



MEMOIRE

En vue de l'obtention du
Certificat de Capacité d'Orthophoniste
présenté par

Léa SCHIANO

qui sera soutenu publiquement en juin 2023

**Les différences de développement des
compétences mathématiques chez les enfants
d'âge préscolaire
Proposition de constitution de profils**

MEMOIRE dirigé par

Sandrine MEJIAS, Maître de conférences, Département d'Orthophonie, Université de Lille

Sophie RAVEZ, Orthophoniste, Département d'Orthophonie, Université de Lille

Résumé :

Les premiers apprentissages mathématiques ne se mettent pas en place au même rythme chez tous les enfants d'âge préscolaire. Ainsi, des différences dans leurs acquis apparaissent. Elles peuvent être liées à différents facteurs tels que leurs compétences cognitives générales. Les enfants peuvent donc présenter des facilités ou des difficultés à acquérir les bases en mathématiques. La présente étude, menée auprès de 172 enfants de maternelle, a pour but d'identifier des profils cognitifs favorisant ou impactant le développement des capacités mathématiques chez les jeunes enfants. Pour ce faire, différentes mesures ont été relevées afin d'évaluer leurs compétences cognitives générales et spécifiques aux mathématiques. Des analyses corrélationnelles et en composantes principales (ACP) ont permis d'examiner le lien entre les différentes mesures réalisées. Nous relevons une association de la mémoire de travail verbale et des capacités visuo-spatiales avec les capacités mathématiques ainsi qu'une association des tâches de comparaison entre elles. L'analyse par grappes a identifié l'existence de quatre sous-groupes présentant 1) des scores faibles à l'ensemble des mesures, 2) des scores globalement bons à l'exception des épreuves de comparaison, 3) de bons résultats globaux à l'exception de la mémoire de travail visuo-spatiale, 4) des résultats globalement moyens et une faiblesse aux épreuves mathématiques. Nous pouvons donc conclure que les enfants d'âge préscolaire constituent un groupe hétérogène. De plus, notre étude souligne l'importance des compétences cognitives générales pour le développement des capacités mathématiques. Ces résultats permettent de mettre l'accent sur l'importance de proposer des stimulations précoces aux enfants, en particulier s'ils présentent des difficultés.

Mots-clés :

Mathématiques, capacités cognitives générales, compétences spécifiques à un domaine, enfants d'âge préscolaire.

Abstract :

Early mathematical learning does not occur at the same rate in all preschoolers. Thus, differences in their learning appear. These differences may be related to various factors such as their general cognitive skills. Children may therefore have difficulty or ease in acquiring basic mathematics skills. The present study, conducted with 172 kindergarten children, aims to identify cognitive profiles that promote or impact the development of mathematical abilities in young children. To do so, various measures were taken to assess their general and specific cognitive skills in mathematics. Correlational and principal component analyses (PCA) were used to examine the relationship between the different measures. We find an association of verbal working memory and visuo-spatial abilities with mathematical abilities as well as an association of comparison tasks with each other. Cluster analysis identified the existence of four subgroups with 1) low scores on all measures, 2) good overall scores except for comparison tasks, 3) good overall scores except for visuo-spatial working memory, and 4) average overall scores and weakness on mathematics tasks. We can therefore conclude that preschoolers are a heterogeneous group. Furthermore, our study highlights the importance of general cognitive skills for the development of mathematical abilities. These results emphasize the importance of providing early stimulation to children, especially if they have difficulties.

Keywords :

Mathematics, general cognitive abilities, domain-specific abilities, preschoolers.

Table des matières

Introduction	1
Contexte théorique, buts et hypothèses	2
1. Les compétences numériques précoces	2
1.1. Les enjeux du traitement non symbolique	2
1.2. Les enjeux du traitement symbolique	2
2. Les capacités cognitives impliquées dans le développement des mathématiques	3
2.1. Les capacités cognitives générales.....	3
2.2. Les processus de mémoire	3
3. Le développement typique des compétences mathématiques	4
3.1. A l'âge de 3 ans.....	4
3.2. A l'âge de 4 ans.....	5
3.3. A l'âge de 5 ans.....	5
La présente étude	6
Méthode.....	6
1. Population.....	6
2. Matériel	7
2.1. Intelligence générale	7
2.2. Aptitudes visuo-spatiales	7
2.3. Gnosies digitales	7
2.4. Mémoire à court terme.....	7
2.5. Lignes numériques	8
2.6. Comparaison de quantités	8
2.7. Comptage et dénombrement	8
2.8. Transcodage	8
2.9. Chaîne numérique	8
2.10. Additions	9
3. Procédure.....	9
Résultats	10
1. Analyses descriptives	10
2. Certaines mesures sont-elles associées entre elles ?	11
3. Peut-on identifier des profils spécifiques chez certains enfants ?	14
Discussion	18
1. Les associations de mesures	18
2. Les différents profils de performance	19
Conclusion.....	20
Bibliographie.....	21

Introduction

Les capacités numériques précoces, impliquant le traitement de la magnitude, se manifestent au cours des premiers mois de la vie chez les êtres humains (Lourenco & Longo, 2010). Ce système de traitement de la magnitude appartient au système non symbolique inné et tend à s'enrichir par l'entrée dans le langage et le début des apprentissages scolaires. De ce fait, le système symbolique se met en place et permet le développement des compétences mathématiques (Von Aster & Shalev, 2007).

Les compétences numériques précoces sont donc importantes pour définir les trajectoires d'apprentissage des enfants en mathématiques (Jordan et al., 2009). En effet, 15 à 35 % des enfants d'âge préscolaire sont généralement classés comme peu performants en mathématiques et sont ainsi à risque de développer des difficultés d'apprentissage en mathématiques (Geary et al., 2013). Cependant, d'autres facteurs entrent en jeu et notamment, le développement des capacités cognitives des enfants (Bernabini et al., 2020). Par conséquent, une meilleure appréciation du développement des compétences mathématiques et des capacités cognitives liées à ce développement permettra la mise en place d'interventions précoces et pertinentes chez les enfants à risque de présenter des difficultés d'apprentissage en mathématiques.

C'est pourquoi, nous allons tenter d'identifier des profils cognitifs en lien avec les performances en mathématiques des enfants d'âge préscolaire. Pour cela, nous allons nous intéresser aux mesures classiquement utilisées pour investiguer les capacités cognitives générales et spécifiques au domaine des mathématiques chez les enfants. La mémoire de travail (Noël, 2009; Simmons et al., 2012), les compétences visuo-spatiales (Zhang & Lin, 2015) ou encore les compétences issues du système numérique approximatif (Chen & Li, 2014; Fazio et al., 2014; Schneider et al., 2017) sont souvent citées comme étant en lien avec le développement des compétences mathématiques. L'objectif est donc de voir si ces mesures sont effectivement associées au développement des compétences mathématiques. Cela représente une première étape afin de pouvoir, ensuite, déterminer les stimulations pertinentes en fonction des profils des enfants pour améliorer leurs performances en mathématiques.

Nous réaliserons dans un premier temps un état des lieux de la littérature actuelle au sujet de l'impact des capacités cognitives sur le développement en mathématiques des enfants d'âge préscolaire, puis nous exposerons nos objectifs. Nous décrirons ensuite la méthodologie employée afin de récolter les données et de les analyser. Enfin, nous présenterons nos résultats et nous les discuterons en regard des hypothèses formulées et en lien avec la littérature scientifique.

En vue de la publication de notre étude dans une revue scientifique et en accord avec Mme MEJIAS, responsable du projet KIDS e-stim dans lequel s'inscrit ce mémoire, la rédaction ne suit pas strictement les règles rédactionnelles d'un mémoire classique, mais tend à se rapprocher de celle d'un article scientifique et sera donc plus succincte.

Contexte théorique, buts et hypothèses

1. Les compétences numériques précoces

Avant l'entrée à l'école maternelle, les enfants développent des compétences numériques précoces essentielles à la bonne compréhension des mathématiques plus complexes. En effet, plusieurs auteurs ont démontré que les résultats futurs en mathématiques sont prédits par les compétences numériques précoces (Jordan et al., 2009; Mazzocco & Thompson, 2005). Les performances en maternelle en mathématiques et plus précisément en comptage, reconnaissance des nombres, comparaisons de nombres, calcul non verbal, résolution de problèmes sous forme d'histoires et combinaisons de nombres semblent pouvoir prédire les troubles des apprentissages en mathématiques (Jordan et al., 2009).

1.1. Les enjeux du traitement non symbolique

Les compétences numériques précoces dépendent du système de représentations numériques non symboliques. Celui-ci correspond à la capacité innée à estimer approximativement une quantité (Fayol, 2018). Ce système non symbolique est composé de deux sous-systèmes : le système numérique exact (SNE) et le système numérique approximatif (SNA). Le SNE permet la reconnaissance précise et rapide de petites quantités allant de 1 à 3 (voir pour revue, Lafay et al., 2013). Le SNA permet la reconnaissance approximative de grandes quantités (voir pour revue, Lafay et al., 2013). Cette discrimination numérique se préciserait avec l'âge et jouerait un rôle important dans l'acquisition du système de représentations numériques symboliques (Lipton & Spelke, 2005; Piazza, 2010). Cependant, d'après Krajcsi et ses collaborateurs (2023), l'hypothèse selon laquelle le SNA est le principal facteur de l'apprentissage de la signification des mots-nombres n'est pas vérifiée dans la littérature actuelle. La présence d'une association entre le SNA et la réussite en mathématiques a néanmoins été démontrée dans plusieurs études (Chen & Li, 2014; Fazio et al., 2014; Schneider et al., 2017). En effet, les interventions basées sur un entraînement du SNA auraient des effets positifs sur les compétences symboliques (Van Herwegen et al., 2018; Wang et al., 2016). Cependant, d'après Gilmore et ses collaborateurs (2013), la plupart des preuves existantes dans la littérature à propos d'un lien entre le SNA et la réussite en mathématiques chez les enfants d'âge préscolaire proviendraient des exigences de la tâche. Ils indiquent ainsi que les tâches de comparaison de points dans l'évaluation et l'intervention en mathématiques seraient inappropriées pour rendre compte de ce lien. Les variations et les transformations présentes dans ces tâches telles que la taille, la densité ou l'espacement, mobiliseraient davantage les compétences d'inhibition plutôt que la précision des représentations non symboliques. Piazza et ses collaborateurs (2018) ont, par ailleurs, démontré que la réussite des enfants aux tâches symboliques était due à l'invariance du nombre, autrement dit au fait que les nombres en tant que symboles ont des propriétés qui restent inchangées.

1.2. Les enjeux du traitement symbolique

Le système de représentations numériques symboliques se définit par l'utilisation d'un « code » à manipuler à l'aide de procédés mis en place par les utilisateurs du système et leur permettant de dénombrer et de calculer (Fayol, 2018). Les résultats de plusieurs études interventionnelles affirment que les interventions basées sur le système symbolique améliorent les compétences symboliques (Räsänen et al., 2009; Scalise et al., 2020). De plus, le système symbolique serait plus sensible à l'instruction que le système non symbolique (Schneider et al., 2017). Ainsi,

d'après Tobia et ses collègues (2021), les interventions basées sur le système symbolique permettraient une généralisation des performances en mathématiques.

