles sont-elles ? Comment soutiennent-elles les performances arithmétiques ? Comment évoluent-elles avec l'âge ?* Les recherches sur ces questions éducationnelles montrent que les stratégies digitales de résolution de calculs utilisées par les enfants sont variées (comptages divers, tracés d'abaques dans les airs, représentations des collections sous format canonique, ...). Déjà en 1987, Baroody différenciait les stratégies concrètes et mentales pour représenter les compositions réalisées dans les additions simples (de nombres à un chiffre). Les stratégies concrètes consistent à compter séparément chacune des opérandes avant de recompter le tout pour obtenir la somme ; dans ce cas, l'enfant peut adopter une stratégie de counting all (recompter chaque doigt) ou de counting on (recompter à partir du cardinal d'un des termes, sachant que commencer par le plus grand est plus économique mais nécessite de maîtriser le principe de commutativité). A l'inverse, dans les stratégies mentales, les deux opérandes ne sont pas comptés séparément avant d'être rassemblés. Dans les deux types de stratégies, les doigts peuvent être utilisés pour représenter un seul ou les deux termes de l'opération. Enfin, les doigts peuvent être levés séquentiellement en parallèle du comptage en se basant sur le principe d'ordinalité (on parle alors de geste dynamique de comptage sur les doigts) ou simultanément sur base des représentations cardinales acquises au niveau 2 du modèle de Krajewski & Schneider (2009) approfondi par Roesch & Moeller (2015) (on parle alors de geste statique sur les doigts) (Neveu et al., 2023b). Des stratégies mixtes, dans lesquelles l'enfant lève simultanément les doigts représentant un terme et séquentiellement ceux représentant l'autre, existent également. Selon Baroody, l'enfant passerait plus ou moins rapidement de stratégies concrètes séquentielles aux stratégies mixtes puis simultanées. En effet, les données rassemblées par Neveu et al. (2023a) suggèrent une transition des stratégies digitales vers les stratégies plus cognitives et mnésiques au cours de l'enfance, avec le support de la mémoire de travail, véritable prérequis de cette transition. A l'appui de ces données, Krenger & Thevenot (2024) ont montré que, chez des enfants de 4 ans et demi, l'utilisation spontanée des doigts permettait une meilleure précision dans la réalisation de calculs. Mieux encore, les enfants ayant spontanément utilisé leurs doigts pour ces activités par le passé sont, par la suite, plus précis en calcul que ceux ne les ayant jamais utilisés. Cela suggère donc que le calcul sur les doigts permet une meilleure performance à cet âge mais aussi une meilleure chance de développer des compétences en calcul précises sans les doigts dans le futur. En avançant en âge, Domahs et al. (2008) suggèrent que les enfants intègrent la sous-base 5,

inhérente à la configuration de nos mains, et l'utilisent pour manipuler les grands nombres lors de calculs. C'est en tout cas ce que leurs données démontrent puisque, chez leurs sujets (de fin de 1^{ère} à fin de 3^{ème} primaire) les erreurs de calcul (additions et soustractions de nombres à un et deux chiffres) déviant précisément de 5 unités (une main) par rapport à la cible, au-dessus ou en-dessous de la bonne réponse, dépassent le niveau du hasard.

Les papiers inclus dans la revue de la littérature de Neveu et al. (2023a) adoptant une approche cognitive ont tenté de répondre aux questions suivantes : « *Quels mécanismes cognitifs et neurobiologiques sous-tendent les relations entre doigts et arithmétique ?* ». Sur le plan cognitif, la majorité des études incluses tendent à admettre qu'il existe une relation entre les gnosies digitales et les compétences arithmétiques, de même qu'un lien entre compétences motrices fines et arithmétiques. Plus précisément, les gnosies digitales chez l'enfant seraient particulièrement prédictives des performances arithmétiques (Crollen & Noël, 2015 ; Zhang et al., 2020), bien que certains auteurs tendent à penser que leur effet est principalement indirect, par l'amélioration de la compréhension du système numérique (Penner-Wilger et al., 2007 cités par Barrocas et al., 2020 ; Reeve & Humberstone, 2011). D'autres auteurs encore parlent d'un effet direct (Asakawa & Sigmura, 2022) mais faible puisque les gnosies digitales n'expliqueraient pas plus d'un à deux pourcents de la variance des compétences en additions/soustractions chez les enfants de 1^{ère} primaire (Wasner et al., 2016).

Si les gnosies digitales semblent avoir un effet sur les performances en arithmétique, la motricité fine également puisqu'elle serait meilleure prédictrice des compétences en calcul que la motricité globale entre 4 et 6 ans (Asakawa & Sigmura, 2011). La plupart des auteurs s'accordent au moins à dire que la motricité fine digitale aurait un effet indirect sur les performances en calcul, au travers d'une variable médiatrice. Les compétences cardinales (Neveu et al., 2023b) et les capacités de comptage sur les doigts (Asakawa & Sigmura, 2022 ; Suggate et al., 2017) sont pointées comme étant ces variables médiatrices. Néanmoins, certains auteurs plaident également en faveur d'une relation directe entre les deux variables (Asakawa & Sigmura, 2022). Quoiqu'il en soit, les données récoltées dans la revue de Neveu et al. (2023a) mettent en exergue que d'autres facteurs cognitifs sont fortement corrélés aux compétences arithmétiques (voire plus que les compétences motrices fines), notamment le fonctionnement exécutif, le raisonnement perceptuel, la vitesse de traitement, la mémoire de travail, le QI ou encore les compétences numériques précoces. A l'appui de ces données, Crollen & Noël (2015) ont d'ailleurs approfondi leur étude, susmentionnée, en proposant à leurs sujets de 1^{ère} et 4^{ème} primaire de résoudre des additions de différents niveaux de complexité, dans une condition

contrôle, une condition « interférence manuelle » ou une condition « interférence aux pieds ». Leurs résultats montrent un effet distracteur de l'interférence manuelle sur la résolution des additions les plus complexes chez tous les enfants (surtout ceux de 1^{ère} primaire). Ces résultats pointent que les doigts sont utilisés pour maintenir une trace de la stratégie de calcul en mémoire de travail lorsque la réponse ne peut pas être récupérée automatiquement.

A l'âge adulte...

Après avoir abordé le rôle des doigts dans les activités arithmétiques au cours de l'enfance, passons en revue les données traitant de cela chez l'adulte. Même à l'âge adulte, les opérations arithmétiques continuent d'être sous-tendues par l'utilisation des doigts et les représentations digitales de façon inconsciente. C'est ce qu'ont montré Imbo et ses collaborateurs (2011) en utilisant un design semblable à celui de Crollen et Noël (2015) : leurs sujets adultes ont été amenés à résoudre des additions et soustractions soit en réalisant des mouvements passifs de la main dirigés par l'expérimentateur, soit en ayant les mains libres, selon le groupe auquel ils avaient été assignés. Les résultats montrent que l'occupation des mains ralentit significativement la résolution des opérations qui ne constituent pas des faits arithmétiques. Dans le même ordre d'idée, Badets et al. (2010) ont montré que les adultes résolvent plus vite les additions proposées quand la bonne réponse est primée par une configuration canonique de doigts que quand on la flashe sous forme d'une collection de bâtonnets.

Selon les données issues de la neuroimagerie...

Au niveau neurobiologique, Neveu et al. (2023a) pointent que les études IRM montrent des activations des zones dédiées à la motricité digitale pendant le calcul. D'ailleurs Berteletti & Booth (2015) ont montré que, même si les enfants utilisent plus les aires motrices pour les soustractions que pour les multiplications, suggérant un soutien plus important du raisonnement via les stratégies digitales pour les soustractions (là où les multiplications reposent plus sur de la récupération en mémoire verbale), les deux types d'opérations génèrent une activation du cortex somatosensoriel. Cela indique une activation implicite des représentations digitales quelle que soit l'opération arithmétique, d'autant plus si les nombres à traiter réfèrent à de grandes quantités. Cependant, les études qui comparent les enfants sans et avec déficits moteurs ne montrent pas de différences dans le développement des compétences en calcul, probablement car ces derniers apprennent à compenser via des stratégies mentales plus tôt dans le développement (Neveu et al., 2023a).

c) Conclusions

En conclusion, la sensorimotricité digitale joue un rôle dans le développement numérique, à tous les niveaux repris par le modèle de Roesch & Moeller (2015).

Concrètement, le recrutement des doigts lors des activités de **comptage** permet de faciliter l'accès aux principes de correspondance terme-à-terme (car chaque mot-nombre est prononcé en regard de la levée d'un doigt), d'ordre stable et d'ordinalité (Roesch & Moeller, 2015). Cela permet aussi une meilleure distinction phonologique des mots-nombres (Alibaldi & Di Russo, 1999). Dans le cadre des activités de **dénombrement**, les doigts sont utilisés pour pointer les éléments (Bardi et al., 1997) mais permettent aussi de soulager la mémoire de travail en cas d'interférences ou de double tâche (Crollen & Noël, 2015). Sur le plan cognitif, on observe un effet de la motricité fine digitale (et notamment de la dextérité) sur la qualité du dénombrement mais aussi, en cascade, sur la conceptualisation de celui-ci. Autrement dit, il existe un effet indirect de la motricité fine digitale sur la compréhension de l'intérêt du dénombrement (qui vise à obtenir le total de l'ensemble), ce qui jette les bases de la cardinalité (Fisher et al., 2017). Chez l'enfant tout-venant, la **cardinalité** se développe de façon progressive en suivant une trajectoire variable selon les enfants (Rousselle & Vossius, 2021). Cet apprentissage consiste à associer la quantité contenue dans un ensemble (non-symbolique) à un mot-nombre spécifique (symbolique) (Barner, 2012). Les doigts constituent un outil intéressant pour faciliter cette association car ils forment une représentation intermédiaire (Gunderson et al., 2015), possédant à la fois un caractère iconique (puisqu'ils permettent une correspondance terme-à-terme avec les mots-nombres) et un caractère symbolique (puisque leur configuration holistique est conventionnellement admise) (Roesch & Moeller, 2015). L'utilisation des doigts pour représenter un cardinal (sans repasser par le geste dynamique de comptage) serait particulièrement associée aux gnosies digitales, suggérant que ce geste statique nécessite d'être sensoriellement conscient des doigts à lever (Fisher et al., 2022).

Pour finir, dans les activités **arithmétiques**, la mobilisation des doigts permet de visualiser les quantités à manipuler et les opérations à appliquer (Roesch & Moeller, 2015). Les stratégies digitales utilisées pour ce faire sont variées, certaines étant basées sur le comptage, d'autres sur les cardinaux des ensembles à manipuler, ou encore sur des intermédiaires mixtes (Neveu et al., 2023a). Par ailleurs, la mobilisation des doigts dans les activités arithmétiques permet de soulager la mémoire de travail lorsque les opérations sont complexes (Crollen & Noël, 2015). Dès lors, il existe un impact (plus ou moins direct selon les auteurs) des gnosies digitales sur le développement des compétences arithmétiques (Barrocas et al., 2020 ; Zhang et al., 2020). En

outre, la motricité fine influence le développement arithmétique au travers des compétences cardinales (Neveu et al., 2023b) ou du comptage (Asakawa & Sigmura, 2022).

2. Prématurité

a) Les chiffres

Selon l'Organisation Mondiale de la Santé (2018), dite OMS, ce sont chaque année 15 millions de bébés qui naissent prématurément. Cela représente 11% des naissances vivantes selon Walani (2020). Toutefois, le taux de naissances prématurées varie de 18% en Afrique subsaharienne à 5% dans les pays d'Europe du Nord. En 2010, ce taux avoisine 7,4% en France (Torchin et al., 2015). Actuellement, ces chiffres sont en constante augmentation pour plusieurs raisons : l'accroissement de l'âge des mères, l'augmentation des traitements contre l'infertilité favorisant les grossesses multiples, le recours plus fréquent aux césariennes et déclenchement avant terme, etc. (Torchin et al., 2015 ; Vogel et al., 2018).

Parmi les 15 millions de bébés qui naissent prématurément chaque année, 1 million succomberont aux complications liées à leur prématurité avant l'âge de 5 ans, faisant de la prématurité la première cause de décès en période néonatale et chez les enfants de 0 à 5 ans (Harrison & Goldenberg, 2016 ; Walani, 2020). Walani (2020) avance tout de même que 50% des nourrissons nés à 24 semaines survivent dans les pays industrialisés (alors que ce sont 50% des bébés nés à 32 semaines qui survivront dans les pays en voie de développement). Dans le même sens, Torchin et al. (2015) avancent que, dans les pays industrialisés à hauts revenus, le taux de survie dépasse 90% dès l'âge gestationnel de 28 semaines (contre seulement 10% de survie à ce même âge gestationnel dans les pays en voie de développement). Harrison & Goldenberg (2016) ajoutent que ce taux gagne 1% pour chaque semaine d'aménorrhée supplémentaire au-delà de 30 semaines. Concernant les grands prématurés plus spécifiquement, la majorité de ceux nés dans les pays développés survit également grâce à l'amélioration des soins obstétricaux et néonataux (Barfield, 2018).

En 2007, l'Institut National de Médecine des USA aurait chiffré le coût total des soins médicaux dispensés aux enfants nés prématurément à 16 milliards de dollars sur l'année (Barfield, 2018). Si on ajoute à cela le budget des interventions précoces nécessaires, les financements pour une inscription dans l'éducation spécialisée et les soins médicaux fournis aux mères, alors le coût

total annuel de la prématurité s'élèverait entre 25 et 26 milliards de dollars (McCormick et al., 2011 ; Waitzman et al., 2021).

Au vu du nombre d'enfants concernés et du coût sociétal engendré par la prématurité, il semble évident qu'il s'agit d'une problématique de santé publique sur laquelle il est important de se pencher.

b) Classification de la prématurité

Avant d'aborder les causes et conséquences de la prématurité, faisons le point sur sa définition et les différents degrés de prématurité qui existent. L'OMS (2018) considère comme prématuré tout enfant né avant 37 semaines d'aménorrhée révolues. Plus précisément, elle distingue trois catégories de prématurité :

- La prématurité moyenne concerne les bébés nés entre 32 et 36 semaines d'aménorrhée. Dans cette catégorie, on parle de prématurité tardive pour les bébés nés entre 34 et 36 semaines de grossesse. La prématurité moyenne regroupe 85% des prématurés.
- La grande prématurité concerne les nourrissons nés entre 28 et 31 semaines d'aménorrhée et rassemble 10% des enfants nés prématurément.
- La très grande prématurité concerne les enfants nés entre 22 et 27 semaines de gestation, soit 5% des enfants prématurés à travers le monde. Dans ce sous-groupe, on parle d'extrême prématurité pour désigner les nourrissons nés en-deçà du cap des 26 semaines.

Actuellement, la limite de viabilité est fixée à 22 semaines de grossesse.

Les bébés moyens et grands prématurés représentent la majorité des naissances avant terme et sont surtout à risques de complications (et pas tant de mortalité dans nos pays industrialisés) (Walani, 2020). Dans une optique de santé publique, il est donc intéressant d'étudier ces cohortes afin de mieux comprendre à quelles complications elles font face pour une meilleure adaptation des suivis (McCormick et al., 2011).

Outre l'âge gestationnel, il est important de tenir compte du poids à la naissance. En effet, le petit poids est un facteur de risque supplémentaire au décès à la naissance (Harrison & Goldenberg, 2016) et aux complications néonatales chez les nourrissons prématurés (McCormick et al., 2011). De plus, les nourrissons nés avec un petit poids ont un risque accru

de faiblesses neurodéveloppementales durant l'enfance et de contraction de différentes maladies à l'âge adulte (Marete et al., 2020).

A nouveau, l'OMS (2018) décrit différents groupes d'enfants selon leur poids à la naissance. On parle de petit poids lorsqu'un enfant pèse moins de 2,5kg, de très petit poids sous 1,5kg et d'extrêmement petit poids en-deçà de 1kg. La limite de viabilité est fixée à 0,5kg. Le petit poids, de manière générale, concernerait plus de 20 millions de bébés chaque année, soit 15 à 20% des naissances (Matere et al., 2020).

c) Causes de la prématurité

A l'heure actuelle, il reste difficile d'estimer les causes exactes des naissances prématurées à travers le monde car les informations enregistrées concernant ces naissances ne sont pas toujours accessibles ni de qualité (Harrison & Goldenberg, 2016).

On distingue néanmoins la prématurité spontanée de la prématurité induite par les soins (césarienne et déclenchement en cas de souffrance maternelle ou fœtale). Les naissances prématurées spontanées représentent 70% des naissances prématurées dans les pays industrialisés, avec une kyrielle de facteurs de risque identifiés (grossesse adolescente, âge maternel avancé, grossesse multiple, prise tabagique, procréation médicalement assistée, anomalies placentaires, infections, diabète, pollution, ...), mais qui ne concernent finalement qu'un tiers de ces accouchements prématurés spontanés (Vogel et al., 2018). En cause, on pointe une réaction inflammatoire qui génère une libération trop précoce des hormones déclenchant l'accouchement en raison de multiples facteurs interagissant les uns avec les autres (Harrison & Goldenberg, 2016), sans qu'un mécanisme biologique, clair et identique pour toutes les dyades mère-enfant, ne puisse être mis en évidence (McCormick et al., 2011 ; Vogel et al., 2018). Les naissances prématurées induites par les soins médicaux (césarienne et déclenchement), elles, sont dispensées en cas de prééclampsie, d'hémorragies ou autres affections mettant à risque la santé de la mère ou de l'enfant à naître. Elles concernent 30% des bébés prématurés dans les pays développés (Harrison & Goldenberg, 2016).

d) Conséquences de la prématurité

Bien que, dans les pays industrialisés à revenus élevés, la quasi-totalité des bébés nés avant terme survivent (Barfield, 2018 ; Torchin et al, 2015), l'immatunité de leur organisme les met

à haut risque de complications neurodéveloppementales, incluant des troubles moteurs, neurosensoriels, cognitifs et comportementaux (Barfield, 2018). Ainsi, le nombre d'enfants prématurés sortant des services de néonatalogie ne fait que croître mais les complications liées restent nombreuses et les inquiétudes quant au pronostic à moyen et long terme de ces enfants persistent (Torchin et al., 2015).

Concernant la morbidité néonatale, plusieurs types de complications peuvent survenir, notamment neurologiques (leucomalacie périventriculaire, hémorragie intraventriculaire, hydrocéphalie, ...), respiratoires (immaturité des poumons et utilisation de techniques de ventilation invasives entraînant un risque de dysplasie bronchopulmonaire), digestives (déficit d'absorption par le tube digestif engendrant des retards de croissance dans les premiers mois de vie), infectieuses (le risque de septicémie étant dix fois supérieur en cas de très petit poids) ou encore ophtalmiques (rétinopathie) et auditives (McCormick et al., 2011 ; Torchin et al., 2015 ; Vogel et al., 2018).

Ces complications sont à la fois le reflet du degré d'immaturité des organes et des interventions invasives utilisées pour maintenir le bébé en vie (McCormick et al., 2011), ainsi, plus la prématurité est grande, plus les risques sont importants (Torchin et al., 2015). Si les enfants nés après 34 semaines sont tout de même moins à risques d'atteintes neurologiques, digestives et infectieuses, ils restent souvent sujets aux complications respiratoires (Torchin et al., 2015).

Concernant le pronostic à l'âge préscolaire et scolaire, le risque de présenter des troubles moteurs (notamment une IMC), cognitifs (QI faible), langagiers ou sensoriels (visuels ou auditifs) s'accroît avec le degré de prématurité. On note aussi que le risque de troubles du comportement (notamment TDAH et signes associés au TSA) et de difficultés émotionnelles est accru, de même que celui des troubles des apprentissages scolaires (difficultés en mathématiques et en lecture notamment) engendrant une élévation de la probabilité de redoublement et d'inscription dans l'enseignement spécialisé. Notons que même si la prématurité est tardive, les risques d'IMC et de déficience intellectuelle sont deux à trois fois plus élevés que chez les enfants nés à terme (même s'ils demeurent nettement moins élevés que dans la grande prématurité). Sur le plan médical, les troubles respiratoires persistent également dans l'enfance avec une présence fréquente d'asthme et d'infections respiratoires. Pour finir, la qualité de vie de ces enfants est jugée moins bonne que celle des enfants nés à terme et on observe un impact certain (financier et émotionnel) de la prématurité sur l'ensemble des familles et aidants concernés (McCormick et al., 2011 ; Torchin et al., 2015).

Concernant le pronostic à l'adolescence et au début de l'âge adulte, le niveau d'études atteint par les prématurés est identique à celui des personnes nées à terme, malgré une persistance des troubles cognitifs, notamment exécutifs et de mémoire de travail, survenus dès l'enfance. Néanmoins, leur taux d'incapacité de travail est plus élevé et leurs revenus moyens plus faibles. Du point de vue psychologique, les anciens prématurés démontrent de plus hauts niveaux d'anxiété et de difficultés émotionnelles. Sur le plan médical, ces personnes semblent plus fragiles, avec un risque accru de complications cardiovasculaires, de diabète, d'épilepsie, de troubles oculaires ou encore gynécologiques les amenant plus fréquemment à être hospitalisées et pouvant éventuellement mener à un décès précoce (Crump, 2020 ; McCormick et al., 2011 ; Torchin et al., 2015). Toutefois, les études sur le sujet portent sur des cohortes de personnes nées il y a de nombreuses années pour lesquelles les soins dispensés à la naissance ne correspondent pas aux standards actuels, la médecine ayant progressé.

En conclusion, de la naissance à l'adolescence, les prématurés rencontrent une série de problèmes de santé, de comportement, de fragilités cognitives et motrices ayant un impact sur leur scolarité et leur vie familiale (McCormick et al., 2011). Bien que les conséquences de la prématurité soient généralement plus sévères avec l'aggravation du degré de prématurité, elles peuvent survenir quel que soit l'âge gestationnel. Dès lors, la prématurité, même tardive, ne doit pas être banalisée (Torchin et al., 2015).

3. Difficultés liées à la prématurité : les doigts et les nombres

Même en l'absence de dommages cérébraux massifs, les enfants nés prématurément présentent souvent des décalages développementaux, des troubles cognitifs et des problèmes comportementaux (Anderson, 2014). D'ailleurs, de nombreux enfants nés prématurément sans histoire périnatale lourde et donnant l'impression de bien se développer ont, en réalité, des troubles des apprentissages et/ou des déficits moteurs fins (Bolk et al., 2018 ; Moreira et al., 2014). Dans la suite de ce travail, ce sont les aspects en lien avec notre thématique que nous allons approfondir, à savoir les compétences sensorimotrices digitales et les compétences numériques (notamment cardinales), dans le cadre de la prématurité. Il s'agira ensuite de mettre ces éléments en relation.

a) Difficultés sensorimotrices

✓ *Sensorialité*

Au-delà de la motricité, nous avons aussi abordé l'importance des gnosies digitales dans le développement du nombre (Barrocas et al., 2020). Déjà en 2007, Marlow et ses collaborateurs ont intégré une tâche de gnosies digitales dans leur design expérimental, montrant que les scores des très grands prématurés à celle-ci se situaient plus d'un écart-type sous ceux des enfants contrôles. Mais qu'en est-il vraiment de la sensorialité chez les enfants nés prématurément ? C'est la question que se sont posée Niutanen et al. (2020) dans leur revue systématique évaluant l'incidence et la nature des troubles du traitement sensoriel chez les enfants âgés jusqu'à 9 ans nés avant 36 semaines de grossesse. Leurs données montrent que ces enfants ont un risque bien plus élevé de présenter un trouble du traitement sensoriel que les enfants nés à terme. Plus précisément, 3 catégories de troubles ont été analysées.

