

Étude de validité de la batterie Examath 5-8 chez les enfants en fin de MSM.

Autrices :

Hermine Villalard¹
Marie Christel Helloin^{1,2}
Anne Lafay^{1,3,4}

Affiliations :

¹ Orthophoniste, France

² Professeure associée des universités
au Département d'Orthophonie de
l'Université de Rouen Normandie, France

³ Maîtresse de conférences universitaire,
département de psychologie de
l'Université Savoie Mont Blanc, Laboratoire
de Psychologie et NeuroCognition du
CNRS (LPNC-UMR CNRS 5105), Chambéry,
France

⁴ Chercheuse associée, département
d'éducation, Concordia University,
Montréal, QC, Canada

Autrice de correspondance :

Hermine Villalard
hermine.villalard@gmail.com

Dates :

Soumission : 09/02/2024

Acceptation : 25/07/2024

Publication : 24/10/2024

Comment citer cet article :

Villalard, H., Helloin, M. C. & Lafay, A. (2024).
Étude de validité de la batterie Examath 5-8
chez les enfants en fin de MSM. *Glossa*, 141,
29-49. <https://doi.org/10.61989/91jpmc48>

e-ISSN : 2117-7155

Licence :

© Copyright Hermine Villalard, Marie
Christel Helloin, Anne Lafay, 2024
Ce travail est disponible sous licence
[Creative Commons Attribution 4.0
International](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).



Contexte : Des prédictors du développement des habiletés mathématiques sont présents dès la fin de MSM. Ainsi, une évaluation des compétences mathématiques chez les enfants de cette classe d'âge est utile afin de diagnostiquer précocement un trouble ou dépister un risque de trouble spécifique des apprentissages en mathématiques en cas de suspicion de difficultés. À l'heure actuelle, il n'existe pas de tests récents permettant une évaluation approfondie des compétences chez les enfants de cet âge. Par ailleurs, la batterie informatisée Examath 5-8 démontre de bonnes qualités psychométriques chez les enfants de la GSM au CE2 et montre des scores saturés dès la fin de GSM pour des tâches correspondant à des compétences développementales précoces.

Objectif : L'objectif de cette recherche était d'évaluer l'acceptabilité, l'accessibilité et la validité de construit d'une sélection d'épreuves de la batterie Examath 5-8 en fin de MSM.

Méthode : L'échantillon était composé de 36 enfants en fin de MSM sans suivi orthophonique pour des difficultés en mathématiques ou langagières.

Résultats : Les résultats ont montré une bonne acceptabilité par les enfants, une bonne accessibilité pour le niveau MSM et une bonne validité de construit en lien avec le niveau scolaire (comparaison avec les GSM). D'autres études seront nécessaires pour évaluer la sensibilité et la validité discriminante de ces épreuves afin de garantir le pouvoir diagnostique de la batterie pour cette classe d'âge.

Mots-clefs : évaluation précoce, prédictors numériques, Trouble spécifique des apprentissages mathématiques, Examath 5-8.

Validity of the Examath 5-8 battery in 4-5-year-old children.

Context: Predictors of mathematical skill development are present before the kindergarten at 4-5 years old. Therefore, an assessment of mathematical skills in children of this age is useful in order to diagnose a specific learning disability or to screen a risk of such a disability in mathematics at an early stage in case of suspected difficulties. Currently, there are no recent test allowing for a thorough evaluation of skills in children of this age. Moreover, the Examath 5-8 battery demonstrates good psychometric properties in children from kindergarten to third grade and shows saturated scores at the end of kindergarten on tasks corresponding to early developmental skills.

Objective: The objective of this research was therefore to investigate the acceptability, the accessibility, and the construct validity of a selection of tests from the Examath 5-8 battery in 4-5-year-old children.

Method: The sample was 36 4-5-year-old children without speech-and-language therapy for mathematical or language difficulties.

Results: The results showed good acceptability by children, good accessibility for the 4-5-year-old children, and good construct validity linked to the grade level (in comparison with 5-6-year-old children). Further studies will be needed to evaluate the sensitivity and discriminant validity of these tests to guarantee the diagnosis power of the battery for this age group.