Un manque de consensus existe quant à l'hypothèse selon laquelle les systèmes de traitement symbolique et non symbolique s'influenceraient mutuellement. Certains auteurs soutiennent la présence d'une influence seule du système symbolique sur le système non symbolique (Goffin & Ansari, 2019; Honoré & Noël, 2016). D'autres affirment que cette influence serait bidirectionnelle, le système non symbolique pouvant aussi améliorer les compétences symboliques (Chen & Li, 2014; Schneider et al., 2017; Van Herwegen et al., 2018).

2. Les capacités cognitives impliquées dans le développement des mathématiques

D'après plusieurs auteurs, les différences individuelles en mathématiques seraient en partie déterminées par l'implication de plusieurs capacités cognitives telles que la mémoire de travail verbale et visuo-spatiale, la vitesse de traitement ou encore les capacités intellectuelles (Costa et al., 2018; Geary, 2011; Passolunghi et al., 2008).

2.1. Les capacités cognitives générales

Il semblerait que les compétences en mathématiques soient liées au fonctionnement intellectuel général (Bernabini et al., 2020; Geary et al., 2000; Stock et al., 2009). Stefanelli et ses collaborateurs (2020) ont effectué une étude auprès d'enfants ayant un quotient intellectuel (QI) compris entre 70 et 85. Les résultats ont montré une altération générale de la mémoire et des compétences mathématiques chez ces enfants. Ainsi, les enfants ayant un fonctionnement intellectuel limite présenteraient une altération des compétences mathématiques. De même, plusieurs études ont établi un effet prédictif du QI sur la réussite scolaire et notamment en mathématiques (Lin & Powell, 2022; Peng & Kievit, 2020). Cependant, cette hypothèse est nuancée par l'existence de différents facteurs tels que l'âge, les types de compétences cognitives ou encore les facteurs socio-émotionnels. En effet, Lin et Powell (2022) indiquent que l'impact des compétences mathématiques globales et de la mémoire de travail augmentaient significativement avec l'âge, tandis que les effets de l'attention et de l'autorégulation diminuaient significativement avec l'âge. De plus, il a été démontré que, lors de l'exécution de tâches numériques simples, les enfants recrutaient les régions bilatérales frontales, pariétales et occipitales du cerveau, contrairement aux adultes chez lesquels une spécialisation du sillon intrapariétal droit est constatée (Kaufmann et al., 2011). Ainsi, différentes fonctions cognitives entrent en jeu lors de la réalisation de ces tâches. Les mathématiques et les capacités cognitives agiraient alors mutuellement les unes sur les autres durant le développement (voir pour revue, Peng & Kievit, 2020).

2.2. Les processus de mémoire

Un lien a été établi entre le développement des compétences mathématiques précoces et les fonctions exécutives, et plus précisément la flexibilité mentale, l'inhibition et la mémoire de travail (Bachman et al., 2022). Cette dernière est notamment évoquée dans le modèle développemental de Von Aster et Shalev (2007). Ils proposent une organisation hiérarchique en quatre étapes du développement de la représentation des nombres. Tout au long de ces étapes, la capacité de la mémoire de travail augmenterait de façon croissante. Coolen et ses collaborateurs (2023) ont, par ailleurs, démontré que la mémoire de travail visuo-spatiale deviendrait progressivement plus

importante avec l'âge et serait moins développée chez les enfants d'âge préscolaire (3 à 5 ans). De plus, des auteurs ont postulé l'existence d'une fonction exécutive unique chez les enfants d'âge préscolaire (Wiebe et al., 2011), suggérant ainsi une séparation de la mémoire de travail et de l'inhibition vers l'âge de 5 ans (Lee et al., 2013; Miller et al., 2012; Traverso et al., 2021).

Il a également été suggéré que la plupart des enfants à risque de développer des difficultés en mathématiques présentaient des difficultés dans les processus de mémoire (Raghubar et al., 2010) et notamment, lors de l'utilisation de la mémoire visuo-spatiale (Szucs et al., 2013). Les mathématiques impliqueraient alors une pensée spatiale en lien avec la mémoire de travail visuo-spatiale (Alloway et al., 2006) qui servirait de base pour certains apprentissages mathématiques (Cornu et al., 2018; Mix & Cheng, 2012) tels que la droite numérique (Gunderson et al., 2012) ou la pose des opérations (Caviola et al., 2012). La mémoire de travail (Noël, 2009; Simmons et al., 2012) et les compétences visuo-spatiales (Zhang & Lin, 2015) seraient donc un bon prédicteur des compétences numériques.

3. Le développement typique des compétences mathématiques

La plupart des études soutiennent le fait que le sens du nombre repose sur les compétences de subitisation, d'estimation de quantités, de comparaison de quantités, de comptage et de transformations numériques simples (Berch, 2005). Certaines de ces compétences se développent avant l'apprentissage formel des mathématiques, notamment chez les enfants d'âge préscolaire. En effet, la compréhension du sens du nombre se ferait de manière croissante durant la maternelle (Lipton & Spelke, 2005). Les enfants d'âge préscolaire apprennent les principes de base du comptage (Wynn, 1990) et peuvent effectuer des calculs d'addition et de soustraction (Mix et al., 1999).

3.1. A l'âge de 3 ans

C'est à partir de 2 ans et demi que les épreuves de calcul non verbal commencent à être résolues (Huttenlocher et al., 1994). Ensuite, vers l'âge de 3 ans, l'apprentissage du comptage verbal et la compréhension du système symbolique exact de la représentation des nombres débutent (Gelman & Gallistel, 1986). Les enfants apprennent tout d'abord la signification du mot « un » puis, six mois plus tard, ils apprennent la signification de « deux » et il faut environ neuf mois de plus pour qu'ils apprennent la signification de « trois ». Une fois la signification de « quatre » maîtrisée, les enfants semblent avoir compris le fonctionnement du système de comptage (Wynn, 1992). Ils sont alors âgés, pour la plupart, de 4 ans révolus (Lipton & Spelke, 2005).

D'après Gelman et Gallistel (1986), le comptage est régi par cinq principes essentiels qui doivent être acquis par l'enfant. Celui-ci doit ensuite être capable de les coordonner pour pouvoir dénombrer correctement un ensemble d'éléments. Le principe d'ordre stable correspond à l'utilisation d'une séquence stable des mots-nombres. Le principe de correspondance terme à terme assigne un nom de nombre à chaque élément compté. Le principe de cardinalité se définit par l'utilisation du dernier nom de nombre énoncé pour déterminer le nombre d'éléments de l'ensemble compté. Le principe d'abstraction démontre que les éléments comptés peuvent être hétérogènes. Enfin, le principe de non-pertinence de l'ordre indique que le comptage des éléments peut se faire dans n'importe quel ordre. La procédure de comptage est définie par les trois premiers principes. Le quatrième principe détermine le type d'ensemble sur lequel peut porter le comptage et le cinquième principe permet de distinguer le comptage du simple étiquetage (Gelman & Meck, 1983). L'acquisition de ces principes s'échelonne de l'âge de 3 ans à l'âge de 5 ans.

3.2. A l'âge de 4 ans

A l'âge de 4 ans, les enfants peuvent reconnaître et décrire les différences de quantités (Case & Griffin, 1990; Griffin, 2004). Ils s'appuient alors sur la perception visuelle plutôt que sur le comptage pour porter ce jugement (Xu & Spelke, 2000). En effet, les dimensions perceptive et numérique des collections sont traitées de manière automatique chez les enfants âgés de 4 ans (Rousselle & Noël, 2008). Par ailleurs, une étude de Baroody et Gatzke (1991) a montré que dès l'âge de 4 ans et demi les enfants peuvent estimer le nombre de points dans un ensemble de manière assez précise. Les performances des enfants varient en fonction de la taille de l'ensemble.

Lors de tâches d'additions, les enfants de 4 et 5 ans utilisent préférentiellement le comptage sur les doigts ou le comptage verbal (Fayol, 2018). Plusieurs auteurs indiquent que les doigts servent d'outil pour se représenter une quantité, car ils font le lien entre le système analogique qui représente concrètement la quantité et le système symbolique qui utilise des configurations canoniques des doigts (Fayol & Seron, 2005). Ainsi, l'usage des doigts pourrait aider l'enfant à comprendre le fonctionnement des systèmes symboliques. Par ailleurs, à 4 ans, un enfant est capable de montrer autant d'objets que de doigts, et ce jusqu'à trois éléments (Descœudres, 1921 citée par Fayol, 2018).

3.3. A l'âge de 5 ans

Les enfants de 5 ans sont en mesure d'estimer des résultats d'additions et de comparer des quantités en modalité visuelle et auditive (Barth et al., 2005, 2006). En effet, lorsque trois coups sont frappés, ils peuvent dire combien ils en ont entendu et, à 5 ans et demi, ils peuvent imiter trois coups frappés (Descœudres, 1921 citée par Fayol, 2018). De plus, plusieurs auteurs ont démontré que, vers l'âge de 5 ans, les enfants acquièrent des représentations numériques approximatives qui leur permettent de placer un nombre sur une ligne numérique entre 0 et 100. Ce placement suit une fonction logarithmique et tend à se préciser entre 7 et 8 ans (Laski & Siegler, 2007; Siegler & Booth, 2004).

D'après Lipton et Spelke (2005), c'est au moment où la séquence de comptage est maîtrisée que les enfants réussissent à faire la correspondance entre les représentations symboliques et non symboliques du nombre. Lipton et Spelke (2006) ont prouvé que les enfants de 5 ans comprennent que, en dehors de la plage numérique qu'ils maîtrisent, des mots numériques spécifiques permettent d'étiqueter des nombres exacts. Ainsi, ils sont capables de différencier les quantités d'un grand ensemble d'éléments lorsque des éléments sont supprimés ou ajoutés à l'ensemble. De plus, lorsque les éléments d'un ensemble sont réorganisés sans qu'il y ait d'ajout ou de retrait, les enfants semblent comprendre que la quantité reste la même. Les enfants d'âge préscolaire maîtrisent donc le système de logique qui entre en jeu dans la signification des mots numériques et l'appliquent aux mots numériques au-delà de leur plage de comptage.

La présente étude

Afin d'améliorer la qualité de l'aide apportée aux enfants qui présentent des faiblesses en mathématiques au début de leur scolarité, il serait pertinent de pouvoir identifier des profils de performances en mathématiques et cela le plus précocement possible. Des interventions appropriées à chaque profil permettraient, en effet, aux enfants d'éviter un cycle d'échec. Effectivement, sans intervention stratégique, les enfants ayant des difficultés en mathématiques ont peu de chances d'atteindre le niveau acquis par leurs pairs et sont plus susceptibles de continuer à échouer lors de l'apprentissage de compétences importantes (Hassinger-Das et al., 2014; Jordan et al., 2009).