Tout d'abord, les troubles de la *modulation sensorielle* (= maintenir un état de vigilance pour détecter, évaluer et réguler les sensations), qui sont significativement plus fréquents chez les prématurés, touchant 9 à 45% d'entre eux en modalité tactile.

Ensuite, les troubles de la *discrimination sensorielle* (= interpréter, localiser et comparer les sensations), eux aussi nettement plus répandus chez les enfants nés prématurément que chez leurs pairs contrôles et caractérisés par des faiblesses kinesthésiques, d'identification des doigts, de perception des configurations manuelles, de graphesthésie, de localisation des stimuli tactiles et par un risque accru de mauvaise intégration visuo-tactile ; ces troubles concernant 18 à 33% des prématurés. Effectivement, Bröring et al. (2018) ont montré que les grands prématurés âgés de 9 ans effectuent moins bien les tâches de traitement et discrimination somatosensoriels (graphesthésie, kinesthésie, ...) que les enfants tout-venants mais pas celles d'identification de doigts. Ils attribuent ces difficultés à des anomalies dans le développement de la matière blanche cérébrale et à une moindre activité corticale au niveau des régions somatosensorielles. Les sujets de Lönnberg et al. (2018), nés grands prématurés et âgés de 7 ans, ont eux aussi rencontré des difficultés dans les tâches de perception de la forme d'objets grâce au toucher et dans les tâches d'identification de doigts touchés. Ceux de Niutanen et al. (2022) rencontrent les mêmes difficultés à 6 ans, ainsi qu'un amoindrissement de la capacité à identifier leurs doigts dans les tâches gnosiques.

Enfin, les troubles du *traitement moteur basé sur la sensorialité*, pour lesquels les auteurs relèvent plus de difficultés de contrôle oculomoteur, d'adaptation motrice, de coordination œil-main, de praxies et de planification motrice ; même si ceux-ci consistent plus souvent en retard

modéré (concernant 30% des enfants prématurés) que sévère (n'en concernant que 0 à 10%). Par exemple, les enfants grands prématurés inclus dans l'étude précitée de Lönnberg et al. (2018) se sont trouvés particulièrement en difficulté sur les tâches de coordination, de précision et de planification visuomotrice en comparaison à leurs camarades nés à terme. Ces aspects rejoignent néanmoins la prochaine partie de ce mémoire, traitant l'aspect moteur du tableau de la prématurité, c'est pourquoi nous ne nous étendrons pas plus sur eux ici.

Dans le même sens que les observations de Niutanen et al. (2020), de Paula Machado et al. (2019) ont noté qu'à un an, leur échantillon de prématurés présentait de moins bons scores que leur échantillon d'enfants tout-venants à une échelle contenant cinq domaines : la réaction à la pression tactile, la réactivité à la stimulation vestibulaire, la fonction motrice adaptative, le contrôle oculomoteur et l'intégration visuo-tactile.

Si la prématurité semble impacter le traitement sensoriel, le lien entre les troubles du traitement sensoriel et le développement cognitif reste toutefois peu clair, le peu d'études ayant été réalisées sur le sujet montrant des résultats contradictoires. De plus, peu de données se focalisent sur la sensorialité spécifiquement au niveau digital ou manuel dans la population prématurée.

✓ *Motricité*

Chez les enfants nés avant 32 semaines de grossesse, la prévalence de l'IMC est de 6 à 9%. Ce taux augmente avec la diminution de l'âge gestationnel puisqu'il avoisine 16 à 28% chez ceux nés avant 26 semaines. Toutefois, même les enfants prématurés tardifs restent plus à risque que ceux nés à terme (McCormick et al., 2011).

Malgré tout, comme nous venons de le voir, des troubles moteurs peuvent survenir en l'absence de lésions cérébrales massives. De nombreux auteurs ont donc questionné la composante motrice chez les prématurés, notamment Moreira et al. (2014) qui, dans leur revue systématique, recensent 4 études démontrant un impact de la prématurité moyenne sur la motricité. Dans une autre revue de la littérature, Bos et al. (2013) estiment la prévalence des troubles moteurs légers à 40% et celle des troubles moteurs modérés à 20% chez les enfants prématurés (contre respectivement 15% et 5% chez les enfants nés à terme). Dans une revue systématique et méta-analyse plus récente, Allotey et ses collaborateurs (2018) ont traité 74 articles dont 12 portaient sur la motricité d'enfants nés prématurément. En tout, environ 7800 enfants étaient concernés. Les résultats montrent que, sur le plan moteur, les prématurés

obtiennent de moins bons scores que leurs pairs tout-venants au cours de l'enfance (dès 2 ans) et que cet écart persiste a minima jusqu'à l'adolescence. Concernant les grands prématurés (nés avant 32 semaines de gestation), les données de la revue d'Evensen et al. (2020) montrent également un risque accru de pauvreté motrice générale et, spécifiquement, pour chaque composante de la motricité (fine, globale et jeu de ballon). Plus précisément, leurs scores totaux sont moins bons à tout âge, y compris à 5 ans où ils se situent entre 0,93 et 1,84 écart-types sous ceux des enfants tout-venants. Les déficits et faiblesses sur le plan moteur toucheraient respectivement 8 à 37% et 12 à 70% des 6-12 ans anciens grands prématurés (Evensen et al., 2020). Si on ajoute les très grands prématurés (nés avant 28 semaines) aux grands prématurés dans le compte, Pascal et al. (2018) estiment, dans leur revue et méta-analyse, que la prévalence du retard moteur avoisinerait 20,5%, avec les retards légers plus fréquents (18%) que les retards modérés à sévères (8,6%). Ici aussi, le degré de prématurité influencerait négativement le développement moteur. Concernant les très grands prématurés, il a justement été démontré qu'ils ont un quotient moteur inférieur à celui de leurs frères et sœurs non-prématurés entre 3 et 5 ans (Kilbride et al., 2004) et effectuent moins bien les tâches motrices que leurs pairs nés à terme (Marlow et al., 2007). L'amointrissement moteur des grands et très grands prématurés persisterait au cours de l'enfance et de l'adolescence mais Vollmer & Stålnacke (2019) déplorent, au travers de leur revue, le peu d'études menées sur les troubles neuromoteurs mineurs chez les adolescents et adultes nés avant 32 semaines de gestation.

Au-delà de la motricité globale, les habiletés motrices fines (c'est-à-dire, les compétences démontrées aux tâches de dextérité et de précision motrice fine telles que décrites aux pages 4 et 5 de ce mémoire) peuvent, elles aussi, être compromises même si aucune lésion n'apparaît à l'imagerie (McCormick et al., 2011). D'ailleurs, les compétences motrices fines semblent plus affectées par la prématurité modérée que la motricité globale qui, elle, est surtout diminuée en cas de grande prématurité (Bos et al., 2013), il est donc probable que ces difficultés concernent un plus large panel d'enfants nés avant-terme. Ainsi, les données de Bos et al. (2013) montrent que les enfants anciens prématurés ont des scores à l'échelle de motricité fine de la M-ABC (Barnett et al., 2007) qui se situent en moyenne 0,62 écart-types en-dessous de leurs pairs contrôles. Plus spécifiquement, Vermeulen et al. (2022) montrent que les enfants nés prématurément ayant un moins bon score de motricité fine à 2 ans sont ceux qui atteignent les moins bons scores au QI performance à 8 ans, ce qui pourrait refléter de moins bonnes compétences d'intégration visuomotrice, une composante importante dans les tâches de dextérité. Benum et al. (2024) montrent qu'une fois devenus adultes, les différences entre

prématurés et nés à terme persistent au niveau moteur fin puisque leurs sujets de 36 ans nés avant 37 semaines restent moins précis et plus lents que les autres à des tâches de dextérité manuelle (planche à trous, tracé entre des points) et aux échelles d'intégration motrice fine et de dextérité manuelle d'une batterie évaluant la mobilité adulte. Passons maintenant aux sujets classifiés « grands prématurés », qui, aux tâches de la M-ABC (Barnett et al., 2007) ont 40 à 60% plus de risques d'être sous les normes que les enfants nés dans le bon timing (Bos et al., 2013). Plus précisément, les données récentes montrent que, chez les grands prématurés évalués à l'âge de 5 ans, les scores de dextérité manuelle se situent 0,39 à 0,91 écart-types sous la moyenne des enfants tout-venants (Evensen et al., 2020). 3% de ces enfants présenteraient un score sous le percentile cinq à ces tâches (Evensen et al., 2020). Les très grands prématurés ne sont pas en reste puisqu'eux aussi sont significativement plus faibles aux tâches de motricité fine à l'âge de 5 ans : ils ont 2,6 fois plus de risques d'échouer à la tâche de construction et 3 fois plus de risques de ne pas parvenir à recopier les 4 dessins proposés par Lee et al. (2017). De plus, les données de Marlow et al. (2007) les placent plus d'un écart-type sous leurs pairs contrôles dans des tâches de pianotage, d'imitation de configurations de mains et de précision en dessin, leurs performances étant marquées par la présence plus fréquente de mouvements dystoniques. Ces éléments contribuent à une réussite scolaire appauvrie (Marlow et al., 2007). A l'entrée en primaire, les données de Niutanen et al. (2022) démontrent à nouveau que ces enfants peinent en imitation de configurations digitales, en copie de dessins, aux tâches de la MABC-2 (notamment à l'indice de dextérité manuelle) et à celles de précision motrice. A 7 ans, les très grands prématurés continuent d'être moins performants que leurs pairs aux tâches de dextérité (copie de dessin, tracé d'un circuit) : ils sont significativement plus nombreux (20 à 50%) à démontrer un score déficitaire à une des tâches sensorimotrices proposées par Lönnberg et al. (2018) que les tout-venants (0 à 30%). D'ailleurs, en moyenne, ils obtiennent 0,6 à 1 écart-type de moins que les tout-venants selon ces auteurs. Ces difficultés de précision en dextérité perdurent à l'âge adulte pour les grands et très grands prématurés (Vollmer & Stålnacke, 2019).

En globalité, ces données indiquent que les compétences motrices pauvres, même en l'absence d'IMC ou d'histoire périnatale lourde, font partie du tableau de la prématurité durant l'enfance, quel que soit l'âge gestationnel. Comme mécanisme explicatif, les auteurs avancent le fait que les enfants prématurés sont plus fréquemment victimes d'hypoxie et d'infections néonatales qui génèrent des lésions diffuses de la matière blanche (une structure qui connecte les différentes zones cérébrales). Comme les activités de motricité demandent l'intégration d'un vaste réseau

cortical, il est possible que de telles lésions les entravent (Bos et al., 2013). D'autres auteurs mentionnent également la réduction du volume de zones cérébrales clés pour la dextérité et la motricité fine (gyrus précentral, tronc cérébral et cervelet) (Bolk et al., 2018).

b) Difficultés en cognition numérique

✓ *Etat des lieux*

De manière générale, les auteurs rapportent que les enfants nés prématurément montrent plus couramment des difficultés scolaires que les enfants nés à terme (McBryde et al., 2020). Parmi les matières scolaires les plus touchées se retrouvent les mathématiques, avec des scores réduits dès 5 ans, que la prématurité soit moyenne (Lee et al., 2017), grande (Adrian et al., 2020) ou très grande (Hasler & Akshoomoff, 2019). Si certaines revues concluent que, dans le cadre de la prématurité moyenne, les difficultés sont effectivement présentes dans l'enfance mais tendent à s'estomper (Allotey et al., 2018 ; Doyle et al., 2021), d'autres auteurs se montrent moins optimistes sur la question et parlent de persistance des difficultés mathématiques a minima jusqu'en 5^{ème} primaire (Townley Flores et al., 2021) voire jusqu'à l'adolescence (Twilhaar et al., 2018). Les grands et très grands prématurés, eux aussi, atteignent de moins bons scores que leurs camarades nés à terme aux tests pédagogiques nationaux évaluant les mathématiques que ce soit à 5 ans (van Veen et al., 2019), à 12 ans (où ils se placent en moyenne 0,45 écarts-types sous les tout-venants) (van Beek et al., 2022) ou à 13 ans (âge auquel la taille d'effet reste modérée) (Twilhaar et al., 2020). Ainsi, ils font plus fréquemment face à des difficultés dans les compétences mathématiques formelles durant leur scolarité et atteignent d'ailleurs moins facilement les standards scolaires nationaux. Contrairement au cas de la prématurité moyenne, la persistance des difficultés semble nette dans celui de la (très) grande prématurité, avec des enfants qui finissent par développer des acquis mathématiques, mais continuellement plus tard que les enfants nés à terme (Raghubar & Barnes, 2016). Ceci semble problématique puisque, dans cette population, les scores en mathématiques dans l'enfance prédisent la réussite du cursus académique secondaire (Jaekel et al., 2021). En globalité, c'est ainsi qu'au fil de leur scolarité, les enfants nés avant terme se placent environ 0,8 écart-types sous les scores de leurs camarades contrôles aux tâches numériques et ont plus fréquemment besoin d'une éducation adaptée (Pascoe et al., 2021 ; Twilhaar et al., 2018). De plus, les difficultés en mathématiques apparaîtraient quel que soit le degré de prématurité (McBryde et al., 2020) et seraient plus importantes et persistantes que les difficultés en lecture (Alanko et al., 2017 ; McBryde et al., 2020).

Au-delà des mesures globales du développement numérique, plusieurs auteurs ont pris le parti de se centrer sur des sous-composants de celui-ci.

Ainsi, pour expliquer ces décalages entre les prématurés et les autres enfants dans les mesures globales du niveau numérique et dans les évaluations pédagogiques du niveau en mathématiques, certains auteurs pointent des difficultés de reconnaissance des nombres arabes et des symboles mathématiques (McBryde et al., 2020), de transcodage (Alanko et al., 2017 ; Clayton et al., 2022 ; Guarini et al., 2014) ou encore d'utilisation spontanée des informations et relations quantitatives en contexte implicite (Halme et al., 2022).

Pour d'autres auteurs, les décalages aux mesures globales pourraient s'expliquer par un défaut d'approximation de la magnitude des quantités présentées sous forme non-symbolique et symbolique. Sur le versant non-symbolique, certaines montrent, en effet, un retard des grands prématurés dans les tâches de comparaison de collections à 6 ans (Guarini et al., 2014 ; Hellgren et al., 2013 ; Libertus et al., 2017) comme à 8 ans (Guarini et al., 2014). Ce retard semble toutefois se combler puisque les différences ne sont plus observées à l'adolescence (Clayton et al., 2022). Sur le versant symbolique, l'approximation de la magnitude de nombres arabes semble également mettre les prématurés en difficulté à 6 ans (Guarini et al., 2014). La persistance des difficultés aux tâches de comparaison de nombres arabes reste discutée (Simms et al., 2013), certains auteurs observant toujours un écart entre grands prématurés et tout-venants à 8-10 ans (Guarini et al., 2019) alors que d'autres estiment qu'ils rattraperaient leur retard endéans l'âge de 8-10 ans (Guarini et al., 2014 ; Simms et al., 2015). A l'adolescence, l'écart semble, en tout cas, effectivement s'estomper (Clayton et al., 2022).

Les différences observées entre prématurés et tout-venants aux mesures globales du développement numérique pourraient aussi s'expliquer par des difficultés dans les différents niveaux repris dans le modèle de Roesch et Moeller (2015) (et pourraient donc être en lien avec l'utilisation des doigts) :

Concernant le premier niveau du modèle de Roesch et Moeller (2015), les recherches pointent que les prématurés (de tous degrés) sont significativement moins bons dans les tâches de comptage (à l'endroit, à rebours, de borne en borne et par pas) au cours de leur enfance (Alanko et al., 2017 ; Guarini et al., 2014 ; McBryde et al., 2020). La persistance de ces difficultés reste, encore une fois, discutée puisque Guarini et al. (2014) voient les différences entre les enfants grands prématurés et les sujets contrôles s'estomper à 8 ans, alors que Simms et al. (2015) montrent toujours des compétences de comptage inférieures entre 8 et 10 ans, de même que

Clayton et al. (2022) pour qui les adolescents montrent toujours des difficultés d'élaboration du comptage entre 11 et 15 ans. Bien que ces quelques travaux de recherche jettent un peu de lumière sur le traitement numérique de base dans le cadre de la prématurité, Raghobar et Barnes (2016) déplorent le fait qu'il existe encore peu de littérature sur le sujet.

S'il existe encore peu de données sur dans le champ du comptage et du dénombrement, il en existe encore moins dans le domaine de la cardinalité, qui constitue le second niveau du modèle de Roesch et Moeller (2015). En effet, la cardinalité dans le cadre de la prématurité n'a été évaluée que par Tatsuoka et al. (2016), qui montrent que les enfants nés avant 28 semaines de gestation (grands prématurés) présentent des difficultés notables liées à ce principe à l'âge de 5-6 ans, qui jouent sur leurs performances aux tests d'accomplissement scolaire en mathématiques. Nous sommes donc face à un manque cruel de littérature à propos de l'acquisition du principe cardinal dans les populations prématurées de tous degrés et à tous âges.

Le troisième niveau du modèle de Roesch et Moeller (2015) correspond à l'arithmétique, domaine numérique qui est sans nul doute le plus étudié dans le cadre de la prématurité. Dans leur revue de la littérature et méta-analyse, McBryde et al. (2020) mettent en évidence que les prématurés (tous degrés confondus) sont significativement moins bons en calcul (mental ou papier-crayon), dans les tâches demandant l'application des concepts mathématiques (interprétation d'un problème, sélection et réalisation correcte de la procédure de calcul à appliquer) et en fluences arithmétiques (calcul avec contrainte de temps). Les auteurs s'accordent également pour dire que la grande prématurité est associée à une diminution des performances arithmétiques (Adrian et al., 2020) et de fluences arithmétiques à l'entrée (Alanko et al., 2017) et à la fin de la scolarité primaire (Halme et al., 2022). Chez les très grands prématurés aussi, les difficultés en arithmétiques ont été démontrées par Tatsuoka et al. (2016) qui indiquent qu'à l'âge de 5-6 ans, les compétences en additions sont déjà réduites. La persistance de ces difficultés fait à nouveau débat, certains auteurs estimant que l'écart se comble au fil des années (Adrian et al., 2020) alors que d'autres pointent une moindre application des concepts mathématiques dans les tâches de résolution de problèmes à 8-10 ans (Guarini et al., 2019 ; Simms et al., 2015) persistant tout au long de la scolarité (Simms et al., 2013). Cette persistance se traduirait par des difficultés au niveau des faits, des procédures et surtout de la compréhension des concepts mathématiques entre 11 et 15 ans, notamment chez les grands prématurés (Clayton et al., 2022) mais aussi par de moins bonnes compétences en calculs écrits dès le milieu de la scolarité primaire (Guarini et al., 2019).

En conclusion, même s'ils finissent par atteindre les acquis numériques de base qui leur posent généralement problème dans l'enfance, les jeunes nés prématurément conservent plus de difficultés dans l'apprentissage des compétences numériques plus complexes (comme l'appréhension de la magnitude des nombres rationnels, l'algèbre, ...). On observe notamment des difficultés dans les différents niveaux du modèle de Roesch et Moeller (2015), ce qui pourrait suggérer un rôle de l'utilisation des doigts dans le développement numérique chez les prématurés, même s'il semble aussi que des difficultés cognitives plus larges impactent également les apprentissages numériques précoces (Clayton et al., 2022 ; Halme et al., 2022 ; Twilhaar et al., 2020).

✓ *D'où proviennent ces difficultés numériques rencontrées par les prématurés ?*

La construction des compétences numériques s'appuie sur un ensemble de compétences diversifiées, dont la mobilisation dépend de la nature de la tâche à effectuer. L'amointrissement de chacune de ces compétences peut alors constituer un facteur de risque aux difficultés numériques. Dans cette optique, Korpipää et al. (2019) avancent une série de facteurs qui expliqueraient à la fois 40% de la variance des difficultés numériques et de celle des difficultés en lecture rencontrées par les enfants grands prématurés à 6-7 ans. Parmi ces facteurs, ils mentionnent la conscience phonologique, la dénomination rapide automatisée, la connaissance des lettres, les habiletés de comptage et le QI (tous ces indicateurs étant significativement moins bons chez les enfants de leur échantillon de prématurés), notons que ces facteurs sont également souvent relevés par d'autres auteurs (Halme et al., 2022 ; Libertus et al., 2017). Il est intéressant de remarquer que, selon leurs analyses, une partie des difficultés mathématiques rencontrées par notre population cible proviendrait donc de facteurs linguistiques. A cela, Korpipää et al. (2019) ajoutent que la connaissance des nombres (tâche de lecture de nombres arabes) est associée de façon spécifique aux difficultés en mathématiques et est, elle aussi, plus faible chez les grands prématurés que chez les enfants contrôles. Par ailleurs, les déficits plus généraux en mémoire de travail (Clayton et al., 2022 ; Libertus et al., 2017 ; Simms et al., 2015 ; Twilhaar et al., 2020), de fonctions exécutives et attentionnelles (Halme et al., 2022 ; Libertus et al., 2017 ; Twilhaar et al., 2020), de raisonnement (Libertus et al., 2017), de vitesse de traitement (Halme et al., 2022 ; Twilhaar et al., 2020) et visuo-spatiaux (Clayton et al., 2022 ; Halme et al., 2022 ; Simms et al., 2015 ; van Veen et al., 2019) sont, eux aussi, fréquemment rapportés comme étant en lien avec les difficultés numériques des enfants prématurés.

c) Un lien entre ces difficultés sensorimotrices et numériques ?

Dans la première partie de ce travail, nous avons abordé le fait qu'il existe une relation entre doigts et nombres dans le développement typique (Barrocas et al., 2020 ; Roesch et Moeller, 2015). Par ailleurs, nous venons de voir que les enfants nés prématurément présentent un risque accru de faiblesses sensorimotrices fines ainsi que dans le développement de la cognition numérique. Les difficultés dans le domaine du traitement numérique ont été en partie expliquées par de nombreux facteurs cognitifs, perceptifs et linguistiques (Clayton et al., 2022 ; Korpipää et al., 2019 ; Twilhaar et al., 2020), néanmoins ces facteurs expliquent rarement l'entièreté de la variance des performances de nos prématurés dans les tâches numériques. Cela amène la question suivante : les difficultés que présentent les enfants nés prématurément dans le domaine de la cognition numérique sont-elles liées à leur faible sensorimotricité digitale ?

Au niveau de la motricité globale, Davis et al. (2007) défendaient déjà cette idée en montrant que parmi les enfants très grands prématurés qui présentent des déficits moteurs aux échelles de la M-ABC (Barnett et al., 2007), on retrouve un amoindrissement des performances académiques en mathématiques (en comparaison aux enfants nés très grands prématurés sans déficit moteur). Dans le même sens, Holsti et al. (2002) et Wocaldo & Rieger (2008) ont montré que leurs sujets respectivement prématurés (de 7 à 11 ans) et grands prématurés (8 ans) présentant un trouble moteur de la coordination avaient des compétences en mathématiques significativement moins bonnes que les enfants de même âge gestationnel sans difficulté motrice. C'est donc déjà au début des années 2000 que les premiers liens entre motricité et mathématiques (au sens académique du terme) dans les populations prématurées ont émergé dans la littérature.