Nous allons donc chercher à identifier des profils cognitifs en lien avec les performances en mathématiques des enfants d'âge préscolaire. Pour cela, nous allons nous intéresser aux mesures classiquement utilisées pour investiguer les capacités cognitives générales et spécifiques aux mathématiques chez les enfants, le but étant d'observer des associations de ces mesures entre elles et avec le développement des compétences mathématiques. Nous examinerons notamment la mémoire de travail (Noël, 2009; Simmons et al., 2012), les compétences visuo-spatiales (Zhang & Lin, 2015) ou encore les compétences issues du SNA (Chen & Li, 2014; Fazio et al., 2014; Schneider et al., 2017) qui sont souvent citées comme étant en lien avec le développement des compétences mathématiques.

Méthode

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre du projet KIDS e-stim ayant débuté en 2017 sous la direction de Sandrine Mejias, maître de conférences à l'Université de Lille. Ce projet est donc réalisé en partenariat avec l'Université de Lille (Département d'Orthophonie et laboratoire SCALab), l'Université du Luxembourg, l'Institut National Supérieur du Professorat et de l'Education (INSPE) et l'Education Nationale. Il vise à récolter des informations qui permettront, par la suite, d'établir des programmes de stimulation précoce des compétences mathématiques pour les populations à risque de développer des difficultés ou des troubles d'apprentissage en mathématiques. Ce travail de fin d'études découle d'une série de mémoires réalisés en 2018 et 2019 et consiste ainsi à analyser statistiquement les informations recueillies lors des pré-tests réalisés en 2017 dans le but d'obtenir le profil cognitivo-mathématique des participants. Afin de recueillir ces informations, les démarches nécessaires ont été effectuées auprès du comité d'éthique de l'Université de Lille qui a émis un avis favorable à la mise en place de ce projet. Le protocole du comité d'éthique correspondant à cette étude est le n°2017-1-S55.

1. Population

Huit classes de maternelle issues de cinq écoles publiques de la circonscription d'Arras dans le département du Nord ont été sélectionnées. Le but étant de représenter au mieux la population française générale, aucune des écoles sélectionnées n'est intégrée à un réseau d'éducation prioritaire ou n'est reconnue comme ayant un niveau d'éducation supérieur à la moyenne nationale. Concernant les critères d'inclusion pour participer à l'étude, les participants devaient être des enfants tout-venant scolarisés en moyenne ou grande section de maternelle et avoir le français comme langue maternelle. Ainsi, 172 enfants, dont 60 scolarisés en moyenne section et 112 scolarisés en grande section, ont participé à la passation des pré-tests.

2. Matériel

Le matériel utilisé lors des pré-tests se composait d'un protocole destiné à être rempli par l'examineur et, d'un livret de passation destiné à l'enfant. Tous deux étaient présentés sous format papier. De plus, chaque examinateur était muni d'un classeur contenant les planches d'épreuves à présenter aux enfants.

Le contenu des pré-tests est inspiré des travaux de Cornu et ses collègues (2017) qui cherchaient à observer les effets de stimulations visuo-spatiales sur le développement des compétences visuo-spatiales et mathématiques des enfants. Les subtests ont donc été sélectionnés dans le but d'évaluer les compétences cognitives générales et les compétences numériques spécifiques des participants.

2.1. Intelligence générale

Le subtest « Matrices » issu de la WISC non-verbale (Wechsler & Naglieri, 2006) a été utilisé pour évaluer l'intelligence générale des participants. La tâche consiste à observer une matrice incomplète de formes géométriques et à la compléter en choisissant l'item manquant parmi quatre ou cinq propositions. L'épreuve est notée sur 41 points.

2.2. Aptitudes visuo-spatiales

L'orientation spatiale des participants a été évaluée à l'aide de deux épreuves issues du Developmental Test of Visual Perception (DTVP-2, Hammill et al., 1993). La première est intitulée « Lequel est différent ? » et demande au participant de désigner la figure différente des autres. La seconde épreuve est intitulée « Lesquels sont les mêmes ? » et demande au participant de désigner la figure qui est identique au modèle. Les figures présentées sont orientées dans des sens différents. Ces deux épreuves sont notées sur 10 points. Enfin, une épreuve évaluant les relations spatiales a été proposée. Elle correspond au subtest « Relations spatiales », également issu du DTVP-2 (Hammill et al., 1993). Cette tâche consiste à relier des points comme sur le modèle. Elle est notée sur 7 points.

2.3. Gnosies digitales

Cette compétence a été évaluée à l'aide de l'épreuve des gnosies digitales de Galifret-Granjon (1964). Dans cette tâche, la main du participant est cachée. L'examineur touche un des doigts de cette main et le participant doit montrer de quel doigt il s'agit sur un dessin représentant une main. La main droite et la main gauche sont notées séparément, chacune sur 10 points.

2.4. Mémoire à court terme

Deux épreuves ont été proposées pour évaluer la mémoire à court terme des participants. La première épreuve teste la mémoire de travail verbale. Elle consiste à répéter à l'envers une suite de noms de couleurs énoncée par l'examineur. Cette épreuve est notée sur 6 points. Ensuite, la mémoire visuo-spatiale a été évaluée à l'aide de l'épreuve des blocs de Corsi en version papier. Le participant doit reproduire une séquence de mouvements de pointage de différents cubes montrée par l'observateur. Cette épreuve est notée sur 10 points.

2.5. Lignes numériques

Dans cette tâche, le participant doit placer différents nombres arabes sur une ligne non graduée allant de 0 à 20. Les nombres sont présentés à gauche de la ligne, en code arabe au participant. Concernant la notation, une moyenne des déviations du participant par rapport aux réponses attendues est effectuée, en valeur absolue. Ainsi, plus le score est faible, plus la précision est grande. Cette valeur a été soustraite à 10 afin que l'augmentation des scores correspondent à une plus grande précision, à l'instar des autres mesures.

2.6. Comparaison de quantités

Les quatre épreuves évaluant cette compétence sont chronométrées. La première épreuve évalue la vitesse motrice. Il s'agit d'une épreuve préalable aux trois épreuves suivantes. Le participant doit barrer le plus vite possible la forme noire parmi deux formes présentées. Ensuite, la deuxième épreuve évalue la comparaison symbolique de nombres arabes à un chiffre. Le participant doit barrer le plus grand chiffre parmi les deux présentés. La troisième épreuve évalue la comparaison symbolique de nombres arabes à deux chiffres. Le participant doit barrer le plus grand nombre parmi les deux présentés. Enfin, la dernière épreuve permet de tester la comparaison non symbolique. Le participant doit barrer l'ensemble de points contenant le plus grand nombre de points parmi les deux ensembles présentés. Pour la notation des 4 épreuves, les réponses correctes données en 20 secondes pour la vitesse motrice et 30 secondes pour les 3 autres épreuves, sont comptabilisées.

2.7. Comptage et dénombrement

Ces compétences ont été évaluées à l'aide de quatre tâches. Tout d'abord, le comptage libre est testé. Le participant doit compter le plus loin possible à voix haute. Le dernier élément de la chaîne numérique énoncé correctement correspond à la note de l'enfant. Ensuite, il est demandé au participant de compter à partir d'une borne inférieure jusqu'à une borne supérieure à voix haute (5 items, un point par bonne réponse) puis de compter à rebours à partir d'une borne supérieure jusqu'à une borne inférieure à voix haute également (5 items, un point par bonne réponse). Enfin, l'épreuve « How many ? » permet d'évaluer le dénombrement. Le participant doit dénombrer 3 ensembles de 5, 7 et 11 cailloux. Cette dernière épreuve est notée sur 3 points.

2.8. Transcodage

Cette compétence est évaluée à l'aide d'une épreuve de lecture de nombres arabes à voix haute (5 items à un digit et 13 items à deux digits). L'épreuve est notée sur 18 points.

2.9. Chaîne numérique

Cette tâche s'intitule « Quel est le chiffre manquant ? » et il est demandé au participant d'énoncer le nombre manquant dans la suite de quatre nombres arabes présentée visuellement. Six séquences nécessitent d'être complétées par un chiffre inférieur à dix et quatre séquences par un nombre supérieur à onze. Cette tâche est notée sur 10 points.

2.10. Additions

Deux épreuves comportant 6 additions simples présentées verbalement sont proposées pour évaluer les compétences additives. Dans la première épreuve, on présente à l'enfant un support visuel représentant deux mains avec des doigts levés, correspondant à l'addition à effectuer. Dans la deuxième épreuve, l'enfant visualise l'addition par le biais des chiffres arabes. Le participant doit donner le résultat de l'addition présentée à voix haute. Les deux épreuves sont notées sur 6 points.

3. Procédure

Tout d'abord, un dossier a été distribué aux parents des enfants issus des classes sélectionnées pour l'étude. Ce dossier contenait une lettre d'information, un questionnaire concernant les habitudes de jeux des enfants et une demande d'autorisation pour la participation à l'étude. Ainsi, seuls les enfants ayant une autorisation parentale ont participé à l'étude. Les enfants ont ensuite été testés lors de deux séances individuelles, sur leur temps de classe, généralement dans une salle mise à disposition par l'école. La durée de passation totale était de 40 à 60 minutes par enfant. Afin de limiter les biais liés à l'examineur et pour que chaque élève soit évalué dans les mêmes conditions, les consignes à donner à l'oral étaient spécifiées sur le protocole.

Les résultats des enfants à chaque épreuve ont été anonymisés et enregistrés dans un tableau afin d'effectuer l'analyse statistique. Des statistiques descriptives ont été réalisées pour toutes les mesures. Ensuite, des analyses corrélationnelles ont été menées entre différentes mesures. L'analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée sur les scores normalisés des mesures afin de transformer un certain nombre de mesures possiblement corrélées en un plus petit nombre de variables non corrélées (c'est-à-dire les composantes principales). Cette opération a été réalisée afin de révéler la structure interne des données et de mieux en expliquer la variance. Ensuite, nous avons examiné l'existence de sous-groupes au sein de l'échantillon, à l'aide d'une analyse par grappes. L'analyse par grappes est une technique statistique descriptive et multivariée qui vise à regrouper des individus proches les uns des autres. Le rendement des scores normalisés des différentes mesures a été entré en tant que variables d'intérêt dans l'analyse par grappes. Pour décrire plus en détail les sous-groupes identifiés, nous avons comparé les scores de performance pour les différentes grappes sur les variables d'intérêt entrées dans l'analyse des grappes, ainsi que l'âge et le QI non verbal. À cette fin, des ANOVA univariées sur les scores non standardisés pour chacune des variables de regroupement ont été utilisées pour décrire les différences entre les grappes. La procédure de Bonferroni a été utilisée pour les comparaisons post-hoc des moyennes.

Résultats

1. Analyses descriptives

L'échantillon (N), les moyennes (M) et les écarts-types (ET) pour toutes les variables mesurées sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Statistiques descriptives pour l'ensemble des mesures.

Mesures	N	M	SD
QI			
Raisonnement non verbal /41	172	11.52	3.61
Mémoire de travail			
Verbale	172	1.91	1.51
Spatiale	172	1.27	1.36
Compétences spatiales			
Congruence spatiale /20	172	13.06	3.98
Relations spatiales /44	172	31.21	12.51
Gnosies			
Mains droite et gauche /20	172	14.44	3.32
Comparaison			
Vitesse motrice	172	11.55	6.12
Symbolique	166	13.17	6.48
Non symbolique	172	12.27	5.80
Compétences numériques de base			
Ligne numérique	169	7.86	1.23
Nombre Verbal Oral (NVO)			
Comptage libre /50	172	25.41	13.20
Compter à partir de x et à rebours /10	172	4.59	3.25
« How many ? » /3	172	2.48	.77
Lecture de nombres arabes /18	172	7.59	4.81
Nombre manquant (ordinalité)	172	4.67	3.38
Compétences mathématiques complexes			
Addition (support digital) /6	172	2.66	2.23
Addition (nombres arabes) /6	172	1.81	2.04

Pour pouvoir identifier des profils spécifiques chez certains enfants de notre échantillon, nous voulions, dans un premier temps, mieux comprendre nos mesures en cherchant si certaines d'entre elles étaient associées les unes aux autres. Ensuite, nous voulions examiner l'existence de sous-groupes au sein du groupe des enfants d'âge préscolaire.

2. Certaines mesures sont-elles associées entre elles ?

Initialement, des corrélations bivariées (r de Pearson) ont été effectuées pour déterminer si les mesures (y compris l'âge et le QI des participants) étaient significativement liées les unes aux autres. Celles-ci sont présentées dans le tableau 2.

Tableau 2. Corrélations bivariées sur l'ensemble des mesures.

Bivariate correlations																	
	Age	IQ (WNV)	Verbal WM	Spatial WM	Spatial congruity	Spatial relation	Digital Gnosia	Motor speed	Symbolic comparison	Non symbolic comparison	Number Line	Counting (free)	Counting from X & back	How many	Reading Arabic digits	Missing number (ordinality)	Addition hands based
IQ (WNV)	,322**																
Verbal WM	,406**	,431**															
Spatial WM	,243**	,474**	,388**														
Spatial congruity	,397**	,532**	,580**	,397**													
Spatial relation	,562**	,602**	,585**	,436**	,551**												
Digital Gnosia	,343**	,390**	,470**	,200**	,421**	,554**											
Motor speed	,316**	,340**	,357**	0,149	,212**	,365**	,283**										
Symbolic comparison	,381**	,309**	,418**	,242**	,296**	,343**	,328**	,607**									
Non symbolic comparison	,382**	,348**	,288**	,206**	,255**	,379**	,269**	,667**	,605**								
Number Line	,345**	,403**	,382**	,332**	,378**	,425**	,334**	,161*	,251**	,235**							
Counting (free)	,376**	,445**	,616**	,351**	,577**	,532**	,355**	,393**	,460**	,340**	,464**						
Counting from X & back	,373**	,387**	,691**	,411**	,540**	,521**	,360**	,274**	,376**	,212**	,379**	,747**					
How many	,263**	,348**	,298**	,261**	,322**	,384**	,327**	,265**	,193*	,231**	,207**	,403**	,283**				
Reading Arabic digits	,273**	,472**	,672**	,371**	,564**	,480**	,342**	,263**	,394**	,155*	,445**	,732**	,725**	,327**			
Missing number	,351**	,538**	,677**	,440**	,606**	,575**	,456**	,335**	,445**	,326**	,454**	,705**	,700**	,340**	,783**		
Addition hands based	,343**	,453**	,607**	,363**	,501**	,578**	,349**	,340**	,390**	,251**	,357**	,570**	,642**	,260**	,555**	,628**	
Addition Arabic digits	,249**	,313**	,505**	,400**	,390**	,402**	,282**	,243**	,352**	,165*	,330**	,533**	,630**	,206**	,615**	,638**	,643**

* $p < 0.05$ level ; ** $p < 0.01$ (2-tailed)

Comme nous pouvons le constater dans le tableau 1 grâce au code couleur, un grand nombre de ces variables sont moyennement (en bleu) à fortement (en vert) corrélées entre elles. En particulier, la variable « Age » corrèle positivement avec la quasi-totalité des variables (c'est-à-dire que plus les participants sont âgés, meilleures sont leurs performances, à l'exception de la mémoire de travail visuo-spatiale et des additions avec des nombres arabes) et il en va de même avec la variable « QI ».

Ensuite, des corrélations partielles (r de Pearson ; en contrôlant pour les variables Age et QI) ont été menées pour déterminer si les mesures étaient toujours significativement liées les unes aux autres. Celles-ci sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3. Corrélations partielles en contrôlant l'âge et le QI non verbal.

Partial correlations (df = 159)																
Control variables = age & IQ																
	Verbal WM	Vpatial WM	Spatial congruity	Spatial relation	Digital Gnosia	Motor speed	Symbolic comparison	Non symbolic comparison	Number Line	Counting (free)	Counting from X back	How many	Reading arabic digits	Missing number (ordinality)	Addition hands based	
Spatial WM	0,199*															
Spatial congruity	0,403**	0,172*														
Spatial relation	0,356**	0,174*	0,228*													
Digital Gnosia	0,319**	-0,029	0,222*	0,34**												
Motor speed	0,221*	-0,026	0,026	0,161*	0,157*											
Symbolic comparison	0,267*	0,096	0,085	0,063	0,183*	0,53**										
Non symbolic comparison	0,104	0,036	0,023	0,101	0,083	0,591**	0,507**									
Number Line	0,191*	0,147	0,155*	0,159*	0,165*	-0,018	0,089	0,065								
Counting (free)	0,475**	0,154	0,417**	0,277**	0,161*	0,253**	0,325**	0,16*	0,306**							
Counting from X back	0,597**	0,264*	0,389**	0,292**	0,172*	0,118	0,225*	0,001	0,214*	0,666**						
How many	0,144	0,125	0,144	0,18*	0,197*	0,127	0,037	0,051	0,067	0,29**	0,157*					
Reading arabic digits	0,564**	0,163*	0,396**	0,233*	0,169*	0,121	0,273**	-0,043	0,298**	0,653**	0,665**	0,197*				
Missing number (ordinality)	0,552**	0,212*	0,42**	0,301**	0,272**	0,198*	0,317**	0,157*	0,271**	0,593**	0,609**	0,226*	0,702**			
Addition hands based	0,468**	0,156*	0,303**	0,377**	0,17*	0,187*	0,249*	0,054	0,168*	0,424**	0,543**	0,102	0,408**	0,485**		
Addition arabic digits based	0,407**	0,286**	0,243*	0,23*	0,155	0,129	0,248*	0,009	0,21*	0,437**	0,564**	0,107	0,548**	0,575**	0,576**	
* p < 0.05 level ; ** p < 0.01 (2-tailed)																

Nous constatons à présent des associations moyennes entre les variables mesurant les capacités de mémoire de travail verbale et les habiletés visuo-spatiales, des gnosies digitales, de comparaisons symboliques. Ces corrélations sont fortes entre la mémoire de travail verbale et l'ensemble des aptitudes mathématiques (à l'exception de la tâche « How many ? »). Notons encore que ces aptitudes mathématiques sont fortement associées les unes aux autres (toujours à l'exception de la tâche « How many ? »). Enfin, les tâches impliquant la comparaison (symbolique et non-symbolique) sont également fortement corrélées entre elles.

Nous avons ensuite procédé à une analyse en composantes principales (ACP) sur les scores des différentes mesures et trois facteurs principaux ont émergés (tableau 4), expliquant ensemble 63 % de la variance.

Tableau 4. Analyse en composantes principales des différentes mesures.

	Matrice des composants		
	Facteur 1 (46 %)	Facteur 2 (10 %)	Facteur 3 (7 %)
Nombre manquant (ordinalité)	.867	-.115	
Comptage libre	.821		
Compter à partir de x et à rebours	.812	-.270	-.204
Lecture de nombres arabes	.802	-.279	-.177
Mémoire de travail verbale	.799		
Addition (support digital)	.754	-.126	-.177
Relations spatiales	.732		.338
Congruence spatiale	.714	-.138	.200
Addition (chiffres arabes)	.700	-.255	-.332
Comparaison symbolique	.582	.555	-.282
Gnosies digitales	.564	.133	.478
Ligne numérique	.564		.222
Mémoire de travail spatiale	.532	-.134	.106
Comparaison non symbolique	.466	.749	
Vitesse motrice	.519	.694	
« How many ? »	.434		.533

Le premier facteur comporte un grand nombre de tâches, impliquant presque toutes les mesures évaluant les capacités numériques, mais également des capacités générales comme la mémoire de travail, les compétences visuo-spatiales et les gnosies (46% de variance). Le second facteur combine deux mesures issues de deux tests de comparaison différents (Brankaer et al., 2017; Nosworthy et al., 2013) et pourrait refléter des compétences liées à la vitesse et au traitement perceptif visuel (10% de variance). Le troisième facteur (7% de la variance) comprend une mesure unique, correspondant au dénombrement, qui combine différentes capacités telles que la chaîne de nombres verbaux, le pointage et la cardinalité.

3. Peut-on identifier des profils spécifiques chez certains enfants ?

Nous avons examiné l'existence de sous-groupes au sein de notre échantillon d'enfants d'âge préscolaire, à l'aide d'une analyse en grappes réalisée sur les scores standardisés. Nous avons utilisé un dendrogramme en grappes à partir d'un regroupement hiérarchique agglomératif employant la méthode de Ward. Celui-ci a suggéré quatre groupes (figure 1).