Mais, 15 ans plus tard, qu'en est-il des recherches centrées sur la sensorimotricité au niveau des doigts en lien avec le développement numérique chez nos prématurés ? Marlow et al. (2007) ont trouvé que les compétences sensorimotrices digitales (mesurées au travers de tâches de pianotage, de gnosies digitales, d'imitation de configurations de mains et de précision graphique) contribuent, parmi une large série de facteurs, à la réussite scolaire générale (notamment mathématique) chez des enfants de 6 ans nés grands prématurés. Plus précisément, deux études ont mis en évidence qu'en début de scolarité primaire (entre 5 et 7 ans), les compétences numériques relatives à tous les niveaux du modèle présenté par Roesch & Moeller (2015), évaluées au travers de tâches de comptage, dénombrement, comparaison de nombres, et application de procédures et faits arithmétiques, sont amoindries chez les enfants nés grands et très grands prématurés. Cette relation entre grande prématurité et développement du nombre

est, en partie, médiée par l'intégration visuomotrice, une compétence sensorimotrice, mesurée par des tâches de dextérité impliquant les doigts (copie de figures et graphomotricité) (Adrian et al., 2020 ; Hasler & Akshoomoff, 2019). Récemment, dans leur papier, Clayton et al. (2022) défendent le fait que, si les adolescents nés grands prématurés présentent encore des difficultés en transcodage dans le sens de l'écriture mais pas de la lecture après contrôle statistique des variables médiatrices cognitives (mémoire de travail et aspects visuospatiaux), c'est probablement en raison du caractère graphomoteur de cet exercice. Johnson et al. (2016) se sont intéressés au cadre plus spécifique des enfants nés extrêmement prématurés et présentant une déficience intellectuelle. Ces auteurs pointent qu'à 11 ans, ceux qui cumulent un trouble des apprentissages (dont 95% englobent des difficultés en mathématiques dans leur échantillon, notamment de comptage, calcul, transcodage et raisonnement arithmétique) sont ceux qui présentent les moins bons scores aux tâches d'imitation de position de mains, de dextérité et de pianotage évaluant la dextérité manuelle et les compétences motrices fines.

En opposition à ces quelques études, van Veen et al. (2019) ont montré que l'impact observé de la grande prématurité de leurs participants de 5 ans sur leurs compétences scolaires en mathématiques (comprenant le comptage, l'estimation de magnitude, l'appréhension des mesures de temps, substances et longueurs, ou encore la géométrie) était en partie médié par les compétences visuo-perceptives mais pas par les compétences en dextérité.

Bien qu'ils ne fassent pas une totale unanimité, les premiers résultats semblent donc pointer un lien entre les variables d'intérêt chez les enfants grands prématurés à l'entrée dans le primaire. Toutefois, les résultats les plus clairs et vastes concernent surtout la dextérité alors que les données sur la sensorialité et la précision motrice fine digitales sont plus rares et discutées.

Une première limite aux études incluses dans la partie « Difficultés liées à la prématurité : les doigts et les nombres » de ce travail concerne le fait que peu investiguent le développement (numérique et/ou moteur) des enfants prématurés modérés et tardifs alors qu'ils sont aussi susceptibles d'avoir des faiblesses développementales et qu'ils sont plus nombreux que les grands et très grands prématurés (Moreira et al., 2014). Ceci pourrait contribuer à surestimer la sévérité des troubles observés dans la prématurité mais à sous-estimer leur prévalence. Une seconde limite tient dans le fait que les difficultés sensorimotrices des enfants et adolescents nés précocement n'ont pas été mises en lien avec des aspects spécifiques du développement numérique mais uniquement avec la réussite scolaire en mathématiques ou avec des scores composites englobant de nombreux aspects numériques. En ce sens, il n'existe actuellement

aucune donnée concernant l'impact de la prématurité sur la relation entre sensorimotricité digitale et cardinalité.

d) En résumé

Sur le **plan moteur**, même sans lésions cérébrales massives, les enfants prématurés de tout degré présentent des scores de motricité globale inférieurs à ceux des enfants tout-venants (Allotey et al., 2018 ; Evensen et al., 2020), ce qui semble persister au cours de la vie. Même constat pour la motricité fine au niveau digital : les enfants nés avant-terme présentent des faiblesses marquées de précision, planification, vitesse et intégration visuomotrices aux tâches de dextérité (Bos et al., 2013 ; Evensen et al., 2020), qui semblent également persister au fil de l'enfance et à l'âge adulte (Benum et al., 2024 ; Vollmer & Stålnacke, 2019).

Au **niveau sensoriel**, des difficultés de modulation et de discrimination sensorielles ont été observées, notamment au niveau digital, jusqu'au moins 9 ans chez des enfants nés avant 37 semaines de grossesse (Niutanen et al., 2020). Ainsi, ces enfants auraient, par exemple, plus de difficultés à identifier leurs doigts lorsqu'ils sont touchés (Lönnberg et al., 2018).

Concernant les **apprentissages mathématiques**, les tests pédagogiques nationaux montrent que les prématurés se classent sous leurs camarades nés à terme, et ce au travers de tous les degrés de prématurité (Allotey et al., 2018 ; McBryde et al., 2020 ; Twilhaar et al., 2018 ; Twilhaar et al., 2020). Certaines études ont investigué des domaines spécifiques du traitement numérique comme le système approximatif de représentation du nombre (Clayton et al., 2022 ; Guarini et al., 2019), le comptage (Alanko et al., 2017 ; Guarini et al., 2014 ; McBryde et al., 2020) ou encore l'arithmétique (Clayton et al., 2022 ; McBryde et al., 2020), domaines au sein desquels les enfants prématurés présentent des difficultés, plus ou moins persistantes. Si une grande partie des compétences numériques finissent par être acquises (bien qu'en retard), les enfants prématurés continuent à démontrer des difficultés pour les utiliser de façon spontanée dans les situations de la vie quotidienne qui le nécessitent de façon implicite (Halme et al., 2022). Le principe cardinal, objet de ce mémoire, n'a que très peu été investigué chez l'enfant né précocement au sein de la littérature, la seule équipe l'ayant étudié montrant des difficultés notables chez les enfants grands prématurés à 5-6 ans (Tatsuoka et al., 2016).

Quelques études récentes mettent en évidence des **liens** entre les aspects sensorimoteurs fins et le développement numérique au sein de la population prématurée (Adrian et al., 2020 ; Clayton et al., 2022 ; Hasler & Akshoomoff, 2019). Cependant, l'existence de ces relations ne fait pas l'unanimité (van Veen et al., 2019). De plus, les études se centrent sur des mesures très globales

du développement numérique ou sur des évaluations de nature académique, ne mettant donc pas le focus sur des aspects spécifiques du traitement numérique (d'ailleurs, aucune d'entre elles ne traite spécifiquement de la cardinalité). Enfin, les grands prématurés et prématurés tardifs sont sous-représentés dans ces études.

III. OBJECTIFS ET QUESTION DE RECHERCHE

Pour rappel, dans le cadre du développement typique, il existe des preuves d'une relation entre les compétences sensorimotrices au niveau digital et les compétences numériques chez les enfants d'âge préscolaire, notamment grâce aux observations cliniques de Gerstmann (1940) puis à divers travaux d'imagerie, à des études de terrain et des revues de la littérature (Barrocas et al., 2020 ; Berteletti & Booth, 2015). Face à ces relations, Roesch et Moeller (2015) ont lancé la question du rôle fonctionnel joué par les doigts dans le développement des compétences numériques. Dans le cadre des activités de comptage, la compétence motrice fine au niveau digital (et, dans une moindre mesure, la composante gnosique) soutient la compréhension des principes de correspondance terme-à-terme et d'ordre stable ainsi que la discrimination phonologique des mots nombres (Fisher et al., 2022 ; Roesch & Moeller, 2015). Par la suite, le caractère à la fois iconique et symbolique des configurations digitales facilite l'acquisition du principe cardinal. En effet, elles constituent une représentation intermédiaire entre la numérosité concrète (où les doigts représentent chaque élément d'une collection) et la représentation abstraite du nombre (où la configuration conventionnelle renvoie à un nombre) (Di Luca & Pesenti, 2011 ; Gunderson et al., 2015). Enfin, les doigts sont utilisés dans les activités arithmétiques au travers d'une ribambelle de stratégies permettant de représenter les quantités à manipuler, de visualiser les opérations appliquées et de garder une trace des items comptés en mémoire (Neveu et al., 2023a ; Roesch & Moeller, 2015). L'emploi de ces stratégies donne accès à une meilleure précision dans le calcul au temps T mais aussi plus tard dans le développement, lors de calculs mentalisés (Krenger & Thevenot, 2024). Ainsi, les revues récentes mettent en évidence un lien clair (mais dont le caractère direct est discuté) entre les gnosies et la motricité digitales d'une part, et les compétences arithmétiques d'autre part (Neveu et al., 2023a).

En parallèle, les données issues de la littérature à propos des difficultés rencontrées par les enfants touchés par la prématurité se sont multipliées. On retrouve tout d'abord des données portant sur leur développement sensorimoteur, notamment au niveau digital. Celles-ci montrent que les troubles de la motricité fine font partie du tableau de la prématurité, les enfants concernés étant plus sujets aux faiblesses de dextérité et de précision motrice fine au niveau des doigts (Bos et al., 2013 ; Evensen et al., 2020), faiblesses qui semblent persister au cours de la scolarité et au-delà (Benum et al., 2024 ; Vollmer & Stålnacke, 2019). Ces enfants sont également plus à risque de présenter des difficultés dans les tâches de gnosies digitales

(Lönnberg et al., 2018) et des difficultés sur les plans de la modulation et de la discrimination sensorielles au niveau des doigts (Niutanen et al., 2020). On retrouve ensuite les données centrées sur le développement cognitif et l'épanouissement scolaire, celles reprises ici traitant plus spécifiquement des compétences numériques. Outre les difficultés de traitement de la magnitude (Guarini et al., 2014 ; Hellgren et al., 2013 ; Libertus et al., 2017 ; Simms et al., 2015) et de transcodage (Alanko et al., 2017 ; Clayton et al., 2022 ; Guarini et al., 2014), celles-ci démontrent que tous les niveaux du développement numérique développés par Roesch & Moeller (2015) posent des difficultés aux enfants prématurés : le comptage (Alanko et al., 2017 ; Clayton et al., 2022 ; Guarini et al., 2014 ; McBryde et al., 2020), la cardinalité (uniquement étudiée par Tatsuoka et al., 2016) et l'arithmétique (Adrian et al., 2020 ; Clayton et al., 2022 ; McBryde et al., 2020) ainsi que son utilisation spontanée dans les contextes qui le demandent implicitement (Halme et al., 2022). Ainsi, les prématurés se classent en moyenne sous leurs pairs nés à terme aux évaluations académiques des acquis mathématiques à travers les différents pays, et ce quel que soit leur degré de prématurité (Allotey et al., 2018 ; McBryde et al., 2020 ; Twilhaar et al., 2018 ; Twilhaar et al., 2020).

Si des liens existent entre les composantes motrices et sensorielles mises en jeu dans la mobilisation des doigts d'une part, et les compétences numériques (comptage, dénombrement, cardinalité et arithmétique) d'autre part chez l'enfant tout-venant, alors, la situation des prématurés pose question. En effet, ceux-ci présentent fréquemment des troubles sensoriels et des faiblesses motrices fines au niveau des doigts et accusent souvent des retards dans les apprentissages numériques. L'ensemble de ces données a donc amené la question générale qui est à l'origine de ce mémoire : existe-t-il un impact de la prématurité sur la relation entre les compétences sensorimotrices fines au niveau digital et les compétences numériques précoces ?

Afin de respecter les exigences d'un mémoire, il a toutefois fallu cibler la thématique abordée, c'est pourquoi il a été décidé de mettre le focus sur la construction des représentations cardinales au sein de la population prématurée. La question de recherche suivante a donc été dressée en respectant la structure reprise sous l'acronyme PICO :

- Le **P** (population, patient ou problématique médicale) correspond aux enfants nés prématurément et scolarisés en maternelle, supposément moins efficaces sur le plan moteur.

- Le **I** (intervention) fait référence à la composante digitale impliquée dans les tâches cardinales proposées, qui nécessitent donc l'utilisation de représentations basées sur les doigts pour être réussies.
- Le **C** (comparaison) renvoie d'une part aux enfants nés à terme auxquels seront comparés les prématurés de notre échantillon et, d'autre part, aux tâches cardinales ne faisant pas intervenir de représentation digitale.
- Le **O** (objectif) réfère aux représentations cardinales (verbales et basées sur les doigts) qu'ont construit nos sujets.

Ainsi, l'objectif de ce mémoire est de répondre à la question suivante :

« Quel est l'effet de la prématurité, et des difficultés sensorimotrices qui lui sont associées, sur le développement des représentations cardinales ? ».

Afin d'aborder cette question pas à pas, deux sous-questions ont été envisagées en lien avec les données issues de la littérature.

1. Sous-question n°1 : impact de la prématurité sur la construction des représentations cardinales ?

La première sous-question est la suivante : les difficultés sensorimotrices fines associées à la prématurité impactent-elles le développement des représentations cardinales (verbales et digitales) ?

Il est communément admis dans la littérature que la population prématurée est particulièrement à risque de faiblesses et déficits sur le plan de la motricité fine, tant au niveau de la dextérité (Bos et al., 2013 ; Marlow et al., 2007 ; Niutanen et al., 2022 ; Vermeulen et al., 2022) qu'au niveau de la précision motrice fine (Marlow et al., 2007 ; Niutanen et al., 2022). Les quelques données récentes suggèrent également qu'ils ont de moins bons scores aux tâches gnosiques digitales que leurs pairs (Lönnberg et al., 2018 ; Niutanen et al., 2022).

Par ailleurs, chez l'enfant tout-venant, il existe des données qui mettent en lien les compétences motrices fines et gnosiques digitales, d'une part, et les performances aux tâches cardinales impliquant la modalité digitale ou non, d'autre part (Fisher et al., 2022 ; Neveu et al., 2023b). En effet, de nombreux auteurs suggèrent que les représentations basées sur les doigts constituent un tremplin dans l'acquisition de la cardinalité, y compris des symboles verbaux (Gunderson et

al., 2015 ; Roesch & Moeller, 2015). Il n'est donc pas surprenant de voir que, chez l'enfant tout-venant, le lien entre sensorimotricité digitale et performances aux tâches cardinales concerne également des épreuves n'impliquant pas directement les doigts.

Comme les déficits sensorimoteurs au niveau des doigts font partie du tableau de la prématurité et que les compétences sensorimotrices ont été mises en lien avec le développement des représentations cardinales (digitales et verbales), la première hypothèse que nous pouvons émettre est que, dans notre échantillon, les enfants nés prématurément obtiendront de moins bons scores aux tâches cardinales (impliquant la modalité digitale ou non) que leurs pairs nés à terme.

2. Sous-question n°2 : difficultés liées à la compréhension ou à la production des configurations digitales ?

La seconde sous-question est la suivante : dans le cadre des activités cardinales, les difficultés rencontrées par les enfants prématurés trouvent-elles leur source dans la formation (et donc la compréhension) des représentations digitales ou dans la production motrice des configurations cardinales au niveau des doigts ?

Comme nous venons de le rappeler, les enfants nés prématurément sont particulièrement à risque de faiblesses et déficits sur le plan de la motricité fine, tant au niveau de la dextérité (Bos et al., 2013 ; Marlow et al., 2007 ; Niutanen et al., 2022 ; Vermeulen et al., 2022) qu'au niveau de la précision motrice fine (Marlow et al., 2007 ; Niutanen et al., 2022).

Par ailleurs, les compétences permettant la production de mouvements digitaux fins (statiques et dynamiques) prédisent les compétences cardinales (Neveu et al., 2023b). Or la mobilisation des doigts pour les gestes associés à la cardinalité implique des composantes sensorimotrices : les gestes dynamiques permettant d'accéder au cardinal d'un ensemble par le comptage sont associés aux compétences de précision motrice fine alors que les gestes statiques produits pour lever simultanément les doigts et ainsi produire la configuration digitale conventionnellement associée à un cardinal sont, eux, associés aux gnosies digitales (Fisher et al., 2022).

Comme les difficultés sensorimotrices au niveau des doigts appartiennent au tableau de la prématurité et que les gestes employés dans les activités cardinales impliquent une composante sensorimotrice, alors, nous pouvons émettre l'hypothèse selon laquelle les enfants prématurés se trouveraient en difficulté dans la production des gestes cardinaux. Concrètement, dans notre

échantillon, il est donc attendu que les enfants du groupe « prématurés » obtiennent de moins bons scores que leurs pairs du groupe contrôle « nés à terme » à la tâche impliquant de produire des configurations digitales canoniques.

De plus, la littérature montre qu'à force d'être confrontés à (et de reproduire) des configurations digitales canoniques, qui revêtent un caractère à la fois iconique (car physiquement dénombrables) et symbolique (car conventionnelles) (Di Luca & Pesenti, 2011 ; Roesch & Moeller, 2015), les enfants (nés à terme) construisent eux-mêmes une représentation holistique des nombres exprimés par ces configurations de doigts (Noël, 2005). Grâce à ces représentations digitales, ils accèdent donc plus vite au cardinal associé aux patterns de doigts conventionnels présentés (Di Luca & Pensenti, 2008 ; Noël, 2005).

Comme le bain de configurations digitales conventionnelles dans lequel sont plongés les enfants (tout-venants) leur permet de construire des représentations holistiques des nombres exprimés au travers de ces patterns de doigts mais que les enfants prématurés sont connus pour présenter des faiblesses sensorimotrices digitales, alors, il se pourrait que les enfants prématurés ne puissent pas développer de représentations cardinales digitales aussi précises que leurs pairs nés à terme. Concernant notre échantillon, nous pouvons donc formuler l'hypothèse suivante : il est attendu que les enfants du groupe « prématurés » obtiennent de moins bons scores que les enfants du groupe contrôle « nés à terme » aux tâches nécessitant la reconnaissance/la compréhension des configurations digitales.

3. Objectifs préliminaires

Préalablement à l'analyse des tâches cardinales, l'échantillon a dû être caractérisé sur le plan sensorimoteur digital ainsi que sur le plan des premiers acquis numériques.

Sur le plan moteur, des tâches impliquant la manipulation d'objets (dites de dextérité) et d'autres ne l'impliquant pas (dites de précision motrice fine) ont été proposées. Un questionnaire interrogeant les compétences motrices dans les activités quotidiennes a également été proposé aux parents. Au niveau sensoriel, une tâche de gnosies digitales a été administrée. Comme la littérature met en évidence que les difficultés sensorimotrices fines font partie du tableau de la prématurité (Bos et al., 2013 ; Marlow et al., 2007 ; Niutanen et al., 2022 ; Vermeulen et al., 2022), nous nous attendons à ce que les enfants de notre groupe

« prématurés » obtiennent de moins bons scores que leurs pairs du groupe contrôle à toutes ces mesures.

Sur le plan des premiers acquis numériques, c'est le développement de la chaîne numérique verbale et du dénombrement qui a été évalué car ces compétences font partie des éléments sur lesquels s'appuie la construction des représentations cardinales (Halme et al., 2022 ; Korpipää et al., 2019 ; Krajewski & Schneider, 2009 ; Libertus et al., 2017). A nouveau, les difficultés de comptage et de dénombrement appartiennent au profil de nombreux enfants prématurés (Alanko et al., 2017 ; Clayton et al., 2022 ; Guarini et al., 2014 ; McBryde et al., 2020 ; Simms et al., 2015), c'est pourquoi il est attendu que les enfants prématurés de notre échantillon obtiennent de moins bons scores que leurs pairs nés à terme à ces tâches.

4. Hypothèse subséquente

La littérature met en évidence que les compétences motrices fines au niveau des doigts impactent le développement cardinal qui, à son tour, contribue à l'acquisition des compétences arithmétiques (Neveu et al., 2023b). Dès lors, une tâche d'arithmétique de base (fluences arithmétiques imagées) a été administrée dans le but d'observer le développement des enfants de l'échantillon sur des compétences numériques plus élaborées. Comme les compétences motrices fines des enfants prématurés de notre échantillon sont supposées être faibles à déficitaires et que nous émettons l'hypothèse que cela entrave le développement de leurs représentations cardinales, nous nous attendons également à ce que leur entrée dans l'arithmétique soit plus complexe (et qu'ils obtiennent donc des scores inférieurs aux enfants du groupe contrôle à cette épreuve).

IV. MÉTHODOLOGIE

1. Population

Les sujets concernés par notre recherche sont des enfants âgés de 3 à 5 ans (m.= 55,8 mois ; sd=8,77 mois ; range 39-68 mois), répartis en deux groupes : d'une part les enfants nés prématurément (<37 semaines de grossesse) et, d'autre part, les enfants contrôles nés à terme (> 37 semaines de grossesse). Tous étaient scolarisés entre la 1^{ère} et la 3^{ème} maternelle au moment des testings.

Les enfants du groupe « prématurés » ont été repérés via les données du Centre de suivi des Anciens Prématurés (CAP), établi au Centre Hospitalier Régional (CHR) de la Citadelle, à Liège, qui leur propose un bilan pluridisciplinaire de screening aux âges de 2 ans et demi et de 5 ans. Les parents de ces enfants ont été contactés par téléphone. Le projet leur a ainsi été présenté et un rendez-vous a été fixé avec les familles ayant donné leur accord de participation. En tout, ce sont 30 participants qui ont été inclus dans l'échantillon : 14 garçons et 16 filles. Tous n'avaient pas le même degré de prématurité : on compte 6 très grands prématurés (nés entre 21 et 27 semaines de gestation), 16 grands prématurés (nés entre 28 et 31 semaines), 7 enfants avec prématurité moyenne (nés entre 32 et 36 semaines) et 1 enfant né avant 36 semaines pour lequel la durée de la grossesse n'a pas pu être clairement identifiée. En moyenne, l'âge gestationnel était de 29,7 semaines et l'échantillon contenait des enfants nés entre 25 et 34 semaines. Tous fréquentaient l'enseignement ordinaire et aucun ne présentait de trouble avéré, ils ont donc été considérés comme suivant un développement typique.

Les enfants du groupe contrôle ont ensuite été recrutés en milieu scolaire dans l'arrondissement liégeois, via des circulaires informatives distribuées dans les classes à destination des parents. Ce sont 30 enfants tout-venants (15 garçons et 15 filles) fréquentant l'enseignement ordinaire qui ont été autorisés par leurs parents à participer. Ils ont été appariés aux enfants du groupe « prématurés » sur base de leur âge chronologique (au mois près). Dans ce groupe comme dans celui des prématurés, aucun enfant ne présentait de trouble avéré et tous ont été considérés comme suivant un développement typique également.

Les testings des enfants prématurés et d'une partie de leurs pairs tout-venants ont eu lieu entre septembre 2019 et février 2020. L'échantillon tout-venant a ensuite été complété entre

septembre et décembre 2023. L'ensemble des fiches de consentement, des questionnaires et protocoles de testing ont été consignés dans des fardes.

2. Protocole de testing

La majorité des sujets ont été testés à domicile bien que certains d'entre eux aient été rencontrés en contexte scolaire. Dans tous les cas, les enfants ont été vus dans un endroit calme et isolé, au cours de séances respectant leur rythme et emploi du temps. La durée des séances a généralement avoisiné une heure, avec quelques variations possibles selon le niveau attentionnel des enfants. Ainsi, pour ceux ayant décroché sur le plan de la concentration, deux séances plus courtes ont été proposées à la place d'une seule séance d'une heure.

En complément du testing avec l'enfant, les parents ont également été mis à contribution. Ils ont d'une part été invités à remplir un questionnaire anamnestique reprenant diverses informations sur la naissance et le développement de leur enfant ainsi que sur leurs données démographiques. D'autre part, un questionnaire moteur issu de la MABC-1 adaptée en français (Soppelsa & Albaret, 2004) leur a également été fourni afin de récolter des données subjectives sur le développement de la motricité des sujets dans leur vie quotidienne. Ce questionnaire propose 48 items représentant des situations motrices quotidiennes pour lesquelles le parent doit estimer si l'enfant est capable de les réaliser selon une échelle allant de 0 (très bien) à 3 (impossible).

Le testing administré aux enfants était composé de tâches sensorimotrices digitales et de tâches numériques faisant, ou non, intervenir concrètement l'utilisation des doigts. Afin d'éviter de voir apparaître des effets de fatigue, l'ordre des tâches a été contrebalancé : au sein de chaque groupe, la moitié des sujets a commencé par les tâches digitales et l'autre moitié par les tâches numériques. Chacune des tâches administrées est expliquée ci-après.

TÂCHES SENSORIMOTRICES DIGITALES	TÂCHE NUMÉRIQUES
<p style="text-align: center;">Gnosies digitales Imitation de configurations de doigts Praxies mélokinétiques Indice de dextérité manuelle (MABC-2)</p>	<p style="text-align: center;">Litanie Comptage Dénombrement Cardinalité « donne-moi » (2 sous-tâches) Cardinalité « montre-moi » (4 sous-tâches) Fluences arithmétiques imagées</p>

Tableau 1: Résumé du protocole de testing

a) Testing sensorimoteur

Durant la tâche d'évaluation des **gnosies digitales**, l'enfant pose ses mains sur la table (paumes face au sol) et un cache est utilisé pour qu'il ne puisse plus voir sa main testée. Pour chaque item, l'expérimentateur touche un de ses doigts (sur la deuxième phalange) à l'aide d'un pointeur, après quoi l'enfant est invité à indiquer quel doigt a été touché en se référant à un dessin de main mis à sa disposition. Tous les items sont d'abord réalisés sur la main dominante, puis sur la non-dominante. Cette épreuve vise à évaluer la capacité de l'enfant à discriminer chacun de ses doigts mais aussi la représentation interne qu'il a construite de ceux-ci et la façon dont il est capable de la mobiliser. Elle a été incluse dans le design expérimental en raison du caractère prédictif des gnosies digitales sur le développement des compétences numériques, abordé dans la partie « revue de la littérature » de ce travail.

Parmi les tâches sensorimotrices, l'enfant a été amené à **imiter différentes configurations digitales** (conventionnelles et atypiques) présentées en miroir par l'expérimentateur. Dans cet exercice, toutes les configurations sont imitées avec la main droite et avec la main gauche. Cette tâche a pour objectif d'apprécier la capacité de l'enfant à positionner ses doigts dans des configurations particulières (qui possèdent ou non une signification numérique), cette capacité correspondant à la composante motrice fine.

Une tâche de mise en mouvement des doigts a aussi été proposée. La tâche de **praxies mélokinétiques** se déroule en trois items, chacun réalisé en miroir de l'expérimentateur, d'abord avec la main préférée de l'enfant puis avec son autre main. Le premier item consiste en un mouvement de pianotage sur la table en y posant successivement et individuellement chaque doigt en commençant par le pouce jusqu'à l'auriculaire. Le deuxième item demande à l'enfant de démarrer poing fermé puis de délier un à un ses doigts (du pouce jusqu'à l'auriculaire) comme s'il comptait jusqu'à cinq. Le troisième item demande à l'enfant de toucher chacun de ses doigts (de l'index à l'auriculaire) à l'aide de son pouce. Il s'agit à nouveau de tester la dissociation motrice entre les doigts mais aussi la capacité à les coordonner lors du mouvement.

Enfin, les trois épreuves permettant de calculer **l'indice de dextérité motrice de la MABC-2** (Barnett et al., 2007) ont été proposées. Durant la première tâche de l'indice (tirelire), l'enfant a une tirelire et des jetons à sa disposition. Le plus rapidement possible, il est invité à mettre tous les jetons dans la tirelire, un à un à une main. Deux essais sont proposés à la main droite

et deux autres essais à la main gauche, le meilleur temps est ensuite conservé pour chaque main. Durant la seconde tâche (cubes), une série de cubes troués sont donnés à l'enfant qui doit les enfiler, le plus rapidement possible, autour d'un lacet. L'enfant peut s'y reprendre à deux fois afin que le meilleur essai soit conservé. Au cours de la troisième tâche (trajet), le dessin d'une route sinueuse est présenté à l'enfant. Il doit alors tracer une ligne continue à l'intérieur de la route, sans dépasser les bords. Deux essais lui sont proposés afin de conserver celui au cours duquel il dépasse le moins. Grâce à ces trois tâches, un indice de dextérité manuelle peut être calculé.

b) Testing des compétences numériques de base

✓ *Chaîne numérique verbale*

Concernant les tâches numériques, l'étendue du développement de la chaîne numérique verbale a été évalué au travers de la tâche de **litanie** qui consiste à demander à l'enfant de réciter la comptine en suivant la consigne : « Peux-tu compter le plus loin possible ? ». Si l'enfant ne parvient pas à démarrer la récitation, l'expérimentateur peut lui fournir une ébauche en récitant les deux premiers nombres. A l'inverse, si l'enfant récite sans erreur la litanie jusqu'à 20, l'expérimentateur l'arrête. La tâche est réalisée à deux reprises afin de déterminer quelle portion de la chaîne numérique verbale est stable et conventionnelle, c'est-à-dire quel ensemble de mots-nombres est récité deux fois en respectant l'ordre conventionnel.

Les items de **comptage** du TEDI-MATH (Van Nieuwenhoven et al., 2001) ont ensuite été administrés afin de déterminer le niveau de maîtrise de la chaîne numérique chez chacun des sujets. Ainsi, il est demandé à l'enfant de compter jusqu'à une borne, à partir d'une borne et de borne en borne au travers de 6 items. Un score total lui a alors été attribué et le niveau de développement de la chaîne a pu être déterminé (chapelet, insécable ou sécable).

✓ *Dénombrement*

Au cours de la tâche de **dénombrement** (visant à évaluer la procédure de dénombrement employée par les sujets), huit planches représentant des collections d'objets disposés linéairement et de numérosités variables (allant de 2 à 10 objets) sont présentées à l'enfant. Celui-ci entend la consigne suivante : « Peux-tu me dire combien il y a de... ? ». D'emblée, l'évaluateur note si l'enfant estime la taille de la collection ou s'il utilise une procédure de dénombrement. Ensuite, pour chacune des huit planches, un point est accordé si l'enfant répond à la consigne en donnant le cardinal de l'ensemble, c'est-à-dire en admettant que la réponse

correspond au dernier mot-nombre prononcé lors du comptage. Si l'enfant dénombre sans répondre à la consigne, alors la question « Ça fait combien en tout ? » lui est posée afin d'évaluer la compréhension de la cardinalité. Si l'enfant ne compte pas oralement et donne une réponse erronée, il est invité à recompter.

c) Testing des compétences cardinales

L'épreuve de **cardinalité** se décline en deux tâches (« donne-moi » et « montre-moi »), elles-mêmes déclinées en plusieurs modalités et sous-tâches.

✓ **Tâches « donne-moi »**

Dans la tâche « donne-moi », un tas de jetons en forme de fleurs est fourni à l'enfant à qui on demande « Peux-tu me donner n fleurs ? ».

Dans la modalité verbale, n est donné oralement (e.g. Peux-tu me donner /trois/ fleurs ?) alors que dans la modalité digitale, n est donné au travers d'une configuration de doigts (e.g. « Peux-tu me donner ça de fleurs ? » en montrant le pouce, l'index et le majeur levés). Concrètement, les deux tâches se déroulent selon le même canevas : on commence par demander à l'enfant de donner 1 jeton fleur, s'il réussit, on lui demande d'en donner 2 et ainsi de suite jusqu'à 10 jetons fleurs. Autrement dit, chaque item réussi fait monter l'enfant à l'item $n+1$. Si toutefois l'enfant échoue à un item, par exemple à « donne-moi 4 fleurs », on repropose l'item $n-1$, à savoir « donne-moi 3 fleurs ». La tâche s'arrête lorsqu'un item est échoué au moins 2 fois sur 3 essais. Cette tâche, construite sur base du design de Le Corre & Carey (2007), permet d'évaluer le niveau de développement cardinal de l'enfant dans les deux modalités.

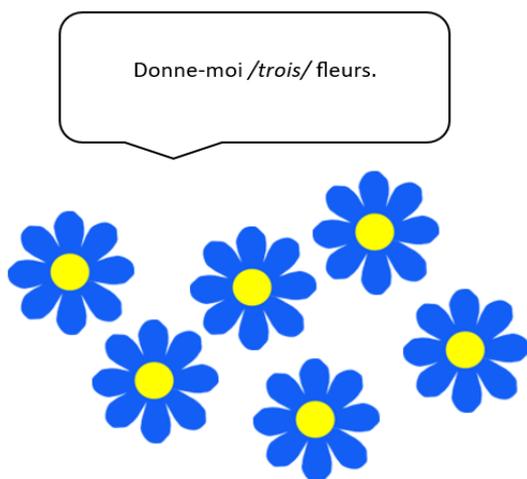


Figure 3: Illustration du design de la tâche "Donne-moi" verbale

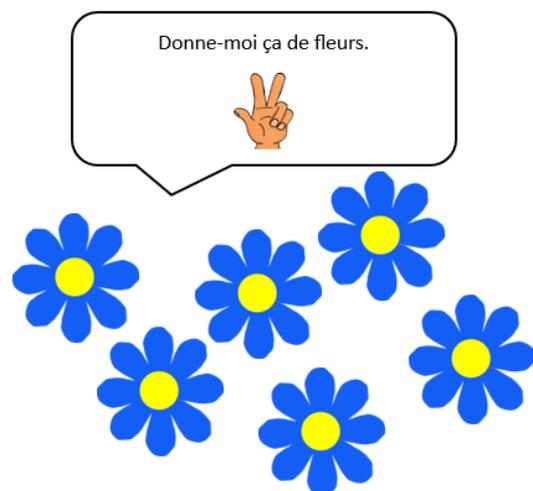


Figure 4: Illustration du design de la tâche "Donne-moi" digitale

Il est important de noter que, pour réussir ces tâches, l'enfant doit accéder à la représentation cardinale du nombre (respectivement en modalité orale et digitale) pour produire une collection. Ces tâches, suivant le même design et ne différant donc que par la modalité de la représentation cardinale à traiter, seront toutes deux analysées dans le cadre de la première question posée par ce mémoire (les difficultés sensorimotrices fines associées à la prématurité impactent-elles le développement des représentations cardinales, verbales et digitales ?).

✓ *Tâches « montre-moi »*

Chacune des sous-tâches « montre-moi » a été nommée en regard des modalités d'entrée et de sortie de celle-ci. Dans chacune d'entre elles, les numérosités testées vont de 1 à 9.

La première sous-tâche, appelée « **montre-moi NVO-collections** », consiste à présenter deux collections de points à l'enfant et à lui demander laquelle contient n éléments (« Montre-moi là où il y a n »), n étant présenté sous forme de NVO par l'expérimentateur. Pour être réussie, cette tâche nécessite donc de reconnaître la valeur cardinale du NVO entendu et de pouvoir déterminer le cardinal des ensembles de points proposés (par subitizing ou par dénombrement) afin de pouvoir associer les deux.

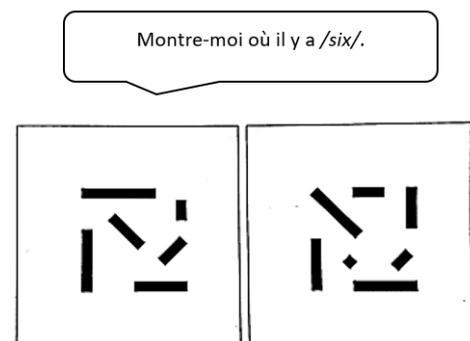


Figure 5: Illustration du design de la tâche "Montre-moi NVO-collection"

La deuxième sous-tâche est appelée « **montre-moi doigts-collection** ». Au cours de celle-ci, l'expérimentateur produit une configuration digitale canonique et demande à l'enfant de choisir, parmi deux planches représentant des collections de points, laquelle correspond à la numérosité représentée par ses doigts (« Montre-moi là où il y a ça » en levant un certain nombre de doigts). Cette tâche requiert donc d'abord que l'enfant accède à la représentation cardinale de la configuration digitale produite par l'expérimentateur.

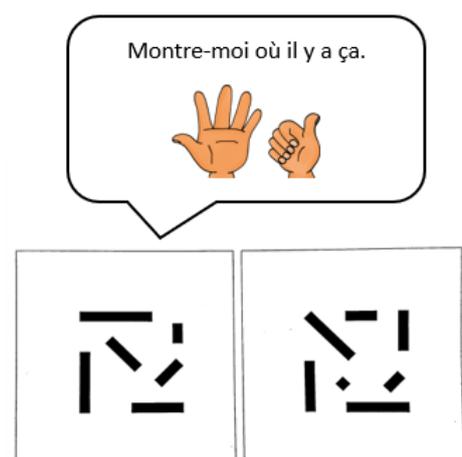


Figure 6: Illustration du design de la tâche "Montre-moi doigts-collection"

Ensuite, l'enfant doit associer cette représentation cardinale digitale avec le cardinal de l'ensemble de points (obtenu par subitizing ou/et par dénombrement). Cette tâche est donc très similaire à la première (montre-moi NVO-collection),

si ce n'est qu'elle ne demande pas l'accès direct à la valeur cardinale d'un NVO présenté mais bien à la valeur cardinale d'une configuration digitale : la modalité d'entrée est donc soit verbale, soit digitale.

La troisième sous-tâche, dite « **montre-moi NVO-photos de doigts** », est également très similaire à la première à l'exception de la modalité de sortie, cette fois. Concrètement, l'expérimentateur présente un NVO à l'enfant qui doit, cette fois, l'apparier avec l'une des deux photographies représentant des configurations canoniques de doigts (« Montre-moi là où il y a n sur ces photos »). Cette tâche requiert de l'enfant qu'il attribue une valeur cardinale au NVO entendu mais aussi aux configurations digitales présentées en photo, afin de pouvoir sélectionner celle qui correspond au NVO. Là où la première tâche (montre-moi NVO-collection) faisait principalement appel à la représentation cardinale verbale, et où la deuxième (montre-moi doigts-collection) faisait surtout intervenir l'accès à la représentation cardinale digitale, cette troisième modalité (montre-moi NVO-photos de doigts) demande de combiner l'accès aux deux types de représentations cardinales (verbale et digitale).

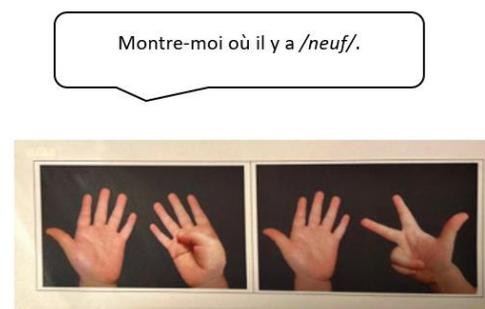


Figure 7: Illustration du design de la tâche "Montre-moi NVO-photos de doigts"

La quatrième sous-tâche est celle nommée « **montre-moi NVO-production digitale** ». Elle consiste à demander à l'enfant de montrer un nombre (présenté oralement) à l'aide de ses doigts (« Montre-moi n avec tes doigts »). Pour ce faire, l'enfant doit tout d'abord déterminer la valeur cardinale du NVO présenté, puis, accéder à la représentation cardinale digitale correspondante stockée ainsi qu'au pattern moteur permettant de la produire. Ce qui la différencie de la troisième sous-tâche (montre-moi NVO-photos de doigts) est donc le caractère d'exécution motrice de la configuration digitale.

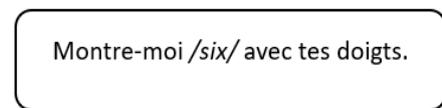


Figure 8: Illustration du design de la tâche "Montre-moi NVO-production digitale"

Concrètement, les trois premières tâches « montre-moi » (NVO-collection ; doigts-collection ; NVO-photos de doigts) suivent le même design et font respectivement appel à la représentation cardinale verbale, la représentation cardinale digitale et aux deux types de représentations à la fois. Elles serviront donc à répondre à la première question abordée par ce mémoire : les difficultés sensorimotrices associées à la prématurité impactent-elles le développement des représentations cardinales verbales et digitales ?

Les troisième (« montre-moi NVO-photos de doigts ») et quatrième (« montre-moi NVO-production digitale ») sous-tâches ne diffèrent que sur le plan moteur. En effet, en modalité NVO-production digitale, l'accès au pattern moteur permettant de produire la configuration digitale est requis en plus de l'accès à la représentation cardinale verbale, ce qui n'est pas le cas dans la modalité NVO-photos de doigts (où seul l'accès à la représentation cardinale verbale est nécessaire). Ces deux sous-tâches seront donc comparées pour répondre à la seconde question posée dans ce mémoire : les difficultés rencontrées par les enfants prématurés dans les activités cardinales trouvent-elles leur source dans la formation (et donc la compréhension) des représentations digitales ou dans la production motrice des configurations cardinales au niveau des doigts ?

d) Testing des premières compétences arithmétiques

Les compétences arithmétiques précoces ont été évaluées, en lien avec l'hypothèse subséquente de fragilités arithmétiques en cascade des difficultés cardinales liées aux faiblesses sensorimotrices chez les enfants prématurés. Pour ce faire, la tâche de **fluences arithmétiques imagées** a été administrée. Ici, des problèmes additifs imagés sont proposés à l'enfant qui doit les résoudre le plus vite possible (en s'aidant des jetons mis à sa disposition si besoin). Après 150 secondes, la tâche s'arrête et le nombre de réponses correctes est comptabilisé. Si l'enfant termine correctement les items avant la fin du temps imparti, des points bonus lui sont crédités.

V. PRÉSENTATION DES RÉSULTATS

Pour rappel, l'objectif de ce mémoire est de répondre aux deux questions suivantes :

- Les difficultés sensorimotrices fines associées à la prématurité impactent-elles le développement des représentations cardinales (verbales et digitales) ?
- Dans le cadre des activités cardinales, les difficultés rencontrées par les enfants prématurés trouvent-elles leur source dans la formation (et donc la compréhension) des représentations digitales ou dans la production motrice des configurations cardinales au niveau des doigts ?

Les analyses statistiques permettant de répondre à ces questions ont été réalisées via le logiciel JASP (0.18.0.0). Le seuil de significativité statistique a été fixé à 0,05.

1. Caractéristiques de l'échantillon

a) Caractéristiques générales

Pour rappel, l'échantillon « prématurés » est composé de 30 enfants (14 garçons et 16 filles) nés avant-terme. Ces enfants sont âgés de 55,8 mois en moyenne (range 39-68 mois). Leur degré de prématurité varie : on compte 6 très grands prématurés (nés entre 21 et 27 semaines de gestation), 16 grands prématurés (nés entre 28 et 31 semaines), 7 enfants avec prématurité moyenne (nés entre 32 et 36 semaines) et 1 enfant né avant 36 semaines pour lequel la durée de la grossesse n'a pas pu être clairement identifiée. En moyenne, l'âge gestationnel de l'échantillon « prématurés » est de 29,7 semaines (range 25-34 semaines).

L'échantillon « contrôle » est composé de 30 enfants (15 garçons et 15 filles) nés à terme (≥ 37 semaines). Etant appariés aux enfants prématurés en âge chronologique (au mois près), l'âge moyen est identique (55,8 mois).

Au moment des testings, les sujets des deux groupes étaient tous scolarisés dans l'enseignement ordinaire, entre la 1^{ère} et la 3^{ème} maternelle, sans différence significative de niveau scolaire entre les groupes ($X^2=1,764$; $p=0,414$).

	Groupe expérimental « prématurés »	Groupe contrôle « tout- venants »
N (garçons-filles)	30 (14-16)	30 (15-15)
Niveau scolaire	1M : N=6 2M : N=14 3M : N=10	1M : N=8 2M : N=9 3M : N=13
Âge chronologique (en mois)	m=55,8 (sd=8,769)	m=55,8 (sd=8,769)
Âge gestationnel (en SG)	m=29,7 (sd=2,534)	>37
Degré de prématurité	Moyenne : N=7 Grande : N=16 Très grande : N=6 Manquante : N=1	Non applicable

Tableau 2: Caractéristiques générales de l'échantillon

b) Au niveau sensorimoteur

Afin de caractériser au mieux l'échantillon, les deux groupes ont été comparés sur la tâche sensorielle (gnosies digitales), les épreuves motrices fines (imitation de configurations digitales, praxies mélokinétiques et indice de dextérité motrice de la MABC-2 (Barnett et al., 2007)) et le questionnaire de la MABC-1 (Soppelsa & Albaret, 2004). Les deux groupes d'enfants ayant été appariés en fonction de leur âge chronologique, ce sont des tests statistiques adaptés aux échantillons appariés qui ont été sélectionnés.

Avant cela, il a toutefois été nécessaire de vérifier la normalité des distributions de données pour chaque tâche au sein de l'échantillon total. Pour chacune des épreuves, un test de Shapiro-Wilk a donc été appliqué. Les résultats montrent que seules les données de l'indice de dextérité manuelle de la MABC-2 (Barnett et al., 2007) se distribuent selon une courbe normale ($W=0,964$; $p=0,072$). Dès lors, le test de comparaison de groupes choisi pour cet indice est le test t de Student (pour échantillons pairés). En revanche, les données des tâches degnosies digitales ($W=0,918$; $p<0,001$), d'imitation de configurations digitales ($W=0,918$; $p<0,001$) et de praxies mélokinétiques ($W=0,797$; $p<0,001$) ne se distribuent pas de façon normale. En

effet, la tâche de gnosies digitales semble se distribuer selon une courbe bimodale, là où les tâches d'imitation et de praxies semblent plafonner. Pour ces trois tâches, c'est donc l'équivalent non-paramétrique du test t de Student qui a été privilégié : le test des rangs de Wilcoxon (pour échantillons appariés).

Sur le plan de la sensorialité digitale, le test de Wilcoxon aux échantillons appariés démontre que les scores des sujets prématurés ($m=10,567$; $sd=4,272$) et tout-venants ($m=11,333$; $sd=3,477$) au test des gnosies digitales ne diffèrent pas significativement ($W(29)=184,5$; $p=0,481$).

Concernant les habiletés de précision motrice fine, les tests de Wilcoxon aux échantillons appariés démontrent que les scores des sujets prématurés ($m=16,733$; $sd=3,676$) sont significativement meilleurs que ceux de leurs pairs tout-venants ($m=15,433$; $sd=2,991$) au test d'imitation de configurations digitales ($W(29)=296$; $p=0,034$). Toutefois, les scores des sujets prématurés ($m=4,067$; $sd=2,149$) et tout-venants ($m=4,6$; $sd=1,793$) ne diffèrent pas significativement au test des praxies mélokinétiques ($W(29)=76,5$; $p=0,463$).

Sur le plan de la dextérité, les scores des sujets prématurés ($m=6,4$; $sd=2,372$) sont significativement inférieurs à ceux des tout-venants ($m=7,9$; $sd=3,336$) à l'indice de dextérité manuelle de la MABC-2 (Barnett et al., 2007) d'après le test t de Student aux échantillons appariés ($t(29)=-2,11$; $p=0,044$).