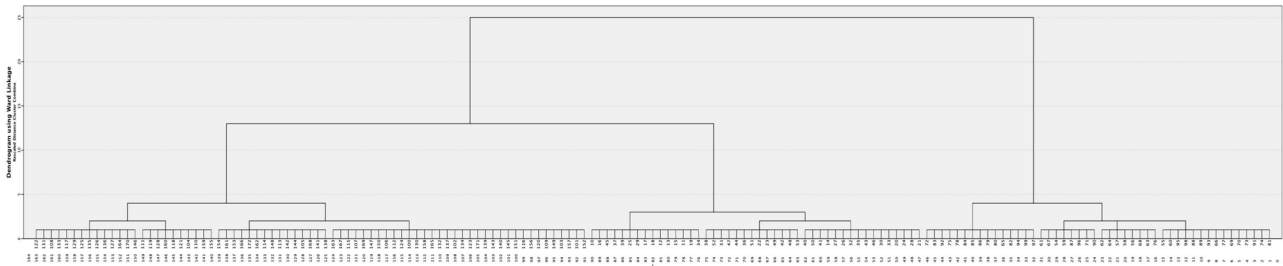
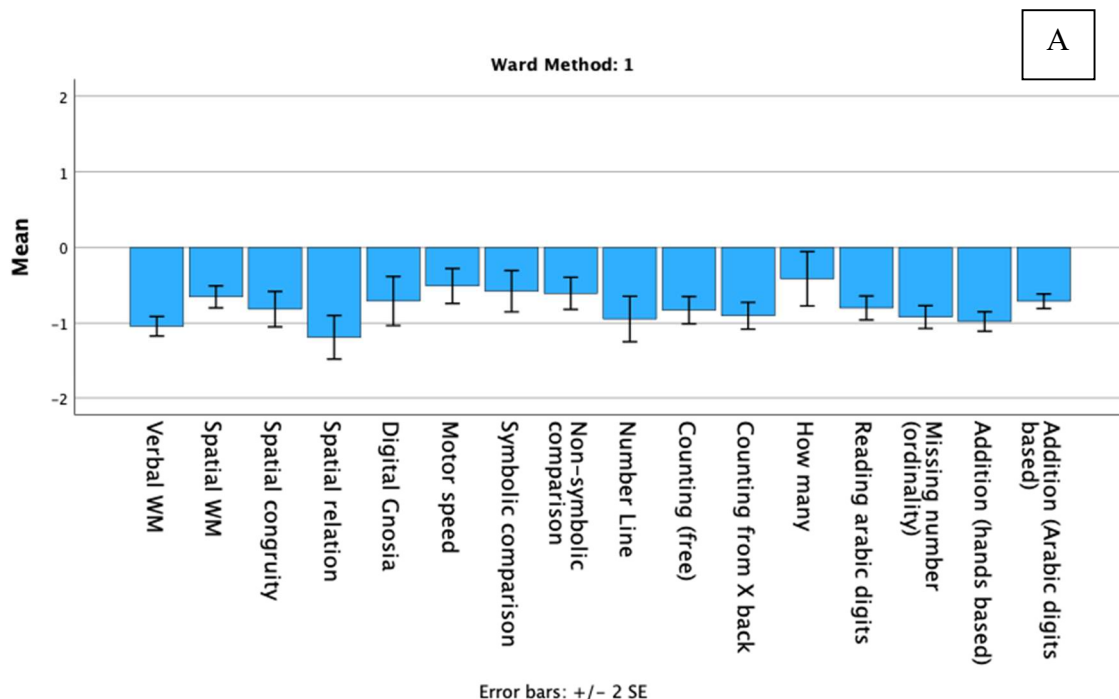
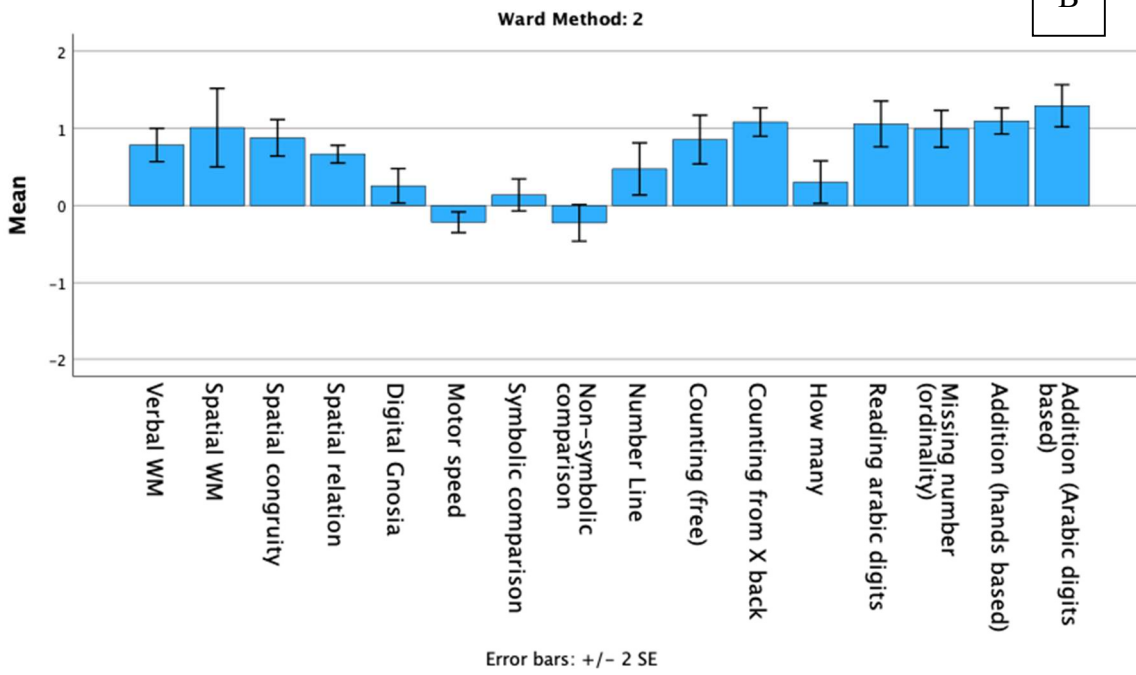


Figure 1. Dendrogramme de l'approche de regroupement hiérarchique agglomératif (méthode de Ward).

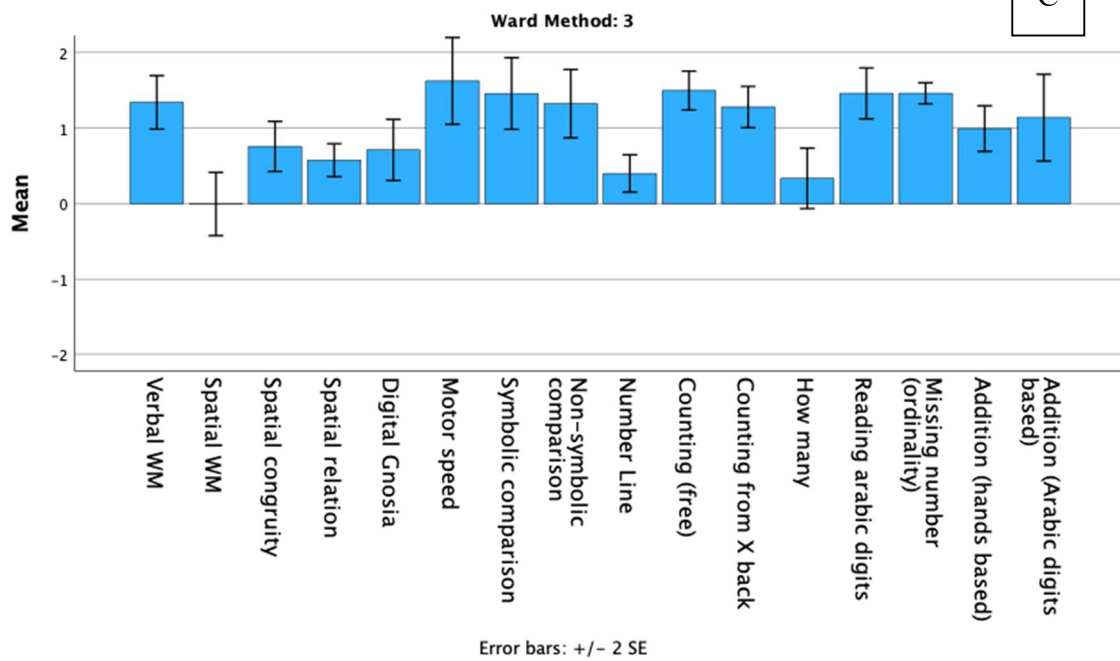
Le premier groupe (N = 44) comprenait des enfants d'âge préscolaire caractérisés par des performances globales faibles (figure 2, panneau A). Le deuxième groupe (N = 31) et le troisième groupe (N = 15) comprenaient des enfants d'âge préscolaire caractérisés par des performances globalement fortes pour chaque tâche (figure 2, panneaux B et C, respectivement). Cependant, les compétences spécifiques au SNA étaient plus faibles pour le deuxième groupe (C). Le quatrième groupe (N = 73) est caractérisé par des performances moyennes (figure 2, panneau D). Dans ce dernier groupe, on remarque que les scores les plus faibles correspondent aux capacités spécifiques au domaine des mathématiques.



B



C



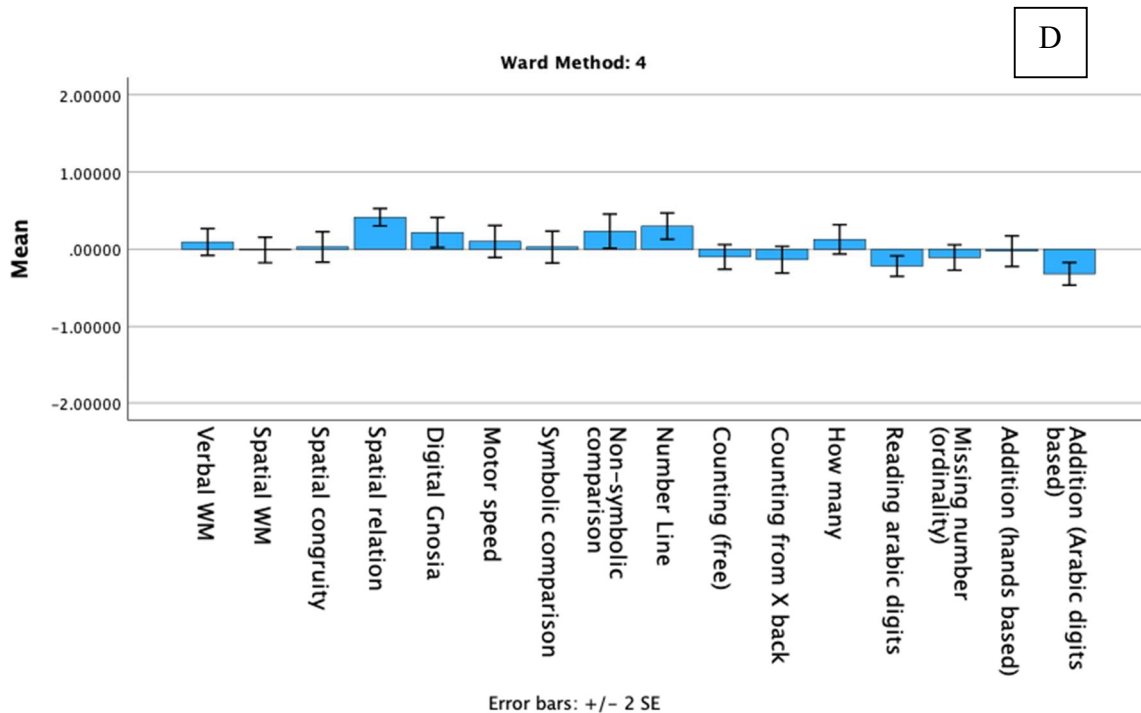


Figure 2. Quatre sous-groupes identifiés par le biais du dendrogramme.

Note. Verbal WM = Mémoire de travail verbale ; Spatial WM = Mémoire de travail visuo-spatiale. Le panneau A correspond aux performances des enfants du groupe 1 à l'ensemble des épreuves, le panneau B correspond aux performances des enfants du groupe 2 à l'ensemble des épreuves, le panneau C correspond aux performances des enfants du groupe 3 à l'ensemble des épreuves et le panneau D correspond aux performances des enfants du groupe 4 à l'ensemble des épreuves.

Dans un deuxième temps, nous sommes intéressés aux spécificités des enfants de chaque groupe.