En complément des données objectives issues des tests administrés, le questionnaire de la MABC-1 (Soppelsa & Albaret, 2004) a permis de récolter des données subjectives sur le fonctionnement moteur des enfants dans leur quotidien. Pour pouvoir exploiter les données de ce questionnaire, il a tout d'abord fallu éliminer les questions à données manquantes. Ainsi, toutes les questions ayant été omises par au moins un parent ont été exclues de l'analyse. De même, les scores des enfants dont les parents n'ont pas rempli le questionnaire ou n'ont rempli que le recto de celui-ci ont été exclus de l'analyse. Ce faisant, un pool de 20 questions a été conservé et ce sont les parents de 12 enfants tout-venants et 27 enfants prématurés qui y ont répondu. En termes de score sur le pool de questions retenues, les moyennes des deux groupes ne diffèrent pas de manière significative ($W=32$; $p=0,301$). Néanmoins, l'analyse qualitative des questionnaires met en évidence que 22% des enfants prématurés (soit 6 sur 27) se trouvent dans l'impossibilité (cote de 3) d'accomplir au moins une des tâches motrices décrites par le questionnaire selon leur parent, alors que cela ne concerne que 8% des enfants tout-venants (soit 1 sur 12).

En globalité, les données ne montrent pas de différence entre les enfants des deux groupes concernant la sensorialité digitale. Sur le plan moteur, les données montrent que les enfants prématurés ont des performances similaires (voire meilleures) que les enfants nés à terme dans les tâches de précision motrice fine (imitation de configurations de doigts et praxies mélokinétiques). Par contre, ils démontrent de moins bonnes performances que leurs pairs tout-venants aux tâches de dextérité composant l'indice de dextérité motrice. Subjectivement, bien que leurs scores totaux ne diffèrent pas au questionnaire de la MABC-1 (Soppelsa & Albaret, 2004), les prématurés semblent plus nombreux que leurs pairs tout-venants à se trouver dans l'impossibilité de réaliser certaines tâches motrices quotidiennes.

c) Au niveau numérique

Outre les aspects sensorimoteurs, l'échantillon a été caractérisé sur le plan des compétences numériques de base (maîtrise de la chaîne numérique verbale et dénombrement) sur lesquelles les compétences cardinales peuvent s'appuyer. Les performances des enfants des deux groupes appariés ont donc été comparées pour les tâches de litanie, de comptage et de dénombrement. En raison de la distribution non-normale des données (litanie : $W=0,847$; $p<0,001$; comptage : $W=0,746$; $p<0,001$ et dénombrement : $W=0,76$; $p<0,001$), ce sont des tests de Wilcoxon pour échantillons appariés qui ont été utilisés.

Les enfants nés prématurément de l'échantillon ont montré de moins bons scores que leurs pairs aux tâches numériques de **litanie** ($W=63,5$; $p=0,024$). Puisque les tâches cardinales proposées dans le cadre de ce mémoire contiennent des numérosités allant de 1 à 9, l'analyse de la litanie a également été lancée spécifiquement sur sa récitation de 1 à 10. Lorsqu'on limite l'analyse à la récitation de la chaîne jusqu'à 10, les résultats montrent qu'il n'y a pas plus d'enfants maîtrisant la chaîne dans un groupe que dans l'autre ($X^2=1,684$; $p=0,194$), environ 2/3 des tout-venants et la moitié des prématurés parvenant jusqu'à ce nombre. Dès lors, même s'il existe des différences dans l'étendue globale de la litanie entre les enfants des deux groupes, il est peu probable que celles-ci puissent expliquer d'éventuelles différences entre les groupes dans nos tâches cardinales.

A la tâche de **comptage**, les enfants prématurés ont obtenu des scores significativement inférieurs à ceux de leurs camarades nés à terme ($W=0$; $p=0,004$), suggérant une moins bonne manipulation de la chaîne numérique. Le niveau de développement de la chaîne numérique verbale atteint est effectivement plus faible chez les enfants nés prématurément ($X^2=17,254$;

$p=0,001$). En effet, malgré 6 données manquantes, les résultats montrent que le niveau atteint par la majorité des enfants prématurés est celui de la chaîne chapelet (aucun n'ayant atteint le niveau de la chaîne sécable) alors que plus de la moitié des enfants nés à terme ont au moins atteint le niveau de la chaîne insécable (13 ayant déjà atteint celui de la chaîne sécable). Il semble donc logique d'observer que les enfants nés à terme sont significativement plus nombreux que les prématurés à maîtriser le comptage jusqu'à une borne ($X^2=4,026$; $p=0,045$), qui offre pourtant un appui pour accéder aux tâches cardinales proposées. Dès lors, pour l'interprétation des résultats, il sera de rigueur de rester attentif aux potentiels impacts de la moindre maîtrise du comptage (notamment jusqu'à une borne) dans l'échantillon d'enfants nés précocement.

En revanche, les scores des enfants des deux groupes ne diffèrent pas significativement à la tâche de **dénombrement** ($W=99$; $p=0,836$).

2. Impact de la prématurité sur les représentations cardinales (question n°1)

Pour rappel, la première question investiguée au travers de ce mémoire est la suivante : les difficultés sensorimotrices fines associées à la prématurité impactent-elles le développement des représentations cardinales (verbales et digitales) ? Afin d'y répondre, les scores des enfants nés à terme et avant-terme aux tâches cardinales impliquant les représentations cardinales (verbales et digitales) ont été comparés.

a) Tâches « donne-moi »

Dans un premier temps, le niveau cardinal atteint par chacun des sujets (prématurés et tout-venants) a été déterminé, en modalité verbale et en modalité digitale respectivement. Ainsi, les enfants capables de donner un nombre correct de jetons lorsque 4 jetons ou plus leur étaient demandés ont été considérés comme « large subset knowers », c'est-à-dire comme ayant accès à une représentation cardinale d'ensembles plus grands. Les enfants réussissant l'exercice avec 1 à 3 jetons ont été étiquetés « small subset knowers », pour lesquels on estime donc qu'ils ont accès à une représentation cardinale des petits nombres (de 1 à 3). Enfin, les enfants incapables de réaliser la tâche ont été considérés comme « prenumeral knowers », autrement dit n'ayant pas encore accès à des représentations cardinales dans la modalité cible. Cette démarche a

respectivement été réalisée pour la tâche « donne-moi verbale » et pour la tâche « donne-moi digitale ».

Statistiquement, les résultats des chi carrés ne montrent pas de différences significatives entre les niveaux atteints entre les deux groupes en modalité verbale ($X^2=0,672$; $p=0,715$) ni en modalité digitale ($X^2=2,403$; $p=0,301$). Autrement dit, les niveaux cardinaux (prenumerical knowers, small subset knowers et large subset knowers) atteints par les deux groupes sont similaires, tant sur base de représentations verbales que sur base de représentations digitales. De façon intéressante, nous pouvons également constater qu’au sein de chaque groupe, le nombre d’enfants atteignant un niveau spécifique en modalité verbale est similaire au nombre d’enfants atteignant ce même niveau en modalité digitale.

	Prenumeral knowers	Small subset knowers	Large subset knowers
Prématurés (modalité verbale)	1	12	17
<i>Prématurés (modalité digitale)</i>	<i>1</i>	<i>13</i>	<i>16</i>
Tout-venants (modalité verbale)	1	9	20
<i>Tout-venants (modalité digitale)</i>	<i>0</i>	<i>9</i>	<i>21</i>

Tableau 3 : Distribution des enfants prématurés et tout-venants dans les différents niveaux cardinaux (en modalités verbale et digitale)

Dans un second temps, les deux tâches « donne-moi » ont également été analysées conjointement en raison de leur design similaire et ne différant que par le caractère verbal ou digital des représentations cardinales à mobiliser. Les données à ces tâches ne se distribuent pas de façon normale (en modalité verbale : $W= 0,833$; $p<0,001$ et en modalité digitale : $W=0,855$; $p<0,001$), pourtant ce n’est pas l’équivalent non-paramétrique de l’ANOVA multifactorielle pour échantillons appariés qui a été choisi, à savoir le test de Friedman. En effet, les analyses de variances paramétriques se montrent tout à fait robustes et ce, même en cas de violation de la condition de normalité des données (Blanca et al., 2017 ; Blanca et al., 2023). De plus, il est impossible de visualiser les effets d’interactions au travers du test de Friedman. Pour ces raisons, il a été décidé de rester sur une ANOVA multifactorielle pour échantillons appariés paramétrique. Cette analyse se centre sur deux facteurs : le groupe (prématuré ou tout-venant) et la modalité d’entrée (verbale ou digitale). Les résultats des analyses montrent que ni l’effet de groupe ($F(1,29)=3,605$; $p=0,068$), ni l’effet de la modalité d’entrée dans la tâche ($F(1,29)=0,819$; $p=0,373$), ni même l’effet d’interaction entre ces deux facteurs ($F(1,29)=0,019$; $p=0,891$) ne sont significatifs. L’absence d’effet du groupe correspond aux résultats obtenus par les analyses de chi carré rapportées ci-dessus.

b) Tâches « montre-moi »

✓ *Analyse globale*

Les tâches « montre-moi » en modalité NVO-collection, doigts-collection et NVO-photos de doigts sont construites selon le même design et ne diffèrent que par le type de représentations cardinales recrutées (respectivement verbales, digitales et verbales+digitales). Dès lors, elles ont été analysées conjointement au travers d'une ANOVA à mesures répétées pour échantillons appariés dans son versant paramétrique (bien que leurs données ne se distribuant à nouveau pas de façon gaussienne : pour « montre-moi NVO-collection » : $W=0,908$; $p<0,001$; pour « montre-moi doigts-collection » : $W=0,916$; $p<0,001$ et pour « montre-moi NVO-photos de doigts » : $W=0,914$; $p<0,001$). A nouveau, l'analyse paramétrique a été choisie car elle est jugée suffisamment robuste et puissante pour éviter les erreurs de type I et ce malgré la violation de la condition de normalité (Blanca et al., 2017 ; Blanca et al., 2023). Le schéma de cette ANOVA à mesures répétées se construit autour de deux facteurs : le groupe (prématuré ou tout-venant) et la tâche (NVO-collection, doigts-collection ou NVO-photos de doigts). La condition de sphéricité étant violée sur ces données, la correction de Greenhouse-Geisser a été appliquée.

Les résultats de l'analyse menée sur l'échantillon total montrent qu'il n'y a pas de différence significative de performance entre les enfants nés à terme et avant-terme ($F(1,29)=0,408$; $p=0,528$). Il n'y a pas non plus de différence significative de réussite entre les diverses modalités de la tâche « montre-moi » parmi les enfants ($F(1.506, 42.155)=0,937$; $p=0,376$). Enfin, les statistiques pointent qu'aucun effet d'interaction ne ressort de façon significative entre ces variables ($F(1.547, 43.315)=0,212$; $p=0,753$).

✓ *La taille de la collection modifie-t-elle ces relations ?*

Pour répondre à cette question, le facteur « taille de la collection » a été ajouté au design de l'ANOVA, en considérant les collections estimables par subitizing (≤ 4) d'un côté et les collections plus grandes (de 5 à 9) de l'autre. La condition de sphéricité étant violée, la correction de Greenhouse-Geisser a été appliquée.

Quasiment aucune différence ne ressort significative de cette analyse. En effet, il n'y a pas de différence significative entre les groupes prématuré et tout-venant ($F(1,29)=0,756$; $p=0,3392$) ni entre les différentes modalités (NVO-collection, doigts-collection et NVO-photos de doigts) de la tâche « montre-moi » ($F(1.743, 50.54)=1,884$; $p=0,167$). Même constat pour tous les effets d'interaction puisque ni l'interaction entre la modalité de la tâche et la taille de la

collection ($F(1.842, 53.415)=0,97$; $p=0,38$), ni l'interaction entre la modalité de la tâche et le groupe ($F(1.586, 45.995)=0,127$; $p=0,834$), ni l'interaction entre la taille de la collection et le groupe ($F(1,29)=0,645$; $p=0,428$), ni même l'interaction entre ces trois facteurs ($F(1.686, 48.88)=0,195$; $p=0,787$) ne se sont montrées significatives. Seuls les scores entre petites et grandes collections diffèrent significativement au travers de l'échantillon et de toutes les tâches puisqu'il y a un effet significatif du facteur « taille de la collection » ($F(1,29)=12,212$; $p=0,002$).

3. Difficultés de compréhension ou de production des gestes cardinaux (question n°2)

La deuxième question abordée par ce mémoire est la suivante : dans le cadre des activités cardinales, les difficultés rencontrées par les enfants prématurés trouvent-elles leur source dans la formation (et donc la compréhension) des représentations digitales ou dans la production motrice des configurations cardinales au niveau des doigts ? Pour y répondre, les deux groupes (prématuré et tout-venant) ont été comparés sur les tâches « montre-moi NVO-photos de doigts » et « montre-moi NVO-production digitale ». En effet, la modalité NVO-photos de doigts requiert l'accès à la représentation cardinale digitale (sur base de la représentation cardinale verbale) alors que la modalité NVO-production digitale requiert, en plus, l'accès au schéma moteur permettant de produire la configuration digitale attendue.

Pour rappel, les résultats de l'ANOVA précédemment menée sur les trois premières tâches « montre-moi » ne montre pas d'interaction significative entre le groupe (prématuré ou tout-venant) et la modalité de la tâche (comprenant la sous-tâche NVO-photos de doigts) ($F(1.547, 43.315)=0,212$; $p=0,753$) ce qui suggère que les prématurés et les tout-venants n'ont pas obtenus de scores significativement différents dans la modalité NVO-photos de doigts.

En raison de son design un peu différent, la sous-tâche « montre-moi NVO-production digitale » n'a pas été analysée conjointement aux autres sous-tâches « montre-moi », mais au travers d'un autre test statistique. Comme les données à cette tâche se distribuent à nouveau anormalement ($W=0,885$; $p<0,001$), les scores des enfants des deux groupes ont été comparés au moyen d'un test de Wilcoxon pour échantillons appariés. Ce test montre une différence significative ($W=76,5$; $p=0,036$) entre les performances des prématurés ($m=5,767$; $sd=2,897$)

et de leurs homologues tout-venants ($m=7,067$; $sd=2,97$) à la sous-tâche « montre-moi NVO-production digitale ».

4. Impact sur les premières opérations arithmétiques ?

Pour rappel, la littérature montre une influence en cascade de la motricité fine digitale sur le développement de la cardinalité, puis de ce dernier sur l'acquisition des compétences arithmétiques de base (Neveu et al., 2023b). En ce sens, les compétences arithmétiques ont été évaluées dans nos deux groupes au travers d'une tâche de fluences arithmétiques imagées.

Les données issues du test de fluences arithmétiques imagées ne se distribuant pas de façon gaussienne ($W=0,905$; $p<0,001$), c'est le test non-paramétrique de Wilcoxon qui a été choisi pour comparer les scores des deux groupes à cette tâche. Les résultats du test de Wilcoxon ne montrent pas de différence significative entre les enfants nés prématurément ($m=3,5$; $sd=3,093$) et à terme ($m=4,633$; $sd=3,764$) à la tâche de fluences arithmétiques imagées ($W=119,5$; $p=0,251$).

5. Constitution d'un sous-groupe avec difficultés motrices objectives

Dans le cadre de ce mémoire, l'impact des difficultés sensorimotrices fines associées à la prématurité sur le développement des représentations cardinales a été investigué. Peu de nos analyses se sont montrées significatives alors que la littérature met en évidence un lien entre difficultés sensorimotrices fines et développement de la cardinalité (Roesch & Moeller, 2015). Dès lors, dans le but d'approfondir cette question, il a été décidé de restreindre l'échantillon prématuré aux enfants qui présentent objectivement des faiblesses et déficits sur le plan moteur fin.

Si, au niveau de l'échantillon total, les enfants prématurés présentaient, en moyenne, de moins bons scores à l'indice de dextérité motrice de la MABC-2 ($t(29)=-2,11$; $p=0,044$), l'étendue des scores à cet indice place les enfants prématurés entre les percentiles 0,5 et 50, suggérant qu'une certaine partie d'entre eux ne rencontrent, en réalité, pas de difficulté objective sur le plan de la dextérité. En effet, les concepteurs de la MABC-2 (Barnett et al., 2007) proposent de considérer les enfants ayant un score inférieur ou égal au percentile 5 comme rencontrant une difficulté motrice significative (=déficit) et de considérer les enfants ayant un score situé entre

les percentiles 5 et 15 comme à risque de difficulté motrice (=faiblesse). C'est donc sur ce critère qu'un sous-échantillon d'enfants en difficulté sur le plan moteur fin a été extrait.

Ainsi, 15 binômes formés d'enfants prématurés avec difficulté motrice significative ou à risque et de leurs pairs tout-venants ont été constitués. Ce sous-échantillon est composé d'enfants âgés en moyenne de 58,8 mois (min=39 ; max=68). Côté prématurés, ce sont 10 filles et 5 garçons qui le composent ; côté tout-venants, on retrouve 8 filles et 7 garçons. Au sein du sous-groupe d'enfants nés avant-terme, on retrouve 3 prématurités moyennes, 7 grandes prématurités et 4 très grandes prématurités (la donnée manquant pour le 15^{ème} enfant). La distribution du degré de prématurité dans ce sous-échantillon correspond à ce qui est observé au sein de l'échantillon entier.

✓ *Caractéristiques sensorimotrices*

Les enfants des deux groupes de l'échantillon restreint ont été comparés sur les différentes tâches et indices sensorimoteurs du testing, grâce à un test t de Student pour échantillons appariés pour celles se distribuant normalement (tâche de gnosies digitales : $W=0,932$; $p=0,055$ et questionnaire de la MABC-1 : $W=0,944$; $p=0,242$) et à son équivalent non-paramétrique, à savoir le test de Wilcoxon, pour celles se distribuant anormalement (tâche d'imitation de configurations digitales : $W=0,833$; $p<0,001$; tâche de praxies mélokinétiques : $W=0,723$; $p<0,001$ et indice de dextérité motrice : $W=0,89$; $p=0,005$).

Au niveau gnosiologique, les enfants prématurés et tout-venants ne se distinguent pas significativement ($t(14)=-0,063$; $p=0,951$).

Au niveau de la précision motrice fine, la tâche de praxies mélokinétiques ne permet pas de différencier les enfants nés avant-terme et à terme ($W=19$; $p=0,942$). Par contre, comme dans l'échantillon élargi, les enfants prématurés ont obtenu de meilleurs scores ($m=18,067$; $sd=3,515$) que leurs homologues tout-venants ($m=15,6$; $sd=3,481$) en imitation de configurations digitales ($W=81$; $p=0,014$).

Au niveau de l'indice de dextérité manuelle de la MABC-2 (Barnett et al., 2007), sans surprise au vu du critère de construction du sous-échantillon, les enfants prématurés obtiennent des scores inférieurs à ceux des tout-venants ($W=8,5$; $p=0,006$).

Le questionnaire de la MABC-1 (Soppelsa & Albaret, 2004) ne permet pas de différencier les enfants prématurés et nés à terme de l'échantillon restreint sur le plan statistique ($t(6)=-0,062$; $p=0,952$). Cependant, qualitativement, on observe que seuls 10% des enfants tout-venants (soit

1 sujet) sont concernés par la cote de 3 (correspondant à une impossibilité à réaliser la tâche) contre 31% des sujets prématurés (soit 4 enfants) du sous-échantillon. Si on compte, en plus, les abstentions de certains parents comme pouvant refléter une situation à laquelle l'enfant n'a pas été soumis, non pas nécessairement par manque d'occasion mais plutôt parce que ses difficultés ne le lui permettraient probablement pas de l'accomplir, alors il est possible de dégager 6 items comme posant spécifiquement des difficultés aux enfants prématurés ayant des difficultés motrices avérées :

- Prendre de petits objets (pièces de puzzle, perles, cubes)
- Tourner les pages d'un livre, distribuer des feuilles de papier à partir d'un tas
- Utiliser le matériel fixe des cours de récréation ou des gymnases tel que les structures d'escalade, toboggans et balançoires
- Attraper une balle qui s'approche (en rebondissant ou en l'air) avec une main
- Nouer ses lacets, boucler sa ceinture, remonter sa fermeture éclair, boutonner
- Courir pour frapper dans une balle qui s'approche avec une batte/une raquette/un bâton

Il est intéressant de noter que la majeure partie des items semblant poser problème spécifiquement aux enfants prématurés du groupe restreint appartiennent à la section 1 du questionnaire (« enfant immobile et environnement stable ») qui rassemble, en réalité, des tâches motrices fines (à l'inverse d'autres sections qui brassent plutôt la motricité globale).

✓ *Caractéristiques numériques*

Concernant la **litanie**, la partie stable de la chaîne numérique verbale est significativement moins longue chez les enfants prématurés avec difficultés motrices objectives que chez leurs pairs au sein de notre échantillon restreint d'après le test de Wilcoxon pour échantillons appariés ($W=14$; $p=0,017$). De plus, dans ce sous-échantillon, les tout-venants sont significativement plus nombreux à pouvoir atteindre 10 que leurs compères prématurés ($X^2=3,968$; $p=0,046$). En effet, 13 tout-venants sur 15 y parviennent pour seulement 8 prématurés avec difficultés motrices sur 15.

Concernant la maîtrise de la chaîne de **comptage**, les enfants prématurés de l'échantillon restreint obtiennent des scores significativement inférieurs à ceux de leurs homologues tout-venants à la tâche de comptage selon le test comparatif de Wilcoxon pour échantillons appariés ($W=0$; $p=0,021$). Ils atteignent d'ailleurs un niveau significativement moins élaboré de la maîtrise de la chaîne (chaîne chapelet à insécable) que leurs pairs nés à terme (chaîne sécable)

($X^2=11,333$; $p=0,003$). Pour ce qui touche spécifiquement au comptage jusqu'à une borne, les enfants nés à terme maîtrisent plus souvent la compétence que les enfants nés avant-terme de l'échantillon restreint ($X^2=5,4$; $p=0,02$). En effet, la moitié des prématurés avec difficultés motrices s'arrêtent correctement à la borne alors que quasiment tous leurs binômes réussissent la tâche.

Concernant le **dénombrement**, comme dans l'échantillon élargi, les scores des enfants prématurés et nés à terme de l'échantillon restreint ne se différencient pas significativement à la tâche d'après le test de Wilcoxon pour échantillons appariés ($W=34$; $p=0,722$).

Pour l'interprétation des résultats, il sera donc important de rester attentif aux potentiels impacts de la moindre maîtrise de la litanie jusqu'à 10 et du comptage jusqu'à une borne, servant d'appui pour aborder les tâches cardinales, dans le sous-échantillon d'enfants prématurés ayant des difficultés motrices fines objectives.

a) Question 1 : Y a-t-il un impact des difficultés sensorimotrices liées à la prématurité sur le développement des représentations cardinales (verbales et digitales) ?

Tout d'abord, comme dans l'échantillon complet, les tâches « **donne-moi** » ont été utilisées pour déterminer les niveaux de maîtrise de la cardinalité atteints au sein de l'échantillon restreint. A nouveau, les enfants ont été étiquetés « large subset knowers », « small subset knowers » ou « prenumeral subset knowers » en fonction de la taille des ensembles qu'ils ont pu construire (de 4 à 10 éléments, de 1 à 3 éléments ou de même pas 1 élément, respectivement) sur base d'une demande verbale ou digitale.

Comme c'était déjà le cas dans l'échantillon total, les résultats des chi carrés montrent que les enfants prématurés de l'échantillon restreint et leurs binômes n'atteignent pas de niveaux statistiquement différents en modalité verbale ($X^2=1,929$; $p=0,381$) ni en modalité digitale ($X^2=3,916$; $p=0,141$).