Au regard des performances globalement plus faibles du groupe 1, nous nous sommes tout d'abord intéressés à l'âge des participants. Une analyse ANOVA nous a permis de mettre en évidence que les groupes différaient sur la variable âge ($F(3, 162) = 15.191$; $p < .001$). Les analyses post-hoc (comparaisons multiples de Bonferroni) ont permis de mettre en évidence que seul le groupe 1 (âge moyen : 56.23 mois, ET = 7.820) différait des autres groupes (âge moyen groupe 2 : 64.16 mois, ET = 4.390 ; âge moyen groupe 3 : 64.47 mois, ET = 5.436 ; âge moyen groupe 4 : 63.60 mois, ET = 6.186) et était significativement plus jeune ($ps < .001$). Notons encore que 68 % des enfants du premier groupe sont en MSM, contre 10 % des enfants du groupe 2, 20 % des enfants du groupe 3 et 23 % du groupe 4.

Nous nous sommes ensuite intéressés au profil des enfants du deuxième groupe. Nous pouvons remarquer qu'ils présentent de bonnes compétences de manière globale, cependant, ils présentent des scores plus faibles aux trois tâches de comparaison (figure 2, panneau B).

Le troisième groupe comporte des enfants présentant également de bonnes compétences de manière globale mais leurs capacités de mémoire de travail visuo-spatiale sont globalement plus faibles (figure 2, panneau C).

Enfin, dans le quatrième groupe, on peut constater que ces enfants, s'ils présentent des scores moyens, présentent de moins bonnes performances aux épreuves mathématiques par rapport aux autres épreuves. Nous avons alors isolé, au sein de ce groupe, les enfants les plus faibles en mathématiques (présentant des scores moyens inférieurs au percentile < -1). Au sein de cet échantillon ($N = 35$), nous retrouvons des faiblesses concernant les capacités visuo-spatiales (figure 3).

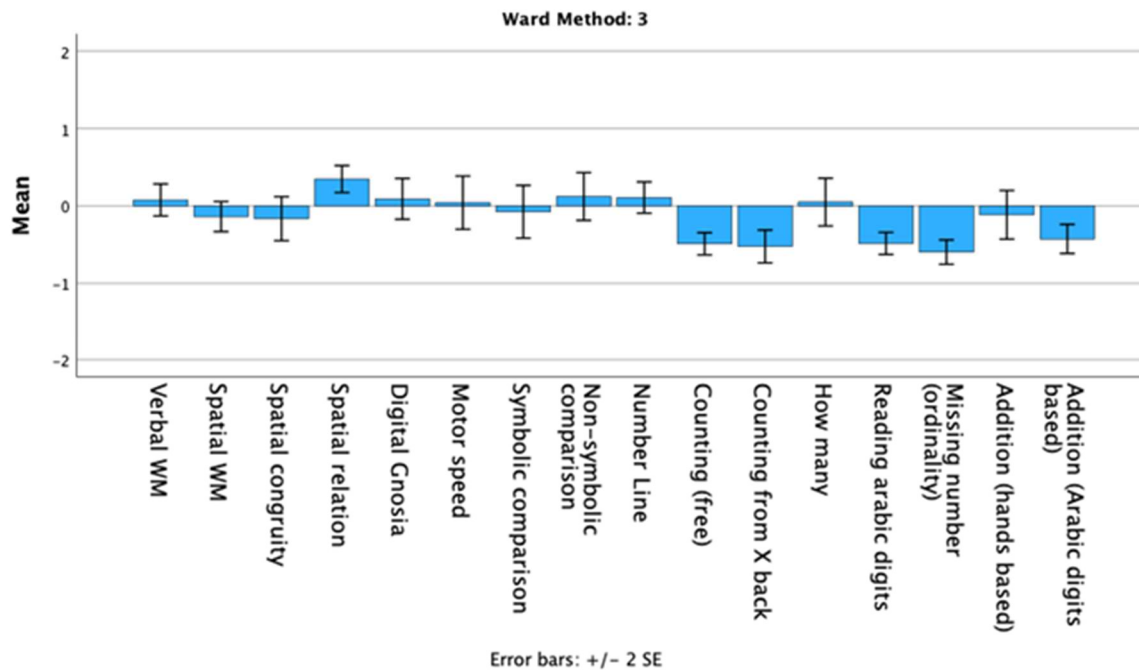


Figure 3. Enfants du groupe 4 ayant les performances les plus faibles en mathématiques.

Note. Verbal WM = Mémoire de travail verbale ; Spatial WM = Mémoire de travail visuo-spatiale.

Pour terminer, nous nous sommes intéressés aux QI des participants. Une analyse ANOVA nous a permis de mettre en évidence que les groupes différaient également sur cette variable ($F(3, 162) = 21.636$; $p < .001$). Les analyses post-hoc (comparaisons multiples de Bonferroni) ont permis de mettre en évidence que seuls les groupes 2 et 3 présentaient des scores équivalents (respectivement, $M = 13.84$, $ET = 2.011$; $M = 13.93$, $ET = 3.634$). Les groupes 1 et 4 présentant des scores inférieurs aux autres ($ps \leq .019$; respectivement, $M = 8.91$, $ET = 3.146$; $M = 11.95$, $ET = 2.676$).

Discussion

Cette étude visait à déterminer s'il était possible d'identifier différents profils cognitifs associés aux performances en mathématiques des enfants d'âge préscolaire. Nous avons pu mettre en évidence quatre sous-groupes de performances cognitivo-mathématiques. Le premier sous-groupe comporte les enfants ayant un niveau globalement faible à l'ensemble des épreuves, il s'agit des enfants les plus jeunes de notre échantillon. Le deuxième sous-groupe est composé d'enfants ayant un niveau globalement fort excepté dans les tâches impliquant le SNA où des difficultés apparaissent. Le troisième sous-groupe comprend des enfants ayant un niveau globalement fort avec, toutefois, des faiblesses de performance en mémoire de travail visuo-spatiale. Enfin, le quatrième sous-groupe comporte des enfants ayant un niveau globalement moyen, avec des performances en mathématiques en deçà des autres performances. Ainsi, nous avons identifié quatre groupes avec des performances globalement différentes. Certaines faiblesses sont néanmoins constatées et apparaissent donc comme étant importantes à repérer afin de proposer des exercices spécifiques et prévenir les difficultés. En effet, dans la littérature actuelle, la mémoire de travail (Noël, 2009; Simmons et al., 2012), les compétences visuo-spatiales (Zhang & Lin, 2015) et les compétences issues du SNA (Chen & Li, 2014; Fazio et al., 2014; Schneider et al., 2017) sont fréquemment associées aux performances mathématiques.

1. Les associations de mesures

Nous avons tout d'abord tenté d'identifier des associations entre les différents types de tâches. Il en est ressorti une forte corrélation de l'âge avec la majorité des variables. Ainsi, plus les participants étaient âgés, meilleures étaient leurs performances. Le QI était lui aussi corrélé avec l'ensemble des variables. En effet, les participants ayant obtenu un bon score de QI obtenaient aussi de bons scores à l'ensemble des tâches. Ainsi, ces deux variables pourraient correspondre à un potentiel facteur commun à l'ensemble des autres tâches de notre étude.

En contrôlant l'âge et le QI, des corrélations fortes entre la mémoire de travail verbale et l'ensemble des compétences mathématiques sont observées, supposant un lien entre la mémoire de travail et les compétences en mathématique, en accord avec la littérature (Noël, 2009; Simmons et al., 2012). De plus, les compétences mathématiques sont fortement associées entre elles mais aucun groupe de tâches plus spécifique ne se distingue. En effet, nous ne retrouvons pas, par exemple, de corrélation entre les tâches de dénombrement et de comptage. Cependant, nous relevons une association des tâches de comparaison symbolique et non symbolique entre elles, présumant un lien entre ces deux systèmes. Néanmoins, cela ne nous permet pas de vérifier la présence d'une influence du système symbolique sur le système non symbolique (Goffin & Ansari, 2019; Honoré & Noël, 2016), plutôt qu'une influence bidirectionnelle (Chen & Li, 2014; Schneider et al., 2017; Van Herwegen et al., 2018).

Lors de l'ACP, des associations de plusieurs mesures sont révélées par les deux premiers facteurs, le premier reprenant la quasi-totalité des tâches, le deuxième, la comparaison non-symbolique et la vitesse motrice. Cependant, le troisième facteur ne comprend qu'une seule mesure, celle-ci correspond au dénombrement et comporte seulement trois items. Cette épreuve de dénombrement permet d'évaluer plusieurs capacités, ainsi, le nombre d'items est insuffisant pour refléter toutes ces capacités. Il est donc possible que cette mesure ne soit pas totalement représentative des compétences de dénombrement des enfants. Une épreuve composée d'au moins 20 items

permettrait d'obtenir une meilleure consistance des résultats. Les propriétés psychométriques du test sont donc importantes pour mesurer de manière fiable une compétence donnée.

Nos difficultés de regroupement des épreuves pourraient aussi être dues à une ou plusieurs compétences qui n'ont pas été évaluées dans notre étude. En effet, plusieurs auteurs postulent l'existence d'une fonction exécutive unique chez les enfants d'âge préscolaire avec une différenciation vers l'âge de 5 ans (Lee et al., 2013; Miller et al., 2012; Traverso et al., 2021; Wiebe et al., 2011). Une évaluation fiable du rôle de ces fonctions exécutives dans l'acquisition de la connaissance des nombres ne pourrait alors être effectuée qu'à partir de 5 ans. Notre échantillon comprenant des enfants âgés de 3 à 5 ans, cela pourrait nous permettre de justifier cette difficile distinction entre les épreuves. La littérature étant peu fournie sur le sujet, notre étude apporte une preuve supplémentaire. De nouveaux paramètres seraient donc à prendre en compte dans les études ultérieures, en accord avec cette hypothèse.

2. Les différents profils de performance

Les épreuves évaluant la vitesse motrice et la comparaison non symbolique impliquent, respectivement, des capacités de traitement visuel et du SNA non symbolique. Dans notre étude, des faiblesses au niveau du SNA ont été observées chez les enfants ayant des performances globales fortes et notamment dans les tâches symboliques. Ainsi, l'hypothèse selon laquelle le SNA jouerait un rôle dans l'apprentissage du système symbolique et plus spécifiquement des capacités mathématiques précoces, n'est pas vérifiée. Cependant, ces résultats pourraient être expliqués par la tâche de comparaison non symbolique proposée qui ne permettrait pas de démontrer le lien entre le SNA et la réussite en mathématiques. En effet, cette tâche reflèterait davantage les compétences d'inhibition des enfants, c'est-à-dire leur capacité à filtrer les informations non pertinentes et amplifier celles qui sont pertinentes. Lors de tâches de comparaison non symboliques présentées sous forme d'ensembles de deux matrices de points, des variations de taille, de densité et de surface sont réalisées afin d'éviter l'utilisation de ces caractéristiques lors du choix de la matrice possédant le plus de points. Différents ensembles sont alors créés, certains pour lesquels la matrice possédant le plus de points est composée de points plus grands qui sont disposés sur une plus grande surface (essai congruent), d'autres pour lesquels la matrice possédant le plus de points est composée de points plus petits qui sont disposés sur une plus petite surface (essai incongruent). Lors de la résolution d'essais incongruents, les participants doivent d'abord inhiber une réponse basée sur les caractéristiques visuelles saillantes de l'ensemble avant de pouvoir se concentrer sur le nombre de points. Il serait donc pertinent, dans de futurs travaux, de tester les capacités du SNA des enfants à l'aide d'un autre type de tâche afin d'observer si les résultats restent identiques. Par exemple, une tâche de comparaison de séquences de tons utilisant des variables de taille, de densité et de surface différentes pour chaque séquence empêcherait les participants de comparer les séquences sur la base d'une de ces variables (Gillmore et al., 2013).

Par ailleurs, les résultats obtenus par le groupe d'enfants ayant un niveau globalement fort dans tous les domaines excepté en mémoire de travail visuo-spatiale permettent de corroborer l'hypothèse selon laquelle le système symbolique influencerait le système non symbolique (Goffin & Ansari, 2019; Honoré & Noël, 2016). Cependant, l'éventuelle présence d'un biais de sélection d'épreuve pour évaluer le SNA ne nous permet pas d'affirmer que le SNA joue véritablement un rôle dans l'acquisition du système symbolique. Ainsi, notre étude n'est pas en mesure de vérifier la présence d'une bidirectionnalité entre le système symbolique et le système non symbolique.

Dans la littérature, plusieurs auteurs postulent un effet prédictif de la mémoire de travail (Noël, 2009; Simmons et al., 2012) et des compétences visuo-spatiales (Zhang & Lin, 2015) sur les compétences numériques. La mémoire de travail visuo-spatiale serait notamment impliquée dans l'acquisition de la ligne numérique (Gunderson et al., 2012). En effet, les enfants doivent être capables de se représenter spatialement l'ordre des nombres et les quantités qui leur sont associées. Dans notre étude, nous avons isolé du quatrième groupe, les enfants ayant les compétences mathématiques les plus faibles. Nous constatons, au sein de cette population, également une faiblesse au niveau des compétences visuo-spatiales. Ainsi, ces résultats nous permettent d'étayer l'hypothèse d'un rôle prédictif de la mémoire de travail et des compétences visuo-spatiales sur les compétences numériques. Cependant, certains enfants qui ont un niveau global fort peuvent également présenter des faiblesses en mémoire de travail visuo-spatiale. Ces faiblesses peuvent être expliquées par l'étude récente de Coolen et ses collaborateurs (2023). Ils ont, en effet, démontré que la mémoire de travail visuo-spatiale jouerait un rôle plus important dans le développement de la réussite en mathématiques chez les enfants d'âge scolaire que chez les enfants d'âge préscolaire. Notre échantillon comprenant des enfants d'âge préscolaire, cela pourrait nous permettre de justifier les résultats obtenus.

Nos analyses de QI des participants nous ont permis de distinguer deux groupes, le premier ayant des scores se situant dans la moyenne et le second ayant des scores plus faibles. Le premier groupe comprend les sous-groupes de performances 2 et 3. Ceux-ci correspondent aux enfants ayant obtenus de bons résultats globaux. De plus, le second groupe est composé des sous-groupes 1 et 4, correspondant aux enfants ayant obtenus respectivement des résultats globalement faibles et moyens. Ainsi, les résultats en mathématiques obtenus par les enfants de notre échantillon corrélaient avec leur QI. Notre étude va donc dans le sens d'un effet prédictif du QI sur la réussite en mathématiques évoqué par plusieurs auteurs dans la littérature (Lin & Powell, 2022; Peng & Kievit, 2020).

Dans cette étude, nous nous sommes concentrés sur l'influence des compétences cognitives dans le développement des mathématiques. Or, lors du recueil des données, les parents des enfants sélectionnés avaient dû remplir un questionnaire sur les habitudes de leurs enfants par rapport aux jeux de société et à l'utilisation d'une tablette tactile. Ces données avaient pour but d'étudier les influences environnementales dans le développement des mathématiques et ont fait l'objet d'une autre étude. Associer l'étude des compétences cognitives et des influences environnementales dans le développement des mathématiques chez les enfants d'âge préscolaire permettrait la prise en compte de différences individuelles plus complètes. Ainsi, la considération d'un plus grand nombre de différences individuelles dans la constitution de profils de performances en mathématiques pourrait engendrer des sous-groupes de performance différents.

Conclusion

Notre étude avait pour objectif d'identifier des profils cognitifs en lien avec les performances en mathématiques des enfants d'âge préscolaire afin d'indiquer les éléments devant retenir notre attention dès le plus jeune âge, notamment chez les enfants ayant de faibles compétences mathématiques. Les résultats révèlent une hétérogénéité dans les performances des enfants d'âge préscolaire mais soulignent l'importance des capacités cognitives générales pour le développement des compétences mathématiques. Ainsi, cette étude nous permet de mettre en avant l'intérêt de proposer des stimulations précoces aux enfants présentant des difficultés en mathématiques.

Bibliographie

- Alloway, T. P., Gathercole, S. E., & Pickering, S. J. (2006). Verbal and Visuospatial Short-Term and Working Memory in Children : Are They Separable? *Child Development*, 77(6), 1698-1716.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2006.00968.x>
- Bachman, H. J., Miller, P., Elliott, L., Duong, S., Libertus, M., & Votruba-Drzal, E. (2022). Associations among socioeconomic status and preschool-aged children's, number skills, and spatial skills : The role of executive function. *Journal of Experimental Child Psychology*, 221, 105453. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2022.105453>
- Baroody, A. J., & Gatzke, M. R. (1991). The Estimation of Set Size by Potentially Gifted Kindergarten-Age Children. *Journal for Research in Mathematics Education*, 22(1), 59-68.
<https://doi.org/10.2307/749554>
- Barth, H., La Mont, K., Lipton, J., Dehaene, S., Kanwisher, N., & Spelke, E. (2006). Non-symbolic arithmetic in adults and young children. *Cognition*, 98(3), 199-222.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2004.09.011>
- Barth, H., La Mont, K., Lipton, J., & Spelke, E. S. (2005). Abstract number and arithmetic in preschool children. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(39), 14116-14121.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0505512102>
- Berch, D. B. (2005). Making Sense of Number Sense : Implications for Children With Mathematical Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 38(4), 333-339.
<https://doi.org/10.1177/00222194050380040901>
- Bernabini, L., Tobia, V., Guarini, A., & Bonifacci, P. (2020). Predictors of Children's Early Numeracy : Environmental Variables, Intergenerational Pathways, and Children's Cognitive, Linguistic, and Non-symbolic Number Skills. *Frontiers in Psychology*, 11, 505065.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.505065>

- Brankaer, C., Ghesquière, P., & De Smedt, B. (2017). Symbolic magnitude processing in elementary school children : A group administered paper-and-pencil measure (SYMP Test). *Behavior Research Methods*, 49(4), 1361-1373. <https://doi.org/10.3758/s13428-016-0792-3>
- Case, R., & Griffin, S. (1990). Child Cognitive Development : The Role of Central Conceptual Structures in the Development of Scientific and Social Thought. In C.-A. Hauert (Éd.), *Advances in Psychology* (Vol. 64, p. 193-230). North-Holland. [https://doi.org/10.1016/S0166-4115\(08\)60099-0](https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)60099-0)
- Caviola, S., Mammarella, I. C., Cornoldi, C., & Lucangeli, D. (2012). The involvement of working memory in children's exact and approximate mental addition. *Journal of Experimental Child Psychology*, 112(2), 141-160. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2012.02.005>
- Chen, Q., & Li, J. (2014). Association between individual differences in non-symbolic number acuity and math performance : A meta-analysis. *Acta Psychologica*, 148, 163-172. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2014.01.016>
- Coolen, I. E. J. I., & Castronovo, J. (2023). How Memory Counts in Mathematical Development. *Journal of Cognition*, 6(1), Article 1. <https://doi.org/10.5334/joc.248>
- Cornu, V., Hornung, C., Schiltz, C., & Martin, R. (2017). How Do Different Aspects of Spatial Skills Relate to Early Arithmetic and Number Line Estimation? *Journal of Numerical Cognition*, 3(2), 309-343. <https://doi.org/10.5964/jnc.v3i2.36>
- Cornu, V., Schiltz, C., Martin, R., & Hornung, C. (2018). Visuo-spatial abilities are key for young children's verbal number skills. *Journal of Experimental Child Psychology*, 166, 604-620. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.09.006>
- Costa, H. M., Nicholson, B., Donlan, C., & Van Herwegen, J. (2018). Low performance on mathematical tasks in preschoolers : The importance of domain-general and domain-specific abilities. *Journal of Intellectual Disability Research*, 62(4), 292-302. <https://doi.org/10.1111/jir.12465>

- Fayol, M. (2018). *L'acquisition du nombre* (Presses Universitaires de France). <https://www-cairn-info.ressources-electroniques.univ-lille.fr/l-acquisition-du-nombre--9782130799894.htm>
- Fayol, M., & Seron, X. (2005). About numerical representations : Insights from neuropsychological, experimental, and developmental studies. In *Handbook of mathematical cognition* (p. 3-22). Psychology Press.
- Fazio, L. K., Bailey, D. H., Thompson, C. A., & Siegler, R. S. (2014). Relations of different types of numerical magnitude representations to each other and to mathematics achievement. *Journal of Experimental Child Psychology*, 123, 53-72. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2014.01.013>
- Galifret-Granjon, N. (1964). Tests des gnosies digitales. In R. Zazzo, N. Galifret-Granjon, & M. Stambak (Eds.), *Manuel pour l'examen psychologique de l'enfant* (pp. 57-85). Delachaux et Niestlé.
- Geary, D. C. (2011). Cognitive predictors of achievement growth in mathematics : A 5-year longitudinal study. *Developmental Psychology*, 47(6), 1539-1552. <https://doi.org/10.1037/a0025510>
- Geary, D. C., Hamson, C. O., & Hoard, M. K. (2000). Numerical and Arithmetical Cognition : A Longitudinal Study of Process and Concept Deficits in Children with Learning Disability. *Journal of Experimental Child Psychology*, 77(3), 236-263. <https://doi.org/10.1006/jecp.2000.2561>
- Geary, D. C., Hoard, M. K., Nugent, L., & Bailey, D. H. (2013). Adolescents' Functional Numeracy Is Predicted by Their School Entry Number System Knowledge. *PLOS ONE*, 8(1), e54651. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0054651>
- Gelman, R., & Gallistel, C. R. (1986). *The Child's Understanding of Number*. Harvard University Press.
- Gelman, R., & Meck, E. (1983). Preschoolers' counting : Principles before skill. *Cognition*, 13(3), 343-359. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(83\)90014-8](https://doi.org/10.1016/0010-0277(83)90014-8)