	Prenumeral knowers	Small subset knowers	Large subset knowers
Prématurés (modalité verbale)	1	5	9
<i>Prématurés (modalité digitale)</i>	<i>1</i>	<i>7</i>	<i>7</i>
Tout-venants (modalité verbale)	0	3	12
<i>Tout-venants (modalité digitale)</i>	<i>0</i>	<i>3</i>	<i>12</i>

Tableau 4 : Distribution des enfants prématurés et tout-venants de l'échantillon restreint dans les niveaux cardinaux (en modalités verbale et digitale)

Ensuite, les données des deux versions de la tâche « donne-moi » (verbale et digitale) ont été analysées conjointement ainsi que l'ont été les données des tâches « montre-moi » NVO-collection, doigts-collection et NVO-photos de doigts. Avant de développer ces analyses, il est à noter que les données de l'échantillon restreint ne se distribuent, à nouveau, pas selon une courbe normale dans les deux sous-tâches « donne-moi » (verbale : $W=0,822$; $p<0,001$; digitale : $W=0,843$; $p<0,001$) ni dans les sous-tâches « montre-moi » d'intérêt (NVO-collection : $W=0,892$; $p=0,005$; doigts-collection : $W=0,898$; $p=0,007$; NVO-photos de doigts : $W=0,906$; $p=0,012$).

Dans l'échantillon restreint comme dans l'échantillon total, les scores des enfants prématurés ont été comparés à ceux de leurs pairs dans les deux modalités de la tâche « **donne-moi** » (verbale et digitale), au travers d'une ANOVA à mesures répétées paramétrique (jugée suffisamment robuste). Les résultats de l'analyse menée sur le sous-échantillon « difficultés motrices objectives » mènent aux mêmes conclusions que ceux menés sur l'échantillon total : aucun des trois effets n'est significatif (effet groupe : $F(1,14)=4,409$; $p=0,054$; effet modalité : $F(1,14)=0,957$; $p=0,344$; effet d'interaction : $F(1,14)=0,029$; $p=0,868$). A nouveau, l'absence d'effet du groupe colle avec les résultats obtenus par les chi carrés développés ci-dessus.

Concernant les tâches « **montre-moi** », le même schéma d'ANOVA à mesures répétées à deux facteurs a été dressé : groupe (prématuré ou tout-venant) x modalité (NVO-collection, doigts-collection ou NVO-photos de doigts). La version paramétrique a à nouveau été choisie en dépit de la non-normalité des données, en raison de sa robustesse (Blanca et al., 2017 ; Blanca et al., 2023). Les résultats de l'analyse menée sur le sous-échantillon avec difficultés motrices objectives confirment ceux obtenus sur l'échantillon total : aucun effet ne ressort significatif (effet groupe : $F(1,14)=0,289$; $p=0,6$; effet tâche : $F(2,28)=2,188$; $p=0,131$ et effet d'interaction : $F(2,28)=0,157$; $p=0,855$).

La taille de la collection à traiter ne modifie, à nouveau, pas les relations observées (effet de la modalité : $F(2,28)=1,746$; $p=0,193$; effet du groupe : $F(1,14)=0,644$; $p=0,436$; effet de la taille de la collection : $F(1,14)=3,066$; $p=0,102$; interaction modalité*groupe : $F(2,28)=0,59$; $p=0,561$; interaction modalité*taille de la collection : $F(2,28)=0,067$; $p=0,935$; interaction groupe*taille de la collection : $F(1,14)=0,262$; $p=0,617$; interaction groupe*modalité*taille de la collection : $F(2,28)=1,61$; $p=0,218$).

b) Les difficultés des enfants prématurés dans les activités cardinales sont-elles de l'ordre de la compréhension ou de la production des gestes cardinaux ?

Comme démontré par l'ANOVA susmentionnée, il n'y a pas d'interaction significative entre le groupe et la modalité de la tâche « montre-moi » (parmi les trois modalités testées) dans l'échantillon restreint ($F(2,28)=0,157$; $p=0,855$). Cela signifie, entre autres, que les prématurés n'ont pas de résultats significativement inférieurs à leurs pairs du groupe contrôle dans la sous-tâche « montre-moi NVO-photos de doigts ».

Concernant la tâche « montre-moi NVO-production digitale » (dont les données ne se distribuent pas normalement : $W=0,865$; $p<0,001$), le test de Wilcoxon mené au sein du sous-échantillon montre une différence significative ($W=5$; $p=0,008$) entre les scores des enfants prématurés avec difficultés motrices objectives ($m=5,667$; $sd=2,92$) et ceux de leurs pairs ($m=8$; $sd=2,726$).

c) Y a-t-il un impact en cascade sur le développement arithmétique ?

Concernant la tâche de fluences arithmétiques imagées, les scores des enfants prématurés rencontrant des difficultés motrices objectives ont été comparés à ceux de leurs homologues tout-venants au travers d'un test t de Student pour échantillons appariés (la distribution des données étant normale : $W=0,955$; $p=0,232$). Les résultats ne montrent pas de différence significative ($t(14)=-0,815$; $p=0,429$) entre les deux groupes (prématurés : $m=4,133$; $sd=2,875$; tout-venants : $m=5,133$; $sd=3,399$), comme c'était déjà le cas dans l'échantillon total.

VI. INTERPRÉTATION ET DISCUSSION

Au travers de ce mémoire, la question était de savoir si les difficultés sensorimotrices liées à la prématurité avaient un impact sur la construction des représentations cardinales (verbales et digitales) et/ou sur le recrutement des schémas moteurs nécessaires à la production des gestes cardinaux. Pour ce faire, des épreuves cardinales dont certaines faisaient intervenir les doigts (en reconnaissance ou en production) et d'autres non, ont été administrées à 30 enfants nés prématurément (entre 25 et 34 semaines de grossesse) et âgés de 3 à 5 ans. Un groupe contrôle a été recruté et se constitue de 30 enfants nés à terme (>37 semaines de grossesse) appariés aux enfants prématurés sur base de l'âge chronologique (au mois près).

La première question abordée au travers de ce mémoire interrogeait l'impact des difficultés sensorimotrices fines associées à la prématurité sur le développement des représentations cardinales (verbales et digitales). Dans ce cadre, l'hypothèse principale était que les sujets prématurés obtiendraient de moins bons scores que leurs pairs aux tâches cardinales impliquant les doigts comme aux tâches ne les impliquant pas. Les analyses statistiques n'ont pas permis de confirmer cette hypothèse. En effet, les sujets des deux groupes n'ont pas obtenu de scores statistiquement différents à la tâche « donne-moi », que ce soit en modalité verbale ou en modalité digitale. Ils ne se différencient pas non plus de façon significative aux tâches « montre-moi » qui font intervenir les représentations cardinales verbales (NVO-collection), digitales (doigts-collection) ou les deux (NVO-photos de doigts). Ces résultats suggèrent que, malgré les difficultés sensorimotrices liées à leur naissance précoce, les enfants prématurés parviennent à construire des représentations cardinales sur base des NVO et sur base des configurations digitales, comme le font les enfants nés à terme.

La seconde question abordée était la suivante : dans le cadre des activités cardinales, les difficultés rencontrées par les enfants prématurés trouvent-elles leur source dans la formation (et donc la compréhension) des représentations digitales ou dans la production motrice des configurations canoniques au niveau des doigts ? Dans le cadre de cette question, les hypothèses plaident tant en faveur de difficultés dans la formation des représentations qu'en faveur de difficultés d'exécution motrice pour la production des configurations. Si les analyses montrent effectivement que les sujets prématurés de l'échantillon ont obtenu de moins bons scores que leurs pairs nés à terme à la tâche « montre-moi NVO-production digitale », ce n'est pas le cas à la tâche « montre-moi NVO-photos de doigts » où les deux groupes ne se différencient pas significativement. Cela suggère que les sujets prématurés de notre échantillon rencontrent des

difficultés d'application du schéma moteur permettant la production des configurations digitales canoniques mais pas de difficultés de construction des représentations cardinales basées sur les doigts (ni de difficultés d'accès à celles-ci).

En résumé, les résultats montrent que les sujets prématurés de notre échantillon parviennent à construire (et à mobiliser) des représentations cardinales basées sur les NVO ainsi que des représentations cardinales basées sur les doigts, comme les enfants nés à terme. En revanche, ils se trouvent en difficulté lorsqu'il s'agit d'exécuter le schéma moteur nécessaire à la production des configurations canoniques sur leurs doigts.

Les difficultés de production motrice des gestes cardinaux étaient attendues en regard de la littérature puisque ces gestes sont connus pour recruter les compétences motrices fines et gnosiques (Fisher et al., 2022), compétences démontrées comme étant une faiblesse des enfants prématurés (Bos et al., 2013 ; Marlow et al., 2007 ; Niutanen et al., 2022 ; Vermeulen et al., 2022). En revanche, nous nous attendions également à ce que les prématurés de notre échantillon aient des difficultés de construction des représentations cardinales, tant basées sur les NVO que sur les doigts. Ces hypothèses avaient, en effet, été émises sur base du fait que les difficultés sensorimotrices digitales sont monnaie courante dans cette population (Bos et al., 2013 ; Marlow et al., 2007 ; Niutanen et al., 2022 ; Vermeulen et al., 2022) alors même qu'il existe des données en faveur d'une relation entre compétences motrices fines et performances aux tâches cardinales impliquant les doigts ou non, chez l'enfant tout-venant (Fisher et al., 2022 ; Neveu et al., 2023b). D'après ces données, le caractère à la fois iconique et symbolique des doigts constitue à la fois un tremplin vers la construction de représentations holistiques des configurations digitales canoniques et vers l'acquisition des symboles cardinaux verbaux (Gunderson et al., 2015 ; Roesch & Moeller, 2015). L'absence de différence significative entre nos deux groupes (prématurés et tout-venants) aux tâches sollicitant l'accès aux représentations cardinales construites (verbales et digitales) est encourageante sur le plan clinique puisqu'elle indique que nos sujets prématurés, malgré leurs difficultés sensorimotrices, ont pu bénéficier de l'outil que constituent les doigts pour construire leurs représentations cardinales. Cependant, ces résultats viennent s'opposer aux données issues de la littérature, y compris au seul article ayant abordé ce lien au sein de la population prématurée (Tatsuoka et al., 2016).

1. Impact des difficultés sensorimotrices liées à la prématurité sur la construction des représentations cardinales

a) Difficultés sensorimotrices ?

Face à ces résultats inattendus et discordants avec la littérature, le présupposé de base de nos hypothèses selon lequel nos sujets prématurés rencontreraient des difficultés sur le plan sensorimoteur a été remis en question.

Effectivement, même s'ils obtiennent un indice de dextérité significativement plus faible que leurs pairs nés à terme, les prématurés ne s'en différencient pas significativement sur les autres tâches sensorimotrices proposées (gnosies digitales, praxies mélokinétique, questionnaire de la MABC-1). Ils obtiennent même des scores plus élevés que les tout-venants en imitation de configurations digitales. Toutefois, ces tâches manquent nettement de sensibilité.

D'une part, on observe un effet plafond marqué dans les tâches de précision motrice fine. En effet, à la tâche de praxies mélokinétiques, seuls 7 sujets (soit 11% de l'échantillon total) des sujets obtiennent un score inférieur à 2 (sur 6) alors que près de la moitié des sujets atteignent 5 ou 6. Même constat pour la tâche d'imitation de configurations digitales (pour laquelle le score maximal est de 20) : la moyenne est de 16,08 avec un écart-type de 3,39. Qualitativement, un seul sujet obtient un score inférieur à 9 alors que la moitié d'entre eux atteignent 17 ou plus. La tâche semble donc trop facile pour permettre de détecter les enfants ayant des difficultés motrices, et ce même auprès des enfants les plus jeunes de l'échantillon dont certains atteignent déjà les scores maximaux. Le peu d'items contenus dans chacune des tâches (6 pour la tâche de praxies mélokinétiques et 20 pour la tâche d'imitation de configurations manuelles) n'aide pas non plus à leur sensibilité.

D'autre part, la sensibilité de la tâche évaluant lesgnosies digitales est, elle aussi, questionnable. Niutanen et al. (2022) admettent déjà que leur tâche d'identification de doigts était complexe pour tous leurs sujets (prématurés ou non). Il se peut donc que les sujets ici recrutés, plus jeunes, aient également tous été en difficulté indépendamment du groupe. Effectivement, bien qu'aucun effet plancher ne soit détecté, aucun sujet n'a obtenu une note supérieure à 16/20 et une majorité d'entre eux ont obtenu un score entre 7 et 13, indiquant une difficulté à identifier l'entièreté des doigts des deux mains de façon exacte au travers des deux groupes chez les 3-5 ans. Autrement dit, le design de la tâche degnosies digitales ne permet peut-être pas de distinguer les enfants prématurés des enfants nés à terme sur le plan de la sensorialité digitale à un si jeune âge.

A l'inverse, les scores à l'indice de dextérité de la MABC-2 n'ont pas été touchés par ces effets puisqu'il s'agit d'un outil connu pour sa validité et sa sensibilité (Barnett et al., 2007).

Dans l'optique de s'assurer que le présupposé selon lequel les prématurés comparés aux enfants tout-venants dans ce mémoire avaient bel et bien des difficultés sensorimotrices, un sous-groupe de 15 sujets prématurés présentant objectivement des déficits ou faiblesses de dextérité ($\leq P15$ à l'indice de dextérité motrice de la MABC-2) a été identifié. Les analyses ont été relancées sur ce sous-groupe (et leurs binômes tout-venants). Les résultats des statistiques menées sur ce sous-groupe ne diffèrent cependant pas de ceux obtenus avec l'échantillon total. Autrement dit, dans notre échantillon, même les sujets prématurés présentant objectivement des difficultés motrices fines parviennent à construire des représentations cardinales verbales et digitales leur permettant de reconnaître les symboles que sont les NVO et les configurations digitales canoniques. Plusieurs pistes pourraient expliquer ces résultats inattendus.

Premièrement, il se pourrait que les prématurés inclus dans notre échantillon (total et restreint) ne soient pas représentatifs de la population prématurée sur le plan sensorimoteur. En effet, nos sujets ont été recrutés directement via le listing du Centre de Suivi des Anciens Prématurés de la Citadelle de Liège. Dès lors, il est possible que les parents ayant répondu à l'appel soient ceux qui se sentent les plus concernés et accordent une plus grande importance au suivi paramédical à long terme de leur enfant né prématurément. En ce sens, il est probable que leurs enfants fassent également partie de ceux qui bénéficient de suivis en dehors des consultations sporadiques du CHR de la Citadelle, notamment en kinésithérapie, où leurs compétences sensorimotrices fines pourraient avoir été prises en soins et s'être améliorées (dans une moindre mesure pour les compétences de dextérité, qui demeurent inférieures à celles des enfants nés à terme). Autrement dit, il est possible que les données recueillies subissent un biais d'échantillonnage et que les compétences motrices fines des enfants de notre groupe « prématurés » (même restreint) ne soient pas représentatives de celles des enfants nés avant-terme en général.

S'il est possible que les difficultés sensorimotrices des prématurés de notre échantillon ne soient pas aussi massives que celles des prématurés en général, il se pourrait aussi que les difficultés sensorimotrices rencontrées par la population prématurée ne soient pas suffisamment importantes pour engendrer un impact significatif sur la construction des représentations cardinales. En effet, bien que les faiblesses sensorimotrices fassent partie du tableau de la prématurité, elles peuvent apparaître assez subtiles et légères (Bolk et al., 2018 ; Moreira et al., 2014). Des difficultés aussi subtiles n'empêcheraient pas les enfants prématurés de bénéficier

d'un ancrage corporel (digital) dans le développement et la structuration de leurs représentations cardinales, comme le font les enfants nés à terme (Oudgenoeg-Paz et al., 2017). En d'autres termes, la forme intermédiaire que constituent les doigts profiterait aux enfants prématurés malgré leurs difficultés subtiles sur le plan sensorimoteur : les doigts leur permettraient quand même de faire l'expérience concrète de la numérosité (du fait de leur caractère iconique) tout en encodant une représentation conventionnelle de la numérosité (du fait de leur caractère abstrait), comme c'est le cas chez les enfants tout-venants (Roesch & Moeller, 2015). Ces difficultés subtiles se marqueraient, en revanche, dans la production des gestes cardinaux. Cette nouvelle hypothèse semble aller à contre-courant des données actuelles sur le développement numérique des enfants prématurés en lien avec les doigts. Toutefois, le peu d'études s'étant penchées sur cette thématique l'ont envisagée dans le cadre de la grande voire de la très grande prématurité (Adrian et al., 2020 ; Clayton et al., 2022 ; Hasler & Akshoomoff, 2019). Pourtant, ces degrés de prématurité ne représentent que 15% des enfants nés avant-terme (OMS, 2018) et sont associés à des tableaux moteurs plus lourds (Torchin et al., 2015). En ce sens, dans ce mémoire ayant recruté des enfants prématurés de tous degrés, il aurait été intéressant de comparer les enfants moyens, grands et très grands prématurés.

Une autre piste pour expliquer que les faiblesses en dextérité de nos sujets prématurés n'aient pas eu d'impact significatif sur la construction de leurs représentations cardinales serait d'admettre que ce sont plutôt les aspects gnosiques et de précision motrice fine (similaires dans nos deux groupes) qui contribuent au développement de celles-ci. Ces suppositions viennent cependant à l'encontre des quelques recherches ayant investigué le lien entre compétences numériques et sensorimotricité digitale dans la prématurité. En effet, celles-ci montrent presque toutes un lien entre dextérité et compétences numériques (Adrian et al., 2020 ; Clayton et al., 2022 ; Hasler & Akshoomoff, 2019 ; Marlow et al., 2007), chez de grands prématurés, alors que les données sur la sensorialité et la précision motrice fine digitales sont plus rares. Toutefois, de façon générale, les données de la littérature scientifique sont peu fournies concernant les aspects sensorimoteurs spécifiques contribuant au développement des représentations cardinales, d'autant plus dans le cadre de la prématurité, cette piste n'est donc pas à exclure.

Enfin, une dernière piste pour expliquer que nos sujets prématurés ne se soient pas différenciés significativement de nos sujets tout-venants dans les tâches nécessitant l'interprétation de symboles numériques digitaux et verbaux oraux malgré leurs faiblesses en dextérité serait d'admettre que le caractère iconique des doigts n'aide pas les enfants (prématurés ou non) à

faire le lien entre numérosité et représentations numériques symboliques, comme le suggéraient Nicoladis et al. (2010) bien qu'il ne s'agisse pas de la vision dominante dans la littérature actuelle.

b) Design des tâches cardinales

L'absence de différence significative entre nos deux groupes (prématurés et tout-venants) aux tâches de notre testing sollicitant l'accès aux représentations cardinales construites (verbales et digitales) pose également la question du design de ces tâches expérimentales administrées.

La plus grande limite méthodologique identifiée aux tâches cardinales du testing tient dans le fait que certaines peuvent tout à fait être réussies en mobilisant d'autres compétences que celles que nous souhaitons observer (à savoir le recrutement des représentations cardinales).

En effet, si le but des tâches « montre-moi » impliquant des représentations digitales (doigts-collection et NVO-photos de doigts) et de la tâche « donne-moi » en version digitale est d'évaluer la représentation cardinale basée sur la configuration digitale, il a qualitativement été constaté qu'un certain nombre d'enfants dénombrent les doigts levés (se basant ainsi sur leurs propriétés iconiques plutôt que symboliques). Ce faisant, ils peuvent tout à fait réussir la tâche sans accéder à une représentation numérique basée sur la configuration manuelle conventionnelle et symbolique mais en se basant simplement sur leurs compétences en dénombrement (pour lesquelles il n'y a pas de différences significatives observées entre les groupes dans notre échantillon). Pour éviter cela, il aurait été intéressant de présenter les configurations digitales pendant un délai restreint à quelques secondes (empêchant le dénombrement) ou de relever les stratégies utilisées par chaque enfant au cours de la tâche.

Dans ces mêmes tâches, pour les configurations représentant de petits ensembles (≤ 4), il est possible que la réussite des enfants ait reposé sur leurs compétences de subitizing et non sur l'accès à la représentation holistique véhiculée par le pattern de doigts. En effet, les analyses montrent qu'au travers des deux groupes et dans toutes les modalités des tâches « montre-moi » testées (NVO-collection, doigts-collection et NVO-photos de doigts), la taille de la collection influence le score des sujets : tous ont de meilleures performances lorsqu'il s'agit de traiter de petites collections. Cela pourrait refléter une tendance à traiter la collection (notamment de doigts) par le subitizing lorsque c'est possible. Toutefois, cela pourrait aussi plaider en faveur de l'utilisation du dénombrement (comme envisagé ci-dessus) puisque celui-ci est généralement plus automatisé pour les collections plus petites, engendrant moins de risques

d'erreurs. Enfin, cela pourrait suggérer une construction progressive des représentations cardinales (digitales comme verbales), les plus petites numérosités ayant été associées à une représentation symbolique là où ce n'est pas encore le cas des plus grandes, ce qui coïnciderait aussi avec la littérature actuelle (Rousselle & Vossius, 2021). A nouveau, il aurait été intéressant de recueillir des informations sur les stratégies employées par les sujets au cours des tâches et de relever leurs temps de réponse afin de peut-être voir apparaître des différences entre nos sujets prématurés et leurs binômes contrôles.

Toujours au niveau du design, les deux tâches « donne-moi » et la tâche « montre-moi » en modalité NVO-production digitale sont construites de sorte que lorsque le sujet parvient à donner/montrer la collection correspondant à la valeur n , alors, la valeur $n+1$ lui est demandée et ainsi de suite jusqu'à ce que l'enfant échoue (auquel cas la valeur $n-1$ lui est demandée) ou atteigne le dernier item (Le Corre & Carey, 2007). Lors des testings, de nombreux enfants ont semblé avoir compris très rapidement qu'à chaque item des tâches « donne-moi », ils devaient donner une fleur de plus qu'à l'item précédent (les plus impulsifs d'entre eux ne permettant même pas la remise en place des pions fleurs et prenant simplement, d'avance, un pion fleur à ajouter à leur collection déjà construite). Même constat pour la tâche « montre-moi » NVO-production digitale, au cours de laquelle de nombreux enfants ont rapidement compris qu'il leur suffisait de lever un doigt de plus à chaque item. Le fait de comprendre que, pour chaque nombre n représentant une valeur cardinale, le nombre qui suit dans la chaîne numérique représente le cardinal de valeur $n+1$, est appelé « fonction de succession » (Le Corre & Carey, 2007). Les premières données sur le sujet tendaient à montrer que les enfants qui maîtrisaient le principe cardinal (pour 5 et 6) maîtrisaient également la fonction de succession (sur ces nombres) (Sarnecka & Carey, 2008). Davidson et al. (2012) ont cependant modéré ces propos en suggérant que la fonction de succession se veut quand même moins robuste pour de plus grands nombres (comme 25) chez les enfants maîtrisant pourtant la valeur cardinale de ceux-ci. Plus récemment, Spaepen et al. (2018) ont même démontré que les enfants peuvent apprendre le principe cardinal sans comprendre la fonction de succession mais qu'ils doivent accéder au principe cardinal avant de pouvoir développer la fonction de succession. Comme la fonction de succession semble se développer progressivement, un pas derrière la compréhension de la cardinalité, il se pourrait que les enfants de notre échantillon ayant accès à cette fonction pour les petits nombres aient pu comprendre grâce aux premiers items qu'il leur suffisait à chaque fois d'ajouter une fleur ou de lever un doigt supplémentaire, sans même plus prendre en considération la numérosité demandée dans la consigne. Autrement dit, le design de

ces tâches aurait pu inciter les enfants maîtrisant la fonction de succession sur les plus petits items à ne plus traiter les NVO ou configurations digitales présentées par l'expérimentateur mais simplement à ajouter un élément à leur collection (ou un doigt à leur configuration) à chaque item.

Enfin, les tâches « montre-moi » NVO-collection, doigts-collection et NVO-photos de doigts reposent sur un choix de l'enfant parmi deux propositions (la cible et un distracteur). Face à deux propositions, la probabilité de trouver la bonne réponse est de 50% à chaque item. Ce design laisse donc place à une grande probabilité de réussite par hasard. Pour minimiser ce risque, il aurait été intéressant d'inclure plus de distracteurs parmi les propositions (bien qu'un tel ajout aurait pu contribuer à allonger considérablement le temps passé sur ces tâches pour les enfants basant leur réponse sur un dénombrement peu automatisé).

En résumé, il est possible que nos tâches expérimentales n'aient pas pu mesurer spécifiquement la variable d'intérêt, à savoir l'utilisation des représentations cardinales (notamment digitales) et manquent donc de validité de contenu. En effet, au cours de ces tâches, il se peut que les enfants des deux groupes se soient appuyés sur d'autres compétences que la cardinalité, comme le dénombrement, le subitizing ou la fonction de succession, voire même sur une part de hasard, pour réussir les tâches.

c) Âge des sujets

Un autre élément qui pourrait expliquer l'absence de différence entre les deux groupes (prématurés et tout-venants) aux tâches évaluant la construction des représentations cardinales (verbales et digitales) pourrait être l'âge de nos sujets.

Pour rappel, les sujets composant notre échantillon sont âgés de 3 à 5 ans. Par ailleurs, la littérature actuelle montre que l'acquisition des représentations cardinales est progressive (se poursuivant a minima jusqu'à 6 ans) et suit une séquence développementale très variable d'un enfant à l'autre (Rousselle & Vossius, 2021). Il n'est donc pas impossible que nos sujets, en début ou en cours d'acquisition du principe cardinal, ne démontrent pas encore de préférence pour les configurations digitales par rapport au NVO. Si nos sujets sont trop jeunes pour démontrer un attrait spécifique pour l'outil que constituent les doigts, alors il se peut qu'ils ne bénéficient pas encore de son effet tremplin pour appuyer le développement de leurs représentations cardinales digitales et, en cascade, verbales tel que décrit par la littérature

(Gunderson et al., 2015 ; Roesch & Moeller, 2015). N'utilisant donc pas encore préférentiellement les doigts, l'impact des faiblesses sensorimotrices digitales liées à la prématurité n'aura donc pas pu être observé.

Autrement dit, il est possible que tous nos sujets, prématurés ou non, soient trop jeunes pour favoriser l'outil que constituent les doigts dans les activités cardinales, rendant impossible l'analyse de l'influence de ceux-ci dans la construction des représentations (digitales et verbales) au sein de nos différents groupes. L'absence de différence entre nos deux groupes ne reflèterait dès lors pas que tous bénéficient pareillement des doigts pour appuyer le développement de leurs représentations cardinales mais plutôt qu'aucun n'ait encore pu en bénéficier pleinement (même pas les enfants tout-venants).

2. Difficultés au niveau des représentations cardinales (compréhension) et/ou de production des gestes cardinaux chez les prématurés ?

Là où les résultats n'ont pas montré de différence significative entre les deux groupes dans la construction des représentations cardinales digitales, ils mettent, en revanche, en évidence que les prématurés obtiennent de moins bons scores que leurs pairs nés à terme lorsqu'il s'agit de produire les gestes cardinaux. Ces données suggèrent que les enfants nés prématurément, entre 3 et 5 ans, parviennent à construire des représentations cardinales digitales (puis à y accéder pour les comprendre) comme les enfants nés à terme mais que le recrutement des schémas moteurs nécessaires à la production des configurations digitales canoniques est plus complexe pour eux que pour leurs pairs.

Comme abordé largement dans le début de cette discussion, les résultats concernant la construction des représentations cardinales digitales n'étaient pas attendus en regard de nos hypothèses. Par contre, il était effectivement attendu qu'en raison des difficultés sensorimotrices inhérentes au tableau de la prématurité (Bos et al., 2013 ; Marlow et al., 2007 ; Niutanen et al., 2022 ; Vermeulen et al., 2022) et du caractère sensorimoteur de la production des gestes cardinaux (Fisher et al., 2022 ; Neveu et al., 2023b), les sujets prématurés démontreraient de moins bonnes performances que les sujets nés à terme à la tâche « montre-moi NVO-production digitale ». Malgré tout, plusieurs éléments viennent nuancer les conclusions apportées à ces résultats.

Tout d'abord, la part de ces résultats imputable aux difficultés sensorimotrices des prématurés est questionnable. Premièrement parce que les analyses mènent aux mêmes conclusions dans l'échantillon total et dans l'échantillon restreint aux enfants prématurés présentant des difficultés motrices objectives. Cela suggère que les enfants ne présentant pas de difficultés motrices objectives sont aussi en difficulté pour produire les gestes cardinaux statiques que ceux qui se situent dans la norme faible ou sous les normes aux tâches de dextérité. Deuxièmement parce que, dans l'échantillon restreint comme dans l'échantillon total, les enfants prématurés n'ont démontré des performances inférieures à celles de leurs pairs que sur les tâches de dextérité (et non sur les tâches sensorimotrices évaluant plutôt la précision motrice fine et les gnosies digitales). Cela suggérerait que l'impact sensorimoteur de la prématurité sur la production des gestes cardinaux statiques tiendrait surtout dans les compétences de dextérité, or, cela ne colle pas avec les données récentes de Fisher et al. (2022). Ces auteurs ont, en effet, plutôt avancé que montrer un nombre sur ses doigts était associé aux gnosies digitales et non aux performances dans les tâches motrices digitales (de dextérité et précision motrice fine). Pour eux, les compétences motrices digitales sont plutôt associées aux gestes cardinaux dynamiques (qui passent par le comptage sur les doigts). Dans ce mémoire, la production des gestes cardinaux dynamiques n'a pas été évaluée en complément de celle des gestes cardinaux statiques. Il aurait pourtant été intéressant de le faire, en proposant une tâche « montre-moi » supplémentaire (ayant pour consigne « montre-moi *NVO* en comptant sur tes doigts. »).

Néanmoins, il est également possible que les enfants prématurés présentent de subtiles difficultés sur les autres aspects sensorimoteurs que sont les gnosies digitales et la précision motrice fine mais que celles-ci n'aient pas pu être détectées par les tâches administrées, jugées trop peu sensibles comme abordé précédemment. Dans ce cas, les faiblesses de dextérité des prématurés pourraient ne pas être les seules à contribuer aux difficultés de production des gestes cardinaux.

Ensuite, si on considère que les faiblesses de dextérité contribuent effectivement à entraver la production des gestes cardinaux chez les prématurés et que, d'autre part, nous savons que les compétences motrices se développent progressivement au cours de l'enfance, alors, il aurait peut-être été intéressant de comparer nos prématurés à des enfants tout-venants non pas de même âge chronologique mais de même âge corrigé. De cette façon, nous aurions pu isoler l'effet des quelques semaines/mois de vie en moins et nous centrer sur les aspects purement moteurs liés à la prématurité. En effet, Restiffe & Gherpelli (2006) ont montré que les âges chronologiques et corrigés ne mènent pas aux mêmes interprétations des scores moteurs avant

1 an. Toutefois, ils ont également montré qu'à partir de 30 mois les scores standards moyens aux échelles motrices ne diffèrent plus significativement, que l'on se base sur l'âge chronologique ou corrigé, suggérant qu'il n'est plus nécessaire de corriger l'âge dès 2 ans et demi dans ce domaine. Dès lors, il est probable que l'appariement sur base de l'âge corrigé de nos sujets âgés de 3 à 5 ans n'aurait, en réalité, pas modifié nos résultats.

Enfin, la différence observée entre prématurés et tout-venants à la tâche « montre-moi NVO-production digitale » mais pas à la tâche « montre-moi NVO-photos de doigts » pourrait s'expliquer par d'autres facteurs que les moins bonnes performances de dextérité des prématurés. Pour entrer en matière, rappelons que la modalité NVO-photos de doigts implique une reconnaissance alors que la modalité NVO-production digitale implique, comme son nom l'indique, une production. Par définition, la seconde est donc plus coûteuse en énergie et plus complexe que la première. Plus spécifiquement, en plus de sa composante motrice, la version NVO-production digitale requiert d'autres aspects connus pour être plus fragiles dans le cadre de la prématurité : son format demande de faire intervenir des compétences visuospatiales, qui leur posent fréquemment des difficultés (Butcher et al., 2012) et sa complexité alourdit la charge en mémoire de travail qui constitue déjà un de leurs points faibles entre 3 et 5 ans (Arpi et al., 2019 ; van Houdt et al., 2019).

En résumé, il est possible que les différences entre les enfants prématurés et tout-venants à la tâche « montre-moi NVO-production digitale » ne soient pas pleinement imputables à des difficultés sensorimotrices, notamment de dextérité, mais aussi à d'autres facteurs, peut-être cognitifs (comme la mémoire de travail ou les compétences visuospatiales).

3. Effet en cascade sur les compétences arithmétiques précoces ?

Pour rappel, Neveu et al. (2023b) ont mis en évidence que les compétences motrices fines au niveau des doigts impactent le développement cardinal qui, à son tour, contribue à l'acquisition des compétences arithmétiques. Comme nous avons émis l'hypothèse de difficultés dans la construction des représentations cardinales en raison de faiblesses sensorimotrices chez les sujets prématurés, une tâche de fluences arithmétiques avait été incluse dans le protocole. Cette tâche avait pour but de tester la cascade décrite par Neveu et al. (2023b) dans notre échantillon prématuré.

Toutefois, à l'inverse de ceux de Neveu et al. (2023b), nos résultats n'ont pas montré de difficultés particulières dans la construction des représentations cardinales (verbales et digitales) chez les prématurés (supposément plus faibles au niveau de la motricité fine). En ce sens, il est assez logique que l'effet en cascade sur les compétences arithmétiques n'ait pas pu être observé, nos deux groupes (prématurés et tout-venants) ne se distinguant pas de façon significative à la tâche de fluences arithmétiques.

Nous pouvons néanmoins ajouter que les difficultés des prématurés dans la production des gestes cardinaux statiques ne semblent pas impacter le développement des premières opérations arithmétiques, alors qu'ils constituent une stratégie fréquente pour représenter les opérands à manipuler (Baroody, 1987 ; Neveu et al., 2023a ; Roesch & Moeller, 2015). Cela pourrait sous-entendre qu'ils se basent sur d'autres stratégies pour entrer dans l'arithmétique. En ce sens, il aurait été intéressant d'analyser les méthodes utilisées par les enfants des deux groupes pour résoudre les opérations proposées (récupération directe de la réponse en mémoire, utilisation des doigts ou manipulation des jetons).

4. Conclusions

En conclusion, ce mémoire investiguait l'effet de la prématurité sur le développement cardinal d'enfants d'âge préscolaire. Plus spécifiquement, il avait pour objectif de répondre aux deux questions suivantes :

- Les difficultés sensorimotrices fines associées à la prématurité ont-elles un impact sur la construction des représentations cardinales (verbales et digitales) ?
- Dans le cadre des activités cardinales, les difficultés rencontrées par les enfants prématurés trouvent-elles leur source dans la formation (et donc la compréhension) des représentations digitales et/ou dans la production motrice des configurations cardinales au niveau des doigts ?

Pour y répondre, diverses tâches cardinales ont été administrées à des sujets prématurés âgés de 3 à 5 ans et à des sujets contrôles appariés en âge chronologique.

Les résultats montrent que les enfants prématurés de notre échantillon (y compris ceux présentant des difficultés motrices objectives) n'ont pas obtenu de scores significativement inférieurs à ceux de leurs pairs aux tâches cardinales recrutant les représentations verbales et/ou digitales. Cela suggère qu'ils ne rencontrent pas plus de difficultés que leurs pairs nés à terme

dans la construction des représentations cardinales verbales ni digitales, contrairement à ce qui était attendu en regard de nos hypothèses.

En revanche, les prématurés de notre échantillon ont obtenu de moins bons scores que leurs pairs nés à terme dans la tâche faisant intervenir la production des gestes cardinaux statiques. Cela indique que, même s'ils semblent construire et comprendre les représentations cardinales basées sur les doigts, ils se trouvent en difficulté lorsqu'il s'agit de faire appel au schéma moteur nécessaire à la production des gestes cardinaux statiques.

A l'exception des difficultés observées chez nos sujets prématurés dans le cadre de la production des gestes cardinaux, les résultats obtenus dans ce mémoire ne correspondent pas à ce qui était attendu en regard de la littérature. Même si plusieurs limites précédemment abordées pourraient, en partie, expliquer ces discordances, il est également important de rappeler que peu d'équipes de recherche se sont penchées sur le rôle spécifique des différentes compétences sensorimotrices sur le développement des représentations cardinales, encore moins au sein de la population prématurée. Dès lors, ce mémoire s'inscrit dans le domaine en pleine expansion qu'est la cognition numérique. Ce domaine pourrait continuer à se dessiner et se préciser dans les années à venir, apportant des informations complémentaires qui permettraient de nuancer l'interprétation des résultats ici obtenus.

5. Perspectives futures

Comme mentionné à plusieurs reprises au cours de ce mémoire, le développement cardinal a très peu été étudié au sein de la population prématurée, et encore moins dans sa relation avec la sensorimotricité digitale (seulement envisagé par Tatsuoka et al., 2016). Dès lors, dans le futur, il semble crucial d'investiguer le développement de la cardinalité au sein de la population prématurée, en lien avec les doigts mais aussi avec d'autres aspects cognitifs dont on sait qu'ils interviennent dans la construction de la cognition numérique (comme la mémoire de travail ou les aspects visuospatiaux). Afin de pouvoir en tirer des données robustes, il pourrait être intéressant de mener ces études sur des échantillons plus larges que celui ici recruté (ne contenant finalement que 30 sujets dans chaque groupe).

En parallèle, pour pouvoir étudier l'impact des difficultés sensorimotrices liées à la prématurité sur le développement cardinal, il semble important de spécifier le profil des enfants prématurés sur les différentes composantes sensorimotrices digitales connues pour jouer un rôle dans le

développement numérique (notamment cardinal) au travers de tâches plus sensibles. Il pourrait notamment être intéressant d'envisager l'outil 3D pour analyser les mouvements digitaux des enfants prématurés lors de tâches de dextérité et de précision motrice fine. En effet, l'outil 3D (récemment utilisé avec des enfants dyscalculiques dans le cadre d'études menées à Liège) a démontré une meilleure sensibilité que les mesures comportementales grâce à sa cotation plus nuancée, puisqu'elle peut rendre compte de la régularité des mouvements et du temps mis pour réaliser une séquence ou une configuration. En ce sens, l'outil permet d'une part d'attribuer des points aux enfants ne parvenant pas totalement à accomplir l'item proposé et, d'autre part, de pénaliser les enfants moins précis lors de la réalisation des items (Neveu et al., 2023b).

Dans l'optique d'étudier l'impact des faiblesses sensorimotrices liées à la prématurité sur le développement des représentations cardinales et sur la production des gestes cardinaux, il pourrait être intéressant d'envisager des designs longitudinaux. En effet, une étude longitudinale permettrait, d'une part, d'observer l'effet de la prématurité sur le développement des représentations cardinales des plus grands nombres, notamment de ceux dépassant 10 (et ne pouvant donc pas être représentés simultanément sur nos mains). D'autre part, un design longitudinal offrirait la possibilité d'analyser la persistance des difficultés de production de gestes cardinaux dans la population prématurée et ainsi de savoir si, par entraînement, les prématurés finissent par maîtriser ces gestes ou si, au contraire, leur production reste compliquée au travers de l'enfance. Le suivi d'une cohorte permettrait également d'explorer l'impact des difficultés de production des gestes cardinaux sur les stratégies choisies par les prématurés au fil de l'entrée dans les activités arithmétiques.

Si les résultats de ce mémoire suggèrent que les prématurés se trouvent en difficulté lors de la production des gestes cardinaux statiques à la tâche « montre-moi NVO-production digitale », les gestes cardinaux dynamiques n'ont, eux, pas été analysés. On sait d'une part que la représentation des nombres via le geste dynamique de comptage permet de faire le pont entre non-symbolique et symbolique (Crollen et al., 2011) et que, par ailleurs, ce geste dynamique est associé aux compétences de dextérité (Fisher et al., 2022) qui sont moins bonnes au sein de la population prématurée (et dans notre échantillon). Dès lors, il pourrait être intéressant d'explorer l'effet des difficultés sensorimotrices (notamment de dextérité) liées à la prématurité sur la production des gestes cardinaux dynamiques (et non seulement sur celle des gestes statiques).

VII. BIBLIOGRAPHIE

- Adrian, J. A., Bakeman, R., Akshoomoff, N., & Haist, F. (2020). Cognitive functions mediate the effect of preterm birth on mathematics skills in young children. *Child Neuropsychology*, 26(6), 834-856. <https://doi.org/10.1080/09297049.2020.1761313>
- Alanko, O., Niemi, P., Munck, P., Matomäki, J., Turunen, T., Nurmi, J. E., Lehtonen, L., Haataja, L., & Rautava, P. (2017). Reading and math abilities of Finnish school beginners born very preterm or with very low birth weight. *Learning and Individual Differences*, 54, 173-183. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2017.01.022>
- Alibali, M. W., and DiRusso, A. A. (1999). The function of gesture in learning to count: more than keeping track. *Cognitive Development* 14, 37–56.
- Allotey, J., Zamora, J., Cheong-See, F., Kalidindi, M., Arroyo-Manzano, D., Asztalos, E., Van Der Post, J. a. M., Mol, B. W., Moore, D. G., Birtles, D., Khan, K. S., & Thangaratinam, S. (2018). Cognitive, motor, behavioural and academic performances of children born preterm: a meta-analysis and systematic review involving 64 061 children. *BJOG: An International Journal of Obstetrics and Gynaecology*, 125(1), 16–25. <https://doi.org/10.1111/1471-0528.14832>
- Anderson, P. J. (2014). Neuropsychological outcomes of children born very preterm. *Seminars in Fetal and Neonatal Medicine*, 19(2), 90-96. <https://doi.org/10.1016/j.siny.2013.11.012>
- 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>
- Arpi, E., D'Amico, R., Lucaccioni, L., Bedetti, L., Berardi, A., & Ferrari, F. (2019). Worse global intellectual and worse neuropsychological functioning in preterm-born children

- at preschool age: a meta-analysis. *Acta Pædiatrica*, 108(9), 1567–1579.
<https://doi.org/10.1111/apa.14836>
- Asakawa, A., & Sugimura, S. (2011). The specific relationship between numerical abilities and finger dexterity in early childhood. *The Japanese Journal of Developmental Psychology*, 22, 130–139. <https://doi.org/10.11201/jjdp.22.130>
- Asakawa, A., & Sugimura, S. (2022). Mediating process between fine motor skills, finger gnosis, and calculation abilities in preschool children. *Acta Psychologica*, 231, 103771. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2022.103771>
- Badets, A., Pesenti, M., & Olivier, E. (2010). Response–effect compatibility of finger–numeral configurations in arithmetical context. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 63(1), 16–22. <https://doi.org/10.1080/17470210903134385>
- Bardi, A., Lacquière, C., Camos, V., Fayol, M., & Lacert, P. (1997). Dénombrement et Handicap. Dans *Entretiens d'Orthophonie* (p. 12–23). Expansion Scientifique Française.
- Barfield, W. D. (2018). Public Health Implications of Very Preterm Birth. *Clinics in Perinatology*, 45(3), 565–577. <https://doi.org/10.1016/j.clp.2018.05.007>
- Barner, D. (2012). Bootstrapping numeral meanings and the origin of exactness. *Language Learning and Development*, 8(2), 177–185. <https://doi.org/10.1080/15475441.2012.635541>
- Barnes, M. A., Stubbs, A., Raghobar, K. P., Agostino, A., Taylor, H. B., Landry, S. H., Fletcher, J. M., & Smith-Chant, B. L. (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>

- Barnett, A., Henderson, S.E. & Sugden, D.A. (2007). *Batterie d'évaluation du mouvement chez l'enfant (MABC-2)* (2nd ed.). Paris: Les Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- 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>
- 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/jresematheduc.18.2.0141>
- 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>
- Benum, S. D., Aakvik, K. a. D., Jørgensen, A. P. M., Jussinniemi, L., Кулмала, М., Vollsæter, M., Kajantie, E., & Evensen, K. a. I. (2024). Motor abilities in adults born with very low birthweight: A study of two birth cohorts from Finland and Norway. *Developmental Medicine & Child Neurology*. <https://doi.org/10.1111/dmcn.15883>
- Berteletti, I., & Booth, J. R. (2015). Perceiving fingers in single-digit arithmetic problems. *Frontiers in Psychology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00226>
- Blanca, M. J., Alarcón, R., Arnau, J., Bono, R., & Bendayan, R. (2017). Non-normal data : Is ANOVA still a valid option ? *PubMed*, 29(4), 552–557. <https://doi.org/10.7334/psicothema2016.383>
- Blanca, M. J., Arnau, J., García-Castro, F. J., Alarcón, R., & Bono, R. (2023). Non-normal data in repeated measures ANOVA : impact on Type I error and power. *PubMed*, 35(1), 21–29. <https://doi.org/10.7334/psicothema2022.292>

- Bolk, J., Padilla, N., Forsman, L., Broström, L., Hellgren, K., & Ådén, U. (2018). Visual–motor integration and fine motor skills at 6½ years of age and associations with neonatal brain volumes in children born extremely preterm in Sweden: a population-based cohort study. *BMJ Open*, 8(2), e020478. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2017-020478>
- Bos, A. F., van Braeckel, K. N. J. A., Hitzert, M. M., Tanis, J. C., & Roze, E. (2013). Development of fine motor skills in preterm infants. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 55, 1-4. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12297>
- Bröring, T., Königs, M., Oostrom, K. J., Lafeber, H. N., Brugman, A., & Oosterlaan, J. (2018). Sensory processing difficulties in school-age children born very preterm: An exploratory study. *Early Human Development*, 117, 22–31. <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2017.12.003>
- Butcher, P. R., Bouma, A., Stremmelaar, E. F., Bos, A. F., Smithson, M., & Van Braeckel, K. N. (2012). Visuospatial perception in children born preterm with no major neurological disorders. *Neuropsychology*, 26(6), 723–734. <https://doi.org/10.1037/a0029298>
- Butterworth, B. (1999). *What Counts : How Every Brain is Hardwired for Math*. Free Press.
- Castaldi, E., Piazza, M., & Iuculano, T. (2020). Learning disabilities: Developmental dyscalculia. In *Handbook of clinical neurology* (pp. 61–75). <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-64148-9.00005-3>
- Clayton, S., Simms, V., Cragg, L., Gilmore, C., Marlow, N., Spong, R., & Johnson, S. (2022). Etiology of persistent mathematics difficulties from childhood to adolescence following very preterm birth. *Child Neuropsychology*, 28(1), 82–98. <https://doi.org/10.1080/09297049.2021.1955847>
- 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>

- Crollen, V., Serón, X., & Noël, M. (2011). Is finger-counting necessary for the development of arithmetic abilities? *Frontiers in Psychology*, 2. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00242>
- Crump, C. (2020). An overview of adult health outcomes after preterm birth. *Early Human Development*, 150, 105187. <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2020.105187>
- Davidson, K., Eng, K., & Barner, D. (2012). Does learning to count involve a semantic induction? *Cognition*, 123(1), 162–173. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2011.12.013>
- Davis, N., Ford, G., Anderson, P. J., & Doyle, L. W. (2007). Developmental coordination disorder at 8 years of age in a regional cohort of extremely-low-birthweight or very preterm infants. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 49(5), 325–330. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2007.00325.x>
- Dehaene, S., Tzourio, N., Frak, V., Raynaud, L., Cohen, L., Mehler, J., & Mazoyer, B. (1996). Cerebral activations during number multiplication and comparison : a PET study. *Neuropsychologia*, 34(11), 1097-1106. [https://doi.org/10.1016/0028-3932\(96\)00027-9](https://doi.org/10.1016/0028-3932(96)00027-9)
- de Jong, B. M., van Zomeren, A. H., Willemsen, A. T. M., & Paans, A. M. J. (1996). Brain activity related to serial cognitive performance resembles circuitry of higher order motor control. *Experimental Brain Research*, 109(1), 136-140. <https://doi.org/10.1007/bf00228634>
- de Paula Machado, A. C. C., De Castro Magalhães, L., De Oliveira, S. R., & Bouzada, M. C. F. (2019). Is sensory processing associated with prematurity, motor and cognitive development at 12 months of age? *Early Human Development*, 139, 104852. <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2019.104852>
- di Luca, S., Granà, A., Semenza, C., Seron, X., & Pesenti, M. (2006). Finger–digit compatibility in Arabic numeral processing. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 59(9), 1648-1663. <https://doi.org/10.1080/17470210500256839>

- di Luca, S., & Pesenti, M. (2008). Masked priming effect with canonical finger numeral configurations. *Experimental Brain Research*, 185(1), 27-39. <https://doi.org/10.1007/s00221-007-1132-8>
- 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>
- Domahs, F., Krinzinger, H., & Willmes, K. (2008). Mind the gap between both hands : Evidence for internal finger-based number representations in children's mental calculation. *Cortex*, 44(4), 359-367. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.001>
- 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>
- Donlan, C., Cowan, R., Newton, E. J., & Lloyd, D. (2007). The role of language in mathematical development: Evidence from children with specific language impairments. *Cognition*, 103(1), 23–33. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.02.007>
- Doyle, L. W., Spittle, A. J., Anderson, P. J., & Cheong, J. L. (2021). School-aged neurodevelopmental outcomes for children born extremely preterm. *Archives of Disease in Childhood*, 106(9), 834–838. <https://doi.org/10.1136/archdischild-2021-321668>
- Evensen, K. A. I., Ustad, T., Tikanmäki, M., Haaramo, P., & Kajantie, E. (2020). Long-term motor outcomes of very preterm and/or very low birth weight individuals without cerebral palsy : A review of the current evidence. *Seminars in Fetal and Neonatal Medicine*, 25(3), 101116. <https://doi.org/10.1016/j.siny.2020.101116>
- Fayol, M., & Seron, X. (2005). About Numerical Representations: Insights from Neuropsychological, Experimental, and Developmental Studies. In J. I. D. Campbell (Ed.), *Handbook of Mathematical Cognition* (pp. 3–22). New York, NY.