- Gilmore, C., Attridge, N., Clayton, S., Cragg, L., Johnson, S., Marlow, N., Simms, V., & Inglis, M. (2013). Individual Differences in Inhibitory Control, Not Non-Verbal Number Acuity, Correlate with Mathematics Achievement. *PLOS ONE*, 8(6), e67374. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067374>
- Goffin, C., & Ansari, D. (2019). How Are Symbols and Nonsymbolic Numerical Magnitudes Related? Exploring Bidirectional Relationships in Early Numeracy. *Mind, Brain, and Education*, 13(3), 143-156. <https://doi.org/10.1111/mbe.12206>
- Griffin, S. (2004). Building number sense with Number Worlds : A mathematics program for young children. *Early Childhood Research Quarterly*, 19(1), 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2004.01.012>
- Gunderson, E. A., Ramirez, G., Beilock, S. L., & Levine, S. C. (2012). The relation between spatial skill and early number knowledge : The role of the linear number line. *Developmental Psychology*, 48(5), 1229-1241. <https://doi.org/10.1037/a0027433>
- Hammill, D. D., Pearson, N. A., & Voress, J. K. (1993). Developmental Test of Visual Perception (2nd ed). Austin, TX: PRO-ED.
- Hassinger-Das, B., Jordan, N. C., Glutting, J., Irwin, C., & Dyson, N. (2014). Domain-general mediators of the relation between kindergarten number sense and first-grade mathematics achievement. *Journal of Experimental Child Psychology*, 118, 78-92. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.09.008>
- Honoré, N., & Noël, M.-P. (2016). Improving Preschoolers' Arithmetic through Number Magnitude Training : The Impact of Non-Symbolic and Symbolic Training. *PLOS ONE*, 11(11), e0166685. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166685>
- Huttenlocher, J., Jordan, N. C., & Levine, S. C. (1994). A mental model for early arithmetic. *Journal of Experimental Psychology: General*, 123(3), 284-296. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.123.3.284>

- Jordan, N. C., Kaplan, D., Ramineni, C., & Locuniak, M. N. (2009). Early math matters : Kindergarten number competence and later mathematics outcomes. *Developmental Psychology*, 45(3), 850-867. <https://doi.org/10.1037/a0014939>
- Kaufmann, L., Wood, G., Rubinsten, O., & Henik, A. (2011). Meta-Analyses of Developmental fMRI Studies Investigating Typical and Atypical Trajectories of Number Processing and Calculation. *Developmental Neuropsychology*, 36(6), 763-787. <https://doi.org/10.1080/87565641.2010.549884>
- Krajcsi, A., Fedele, M., & Reynvoet, B. (2023). The approximate number system cannot be the leading factor in the acquisition of the first symbolic numbers. *Cognitive Development*, 65, 101285. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2022.101285>
- Lafay, A., St-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (2013). Développement des systèmes numériques non symboliques et prédicteurs de réussite mathématique. *Glossa*, 112, 1-17.
- Laski, E. V., & Siegler, R. S. (2007). Is 27 a Big Number? Correlational and Causal Connections Among Numerical Categorization, Number Line Estimation, and Numerical Magnitude Comparison. *Child Development*, 78(6), 1723-1743. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.01087.x>
- Lee, K., Bull, R., & Ho, R. M. H. (2013). Developmental Changes in Executive Functioning. *Child Development*, 84(6), 1933-1953. <https://doi.org/10.1111/cdev.12096>
- Lin, X., & Powell, S. R. (2022). The Roles of Initial Mathematics, Reading, and Cognitive Skills in Subsequent Mathematics Performance : A Meta-Analytic Structural Equation Modeling Approach. *Review of Educational Research*, 92(2), 288-325. <https://doi.org/10.3102/00346543211054576>
- Lipton, J. S., & Spelke, E. S. (2005). Preschool Children's Mapping of Number Words to Nonsymbolic Numerosities. *Child Development*, 76(5), 978-988. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2005.00891.x>

- Lipton, J. S., & Spelke, E. S. (2006). Preschool children master the logic of number word meanings. *Cognition*, 98(3), B57-B66. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2004.09.013>
- Lourenco, S. F., & Longo, M. R. (2010). General Magnitude Representation in Human Infants. *Psychological Science*, 21(6), 873-881. <https://doi.org/10.1177/0956797610370158>
- Mazzocco, M. M. M., & Thompson, R. E. (2005). Kindergarten Predictors of Math Learning Disability. *Learning Disabilities Research & Practice*, 20(3), 142-155. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5826.2005.00129.x>
- Miller, Michael R., Giesbrecht, Gerald F., Müller, U., McInerney, Robert J., & Kerns, Kimberly A. (2012). A Latent Variable Approach to Determining the Structure of Executive Function in Preschool Children. *Journal of Cognition & Development*, 13(3), 395-423. <https://doi.org/10.1080/15248372.2011.585478>
- Mix, K. S., & Cheng, Y.-L. (2012). Chapter 6 - The Relation Between Space and Math : Developmental and Educational Implications. In J. B. Benson (Éd.), *Advances in Child Development and Behavior* (Vol. 42, p. 197-243). JAI. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-394388-0.00006-X>
- Mix, K. S., Levine, S. C., & Huttenlocher, J. (1999). Early fraction calculation ability. *Developmental Psychology*, 35(1), 164-174. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.35.1.164>
- Mussolin, C., Nys, J., Leybaert, J., & Content, A. (2012). Relationships between approximate number system acuity and early symbolic number abilities. *Trends in Neuroscience and Education*, 1(1), 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2012.09.003>
- Noël, M.-P. (2009). Counting on working memory when learning to count and to add : A preschool study. *Developmental Psychology*, 45(6), 1630-1643. <https://doi.org/10.1037/a0016224>
- Nosworthy, N., Bugden, S., Archibald, L., Evans, B., & Ansari, D. (2013). A Two-Minute Paper-and-Pencil Test of Symbolic and Nonsymbolic Numerical Magnitude Processing Explains Variability in Primary School Children's Arithmetic Competence. *PLoS ONE*, 8(7), 1-12. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067918>

- Passolunghi, M. C., Mammarella, I. C., & Altoè, G. (2008). Cognitive Abilities as Precursors of the Early Acquisition of Mathematical Skills During First Through Second Grades. *Developmental Neuropsychology*, 33(3), 229-250. <https://doi.org/10.1080/87565640801982320>
- Peng, P., & Kievit, R. A. (2020). The Development of Academic Achievement and Cognitive Abilities : A Bidirectional Perspective. *Child Development Perspectives*, 14(1), 15-20. <https://doi.org/10.1111/cdep.12352>
- Piazza, M. (2010). Neurocognitive start-up tools for symbolic number representations. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(12), 542-551. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2010.09.008>
- Piazza, M., De Feo, V., Panzeri, S., & Dehaene, S. (2018). Learning to focus on number. *Cognition*, 181, 35-45. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.07.011>
- Raghubar, K. P., Barnes, M. A., & Hecht, S. A. (2010). Working memory and mathematics : A review of developmental, individual difference, and cognitive approaches. *Learning and Individual Differences*, 20(2), 110-122. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2009.10.005>
- Räsänen, P., Salminen, J., Wilson, A. J., Aunio, P., & Dehaene, S. (2009). Computer-assisted intervention for children with low numeracy skills. *Cognitive Development*, 24(4), 450-472. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2009.09.003>
- Rousselle, L., & Noël, M.-P. (2008). The development of automatic numerosity processing in preschoolers : Evidence for numerosity-perceptual interference. *Developmental Psychology*, 44(2), 544-560. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.44.2.544>
- Scalise, N. R., Daubert, E. N., & Ramani, G. B. (2020). Benefits of Playing Numerical Card Games on Head Start Children's Mathematical Skills. *Journal of Experimental Education*, 88(2), 200-220. <https://doi.org/10.1080/00220973.2019.1581721>
- Schleifer, P., & Landerl, K. (2011). Subitizing and counting in typical and atypical development. *Developmental Science*, 14(2), 280-291. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.00976.x>

- Schneider, M., Beeres, K., Coban, L., Merz, S., Susan Schmidt, S., Stricker, J., & De Smedt, B. (2017). Associations of non-symbolic and symbolic numerical magnitude processing with mathematical competence: A meta-analysis. *Developmental Science*, 20(3), e12372. <https://doi.org/10.1111/desc.12372>
- Siegler, R. S., & Booth, J. L. (2004). Development of Numerical Estimation in Young Children. *Child Development*, 75(2), 428-444. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2004.00684.x>
- Simmons, F. R., Willis, C., & Adams, A.-M. (2012). Different components of working memory have different relationships with different mathematical skills. *Journal of Experimental Child Psychology*, 111(2), 139-155. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.08.011>
- Stefanelli, S., & Alloway, T. P. (2020). Mathematical skills and working memory profile of children with borderline intellectual functioning. *Journal of Intellectual Disabilities*, 24(3), 358-366. <https://doi.org/10.1177/1744629518821251>
- Stock, P., Desoete, A., & Roeyers, H. (2009). Predicting Arithmetic Abilities: The Role of Preparatory Arithmetic Markers and Intelligence. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 27(3), 237-251. <https://doi.org/10.1177/0734282908330587>
- Szucs, D., Devine, A., Soltesz, F., Nobes, A., & Gabriel, F. (2013). Developmental dyscalculia is related to visuo-spatial memory and inhibition impairment. *Cortex*, 49(10), 2674-2688. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2013.06.007>
- Tobia, V., Bonifacci, P., & Marzocchi, G. M. (2021). Symbolic versus non-symbolic training for improving early numeracy in preschoolers at risk of developing difficulties in mathematics. *Research in Developmental Disabilities*, 111, 103893. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2021.103893>
- Traverso, L., Tonizzi, I., Usai, M. C., & Viterbori, P. (2021). The relationship of working memory and inhibition with different number knowledge skills in preschool children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 203, 105014. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2020.105014>

- Van Herwegen, J., Costa, H. M., Nicholson, B., & Donlan, C. (2018). Improving number abilities in low achieving preschoolers : Symbolic versus non-symbolic training programs. *Research in Developmental Disabilities*, 77, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2018.03.011>
- Von Aster, M. G., & Shalev, R. S. (2007). Number development and developmental dyscalculia. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 49(11), 868-873. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2007.00868.x>
- Wang, J. (Jenny), Odic, D., Halberda, J., & Feigenson, L. (2016). Changing the precision of preschoolers' approximate number system representations changes their symbolic math performance. *Journal of Experimental Child Psychology*, 147, 82-99. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2016.03.002>
- Wechsler, D, & Naglieri, J. (2009). WNV : Echelle non verbale d'intelligence de Wechsler. [Subtest des matrices]. Paris, France : ECPA.
- Wiebe, S. A., Sheffield, T., Nelson, J. M., Clark, C. A. C., Chevalier, N., & Espy, K. A. (2011). The structure of executive function in 3-year-olds. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(3), 436-452. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.08.008>
- Wynn, K. (1990). Children's understanding of counting. *Cognition*, 36(2), 155-193. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(90\)90003-3](https://doi.org/10.1016/0010-0277(90)90003-3)
- Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, 358(6389), Article 6389. <https://doi.org/10.1038/358749a0>
- Xu, F., & Spelke, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74(1), B1-B11. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(99\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(99)00066-9)
- Zhang, X., & Lin, D. (2015). Pathways to arithmetic : The role of visual-spatial and language skills in written arithmetic, arithmetic word problems, and nonsymbolic arithmetic. *Contemporary Educational Psychology*, 41, 188-197. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2015.01.005>