- Fischer, U., Suggate, S. P., Schmir, J., & Stoeger, H. (2017). 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., & Stoeger, H. (2020). The implicit contribution of fine motor skills to mathematical insight in early childhood. *Frontiers in Psychology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01143>
- 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>
- Gerstmann, J. (1940). Syndrome of finger agnosia, disorientation for right and left, agraphia and acalculia. *Archives of Neurology & Psychiatry*, 44(2), 398. <https://doi.org/10.1001/archneurpsyc.1940.02280080158009>
- Gibson, D. J., Gunderson, E. A., Spaepen, E., Levine, S. C., & Goldin-Meadow, S. (2019). Number gestures predict learning of number words. *Developmental Science*, 22(3). <https://doi.org/10.1111/desc.12791>
- Guarini, A., Bonifacci, P., Tobia, V., Alessandroni, R., Faldella, G., & Sansavini, A. (2019). The profile of very preterm children on academic achievement. A cross-population comparison with children with specific learning disorders. *Research in Developmental Disabilities*, 87, 54-63. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2019.02.001>
- Guarini, A., Sansavini, A., Fabbri, M., Alessandroni, R., Faldella, G., & Karmiloff-Smith, A. (2014). Basic numerical processes in very preterm children : A critical transition from preschool to school age. *Early Human Development*, 90(3), 103-111. <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2013.11.003>
- Gunderson, E. A., Spaepen, E., Gibson, D., Goldin-Meadow, S., & Levine, S. C. (2015). Gesture as a window onto children's number knowledge. *Cognition*, 144, 14-28. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2015.07.008>

- Halme, H., McMullen, J., Nanu, C., Nyman, A., & Hannula-Sormunen, M. M. (2022). Mathematical skills of 11-year-old children born very preterm and full-term. *Journal of Experimental Child Psychology*, 219, 105390. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2022.105390>
- Harrison, M. S., & Goldenberg, R. L. (2016). Global burden of prematurity. *Seminars in Fetal and Neonatal Medicine*, 21(2), 74-79. <https://doi.org/10.1016/j.siny.2015.12.007>
- Hasler, H. M., & Akshoomoff, N. (2019). Mathematics ability and related skills in preschoolers born very preterm. *Child Neuropsychology*, 25(2), 162-178. <https://doi.org/10.1080/09297049.2017.1412413>
- Hellgren, K., Halberda, J., Forsman, L., Ådén, U., & Libertus, M. E. (2013). Compromised approximate number system acuity in extremely preterm school-aged children. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 55(12), 1109–1114. <https://doi.org/10.1111/dmcn.12206>
- Holsti, L., Grunau, R., & Whitfield, M. F. (2002). Developmental coordination disorder in extremely low birth weight children at nine years. *Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics*, 23(1), 9–15. <https://doi.org/10.1097/00004703-200202000-00002>
- Imbo, I., Vandierendonck, A., & Fias, W. (2011). Passive hand movements disrupt adults' counting strategies. *Frontiers in Psychology*, 2. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00201>
- Jaekel, J., Anderson, P. J., Bartmann, P., Cheong, J. L., Doyle, L. W., Hack, M., Johnson, S., Marlow, N., Saigal, S., Schmidt, L. A., Sullivan, M. C., & Wolke, D. (2021). Mathematical performance in childhood and early adult outcomes after very preterm birth: an individual participant data meta-analysis. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 64(4), 421–428. <https://doi.org/10.1111/dmcn.15132>

- Johnson, S., Strauss, V. Y., Gilmore, C., Jaekel, J., Marlow, N., & Wolke, D. (2016). Learning disabilities among extremely preterm children without neurosensory impairment: Comorbidity, neuropsychological profiles and scholastic outcomes. *Early Human Development, 103*, 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2016.07.009>
- Kilbride, H. W., Thorstad, K., & Daily, D. K. (2004). Preschool Outcome of Less Than 801-Gram Preterm Infants Compared With Full-Term Siblings. *Pediatrics, 113*(4), 742-747. <https://doi.org/10.1542/peds.113.4.742>
- Korpiää, H., Niemi, P., Aunola, K., Koponen, T., Hannula-Sormunen, M., Stolt, S., Aro, M., Nurmi, J. E., & Rautava, P. (2019). Prematurity and overlap between reading and arithmetic : The cognitive mechanisms behind the association. *Contemporary Educational Psychology, 56*, 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2019.01.005>
- Krajcsi, A., Fintor, E., & Hodossy, L. (2018). A refined description of preschoolers' initial symbolic number learning. OSF Preprints. <https://doi.org/10.31219/osf.io/2kh9s>
- 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>
- 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>
- Lee, M., Pascoe, J. M., & McNicholas, C. I. (2017). Reading, Mathematics and Fine Motor Skills at 5 Years of Age in US Children who were Extremely Premature at Birth.

Maternal and Child Health Journal, 21(1), 199-207. <https://doi.org/10.1007/s10995-016-2109-7>

- Libertus, M. E., Forsman, L., Ådén, U., & Hellgren, K. (2017). Deficits in approximate number system acuity and mathematical abilities in 6.5-Year-Old children born extremely preterm. *Frontiers in Psychology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01175>
- 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>
- Lönnberg, P., Niutanen, U., Parham, L. D., Wolford, E., Andersson, S., Metsäranta, M., & Lano, A. (2018). Sensory-motor performance in seven-year-old children born extremely preterm. *Early Human Development*, 120, 10–16. <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2018.03.012>
- Marete, I., Ekhaguere, O., Bann, C. M., Bucher, S. L., Nyongesa, P., Patel, A. B., Hibberd, P. L., Saleem, S., Goldenberg, R. L., Goudar, S. S., Derman, R. J., Garces, A. L., Krebs, N. F., Chomba, E., Carlo, W. A., Lokangaka, A., Bauserman, M., Koso-Thomas, M., Moore, J. L., . . . Esamai, F. (2020). Regional trends in birth weight in low- and middle-income countries 2013–2018. *Reproductive Health*, 17(S3). <https://doi.org/10.1186/s12978-020-01026-2>
- Marlow, N., Hennessy, E. M., Bracewell, M. A., & Wolke, D. (2007). Motor and Executive Function at 6 Years of Age After Extremely Preterm Birth. *Pediatrics*, 120(4), 793-804. <https://doi.org/10.1542/peds.2007-0440>
- Mayes, S. D., Calhoun, S. L., Bixler, E. O., & Zimmerman, D. N. (2009). IQ and neuropsychological predictors of academic achievement. *Learning and Individual Differences*, 19(2), 238–241. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2008.09.001>

- McBryde, M., Fitzallen, G. C., Liley, H. G., Taylor, H. G., & Bora, S. (2020). Academic Outcomes of School-Aged Children Born Preterm. *JAMA Network Open*, 3(4), e202027. <https://doi.org/10.1001/jamanetworkopen.2020.2027>
- McCormick, M. C., Litt, J. S., Smith, V. C., & Zupancic, J. A. (2011). Prematurity : An Overview and Public Health Implications. *Annual Review of Public Health*, 32(1), 367-379. <https://doi.org/10.1146/annurev-publhealth-090810-182459>
- Moreira, R. S., Magalhães, L. C., & Alves, C. R. (2014). Effect of preterm birth on motor development, behavior, and school performance of school-age children : a systematic review. *Jornal de Pediatria*, 90(2), 119-134. <https://doi.org/10.1016/j.jped.2013.05.010>
- Neveu, M., Geurten, M., Durieux, N., & Rousselle, L. (2023a). Finger Use and Arithmetic Skills in Children and Adolescents: a Scoping Review. *Educational Psychology Review*, 35(1). <https://doi.org/10.1007/s10648-023-09722-8>
- Neveu, M., Schwartz, C., Vossius, L. & Rousselle, L. (2023b). Contribution of Finger Gnosia and Fine Motor Skills to Early Numerical and Arithmetic Abilities: New Insights From 3D Motion Analyses. *Developmental Psychology*, 59(12). <https://doi.org/10.1037/dev0001660>
- 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>
- Niutanen, U., Harra, T., Lano, A., & Metsäranta, M. (2020). Systematic review of sensory processing in preterm children reveals abnormal sensory modulation, somatosensory processing and sensory-based motor processing. *Acta Paediatrica*, 109(1), 45-55. <https://doi.org/10.1111/apa.14953>

- Niutanen, U., Lönnberg, P., Wolford, E., Metsäranta, M., & Lano, A. (2022). Extremely preterm children and relationships of minor neurodevelopmental impairments at 6 years. *Frontiers in Psychology, 13*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.996472>
- 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>
- Organisation Mondiale de la Santé (O.M.S.). (2018, 19 février). *Naissances prématurées*. Organisation Mondiale de la Santé. <https://www.who.int/fr/news-room/fact-sheets/detail/preterm-birth>
- Orrantia, J., Muñoz, D., Sanchez, R., & Matilla, L. (2022). Supporting the understanding of cardinal number knowledge in preschoolers : Evidence from instructional practices based on finger patterns. *Early Childhood Research Quarterly, 61*, 81-89. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2022.05.009>
- Oudgenoeg-Paz, O., Mulder, H., Jongmans, M. J., Van Der Ham, I. J. M., & Van Der Stigchel, S. (2017). The link between motor and cognitive development in children born preterm and/or with low birth weight: A review of current evidence. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews/Neuroscience and Biobehavioral Reviews, 80*, 382–393. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.06.009>
- Pascal, A., Govaert, P., Oostra, A., Naulaers, G., Ortibus, E., & Van Den Broeck, C. (2018). Neurodevelopmental outcome in very preterm and very-low-birthweight infants born over the past decade: a meta-analytic review. *Developmental Medicine & Child Neurology, 60*(4), 342–355. <https://doi.org/10.1111/dmcn.13675>
- Pascoe, L., Burnett, A. C., & Anderson, P. J. (2021). Cognitive and academic outcomes of children born extremely preterm. *Seminars in Perinatology, 45*(8), 151480. <https://doi.org/10.1016/j.semperi.2021.151480>

- PeBenito, R., Fisch, C. B., & Fisch, M. L. (1988). Developmental Gerstmann's Syndrome. *Archives of Neurology*, 45(9), 977-982. <https://doi.org/10.1001/archneur.1988.00520330063011>
- Pinel, P., Piazza, M., le Bihan, D., & Dehaene, S. (2004). Distributed and Overlapping Cerebral Representations of Number, Size, and Luminance during Comparative Judgments. *Neuron*, 41(6), 983-993. [https://doi.org/10.1016/s0896-6273\(04\)00107-2](https://doi.org/10.1016/s0896-6273(04)00107-2)
- Previtali, P., Rinaldi, L., & Girelli, L. (2011). Nature or Nurture in Finger Counting : A Review on the Determinants of the Direction of Number ? Finger Mapping. *Frontiers in Psychology*, 2. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00363>
- Raghubar, K. P., & Barnes, M. A. (2016). Early numeracy skills in preschool-aged children: a review of neurocognitive findings and implications for assessment and intervention. *The Clinical Neuropsychologist*, 31(2), 329–351. <https://doi.org/10.1080/13854046.2016.1259387>
- Reeve, R., & Humberstone, J. (2011). Five- to 7-year-olds'finger gnosis and calculation abilities. *Frontiers in Psychology*, 2(359). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00359>
- Restiffe, A. P., & Gherpelli, J. L. D. (2006). Comparison of chronological and corrected ages in the gross motor assessment of low-risk preterm infants during the first year of life. *Arquivos De Neuro-Psiquiatria*, 64(2b), 418–425. <https://doi.org/10.1590/s0004-282x2006000300013>
- 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>

- Rusconi, E. (2018). Gerstmann syndrome : historic and current perspectives. *Handbook of Clinical Neurology*, 395-411. <https://doi.org/10.1016/b978-0-444-63622-5.00020-6>
- 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>
- Simms, V., Cragg, L., Gilmore, C., Marlow, N., & Johnson, S. (2013). Mathematics difficulties in children born very preterm : current research and future directions. *Archives of Disease in Childhood - Fetal and Neonatal Edition*, 98(5), F457-F463. <https://doi.org/10.1136/archdischild-2013-303777>
- Simms, V., Gilmore, C., Cragg, L., Clayton, S., Marlow, N., & Johnson, S. (2015). Nature and origins of mathematics difficulties in very preterm children : a different etiology than developmental dyscalculia. *Pediatric Research*, 77(2), 389-395. <https://doi.org/10.1038/pr.2014.184>
- Soppelsa, R. & Albaret, J.-M. (2004). *Batterie d'Evaluation du Mouvement chez l'Enfant (MABC), Adaptation Française*. Paris: Les Editions du Centre de Psychologie Appliquée. (Original Work Published 1992)
- Spaepen, E., Gunderson, E. A., Gibson, D. J., Goldin-Meadow, S., & Levine, S. C. (2018). Meaning before order: Cardinal principle knowledge predicts improvement in understanding the successor principle and exact ordering. *Cognition*, 180, 59–81. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.06.012>
- Stock, P., Desoete, A., & Roeyers, H. (2009). Mastery of the counting principles in toddlers : A crucial step in the development of budding arithmetic abilities ? *Learning and Individual Differences*, 19(4), 419-422. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2009.03.002>

- 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*, 1085–1106. <https://doi.org/10.1177/0031512517727405>
- Tatsuoka, C., McGowan, B., Yamada, T., Espy, K. A., Minich, N., & Taylor, H. G. (2016). Effects of extreme prematurity on numerical skills and executive function in kindergarten children : An application of partially ordered classification modeling. *Learning and Individual Differences, 49*, 332-340. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2016.05.002>
- Torchin, H., Ancel, P. Y., Jarreau, P. H., & Goffinet, F. (2015). Épidémiologie de la prématurité : prévalence, évolution, devenir des enfants. *Journal de Gynécologie Obstétrique et Biologie de la Reproduction, 44*(8), 723-731. <https://doi.org/10.1016/j.jgyn.2015.06.010>
- Townley Flores, C., Gerstein, A., Phibbs, C. S., & Sanders, L. (2021). Short-Term and Long-Term educational outcomes of infants born moderately and late preterm. *The Journal of Pediatrics, 232*, 31-37.e2. <https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2020.12.070>
- Twilhaar, E. S., De Kieviet, J. F., Aarnoudse-Moens, C. S., Van Elburg, R. M., & Oosterlaan, J. (2018). Academic performance of children born preterm: a meta-analysis and meta-regression. *Archives of Disease in Childhood: Fetal & Neonatal, 103*(4), F322–F330. <https://doi.org/10.1136/archdischild-2017-312916>
- Twilhaar, E. S., De Kieviet, J. F., Van Elburg, R. M., & Oosterlaan, J. (2020). Neurocognitive processes underlying academic difficulties in very preterm born adolescents. *Child Neuropsychology, 26*(2), 274–287. <https://doi.org/10.1080/09297049.2019.1639652>
- van Beek, P. E., Van Wassenaer-Leemhuis, A., Abu-Hanna, A., Pajkrt, E., Aarnoudse-Moens, C. S., Van Baar, A., Andriessen, P., & Ravelli, A. C. (2022). Preterm Birth is Associated with Lower Academic Attainment at Age 12 Years: A Matched Cohort Study by

- Linkage of Population-Based Datasets. *The Journal of Pediatrics*, 251, 60-66.e3.
<https://doi.org/10.1016/j.jpeds.2022.07.049>
- van Houdt, C. A., Oosterlaan, J., Van Wassenae-Leemhuis, A. G., Van Kaam, A. H., & Aarnoudse-Moens, C. S. (2019). Executive function deficits in children born preterm or at low birthweight: a meta-analysis. *Developmental Medicine and Child Neurology/Developmental Medicine & Child Neurology*, 61(9), 1015–1024.
<https://doi.org/10.1111/dmcn.14213>
- Van Nieuwenhoven, C., Grégoire, J., & Noël, M.-P. (2001). *Test diagnostique des compétences de base en mathématiques (TEDI-MATH)*. Paris: Les Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Van Rooijen, M., Verhoeven, L., & Steenbergen, B. (2010). Early numeracy in cerebral palsy: review and future research. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 53(3), 202–209. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2010.03834.x>
- van Veen, S., Van Wassenae-Leemhuis, A. G., Van Kaam, A. H., Oosterlaan, J., & Aarnoudse-Moens, C. S. (2019). Visual perceptive skills account for very preterm children's mathematical difficulties in preschool. *Early Human Development*, 129, 11–15.
<https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2018.12.018>
- Verdine, B. N., Irwin, C. M., Golinkoff, R. M., & Hirsh-Pasek, K. (2014). Contributions of executive function and spatial skills to preschool mathematics achievement. *Journal of Experimental Child Psychology*, 126, 37–51. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2014.02.012>
- Vermeulen, K., Van Beek, P. E., Van Der Horst, I., Pop, V. J., Van Dam, M., Vugs, B., & Andriessen, P. (2022). Toddler motor performance and intelligence at school age in preterm born children: A longitudinal cohort study. *Early Human Development*, 166, 105549. <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2022.105549>

- Vogel, J. P., Chawanpaiboon, S., Moller, A. B., Watananirun, K., Bonet, M., & Lumbiganon, P. (2018). The global epidemiology of preterm birth. *Best Practice & Research in Clinical Obstetrics & Gynaecology*, 52, 3–12. <https://doi.org/10.1016/j.bpobgyn.2018.04.003>
- Vollmer, B., & Stålnacke, J. (2019). Young Adult Motor, Sensory, and Cognitive Outcomes and Longitudinal Development after Very and Extremely Preterm Birth. *Neuropediatrics*, 50(04), 219–227. <https://doi.org/10.1055/s-0039-1688955>
- Waitzman, N. J., Jalali, A., & Grosse, S. D. (2021). Preterm birth lifetime costs in the United States in 2016: An update. *Seminars in Perinatology*, 45(3), 151390. <https://doi.org/10.1016/j.semperi.2021.151390>
- Walani, S. R. (2020). Global burden of preterm birth. *International Journal of Gynecology & Obstetrics*, 150(1), 31–33. <https://doi.org/10.1002/ijgo.13195>
- 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>
- Wocadlo, C., & Rieger, I. (2008). Motor impairment and low achievement in very preterm children at eight years of age. *Early Human Development*, 84(11), 769–776. <https://doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2008.06.001>
- 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)
- Zhang, L., Wang, W., & Zhang, X. (2020). Effect of finger gnosis on young Chinese children's addition skills. *Frontiers in Psychology*, 11(544543). <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.544543>

RÉSUMÉ

Contexte : La prématurité est fréquemment associée à des faiblesses au niveau des compétences sensorimotrices digitales (Niutanen et al., 2022 ; Bos et al., 2013). Celles-ci interviennent cependant dans la production des gestes cardinaux (Fisher et al., 2022). De plus, elles sont liées aux compétences cardinales dans des tâches faisant intervenir ou non les doigts (Fischer et al., 2022 ; Neveu et al., 2023b). Ceci n'est pas étonnant puisque les doigts forment un pont entre les numérosités (non-symboliques) et les symboles numériques et sont donc un outil précieux dans le développement cardinal (Gunderson, 2015 ; Roesch & Moeller, 2015).

Objectif : Ce mémoire a eu pour objectif de répondre à deux questions. Tout d'abord, nous avons questionné l'impact des difficultés sensorimotrices liées à la prématurité sur la construction des représentations cardinales digitales et verbales. Ensuite, nous nous sommes demandé si, dans les activités cardinales, les prématurés se trouvaient en difficulté pour construire des représentations sur base des configurations digitales (et donc pour comprendre celles-ci) et/ou pour produire lesdites configurations sur le plan moteur.

Méthodologie : Pour répondre à ces questions, nous avons recruté 30 enfants prématurés âgés de 3 à 5 ans et 30 enfants contrôles nés à terme, appariés sur base de l'âge chronologique. Tous ont participé à un testing évaluant les compétences sensorimotrices liées au développement numérique (gnosies digitales, dextérité et précision motrice fine) et les compétences numériques précoces. Parmi les compétences numériques, la cardinalité a fait l'objet d'une évaluation approfondie au travers de tâches « donne-moi » et « montre-moi », déclinées en plusieurs modalités impliquant tantôt les représentations cardinales (verbales, digitales ou les deux), tantôt la production des configurations digitales.

Résultats et conclusions : Sur le plan sensorimoteur, les prématurés de notre échantillon n'ont obtenu de scores inférieurs aux sujets contrôles qu'à l'indice de dextérité motrice de la MABC-2. Concernant la cardinalité, les résultats montrent que les enfants des deux groupes n'ont pas obtenu de scores statistiquement différents aux tâches recrutant les représentations cardinales verbales, ni à celles recrutant les représentations cardinales digitales, ni même à celle impliquant les deux types de représentations. Cela suggère que, malgré leurs faiblesses sur le plan de la dextérité, les enfants prématurés de 3 à 5 ans ne semblent pas présenter de difficultés pour construire des représentations cardinales, sur base de NVO comme sur base de configurations digitales. Cela leur permet d'accéder à la compréhension de ces symboles. Par contre, les performances des prématurés sont significativement inférieures à celles des enfants contrôles à la tâche « montre-moi NVO-production digitale », ce qui indique qu'ils se trouvent en difficulté sur le plan moteur lorsqu'il s'agit de mobiliser leurs doigts pour produire les configurations digitales.