Key-words: early assessment, numerical predictors, Mathematics Learning Disability, Examath 5-8.

INTRODUCTION

Les prédicteurs du développement mathématique en fin de MSM

Il existe plusieurs prédicteurs numériques nécessaires au bon développement des mathématiques.

D'après le modèle du triple code, il existe trois systèmes de représentation du nombre nécessaires au traitement cognitif numérique chez l'adulte (Dehaene, 1992) qui se développent en quatre phases (Von Aster & Shalev, 2007). Le premier système, dit système analogique, est inné. Il est dit asymbolique et sémantique, il permet de traiter les quantités et porte le sens du nombre. Le sens du nombre repose sur deux systèmes intuitifs et indépendants au sein de ce système : le système numérique précis et le système numérique approximatif. Ces deux systèmes permettent une perception précise de petites quantités et l'estimation approximative de grandes quantités (Feigenson et al., 2004). Le fonctionnement du **sens du nombre** est encore à ce jour sujet à débat : alors que certains clament que la numérosité est traitée pour elle-même, d'autres suggèrent que ce traitement reposerait sur le traitement de variables continues comme la surface ou la densité (voir Wilkey & Ansari, 2020 pour une revue).

Spécifiquement, le système numérique précis (SNP) permet le **subitizing**, capacité innée à percevoir rapidement et exactement des petites quantités sans recours au comptage. Le subitizing naturel permet d'appréhender des quantités allant de 1 à 3 (Fayol et al., 2004) et pouvant aller jusqu'à 4 (Krajcsi et al., 2013). Le rang du subitizing peut s'étendre jusqu'à six éléments pour un nombre de patterns limité par exposition répétée (Mandler & Shebo, 1982). Le subitizing s'étend entre 4 et 6 ans, la différence de performance entre ces deux classes d'âge est significative à partir de quatre éléments à subitiser (Formoso et al., 2017). La capacité à subitiser quatre éléments pourrait ainsi constituer une étape importante puisque l'étendue du rang de subitizing est significativement associée aux performances mathématiques en maternelle, c'est-à-dire que le subitizing est fondamental pour le développement des compétences mathématiques dans la petite enfance (Yun et al., 2011).

Le système numérique approximatif (SNA) permet l'**estimation** des quantités afin de comparer deux

quantités. Un enfant de 4 ans est en moyenne capable de discriminer deux quantités dont le ratio weber est .383, correspondant approximativement à la comparaison des quantités 9 et 12¹ (Halberda & Feigenson, 2008). L'acuité numérique se développe avec l'âge. Le SNA mesuré à l'âge préscolaire prédit les performances en mathématiques à l'école à l'âge de 6 ans (Mazzocco et al., 2011). Toutefois, la nature de la relation entre les performances liées au SNA et les performances arithmétiques est encore débattue (voir Vogel & de Smedt, 2021).

Les deux autres systèmes de représentation du nombre, le système auditif oral et le système visuel indo-arabe, sont symboliques et asémantiques, c'est-à-dire qu'ils ne portent pas de sens en tant que tel, mais réfèrent à une quantité analogique mentale (Dehaene, 1992). Le système auditif oral s'acquiert dans la petite enfance en apprenant la **comptine numérique orale** et en faisant le lien entre les petites quantités et les étiquettes mots-nombres. La comptine numérique orale est la suite de mots-nombres dans l'ordre que l'enfant peut mémoriser et énoncer. Elle se développe entre 4 et 8 ans selon quatre stades (Fuson, 1988). À 3 ans, l'enfant peut réciter la comptine numérique depuis 1 sans coupure. À partir de 4-5 ans, il peut individualiser les termes et les associer aux objets. En langue française, pour une utilisation aboutie des nombres dans la comptine, les enfants doivent connaître par cœur les chiffres de 1 à 9, puis les mots-nombres de 11 à 16. Ensuite, les enfants doivent connaître les règles nécessaires à l'élaboration et à l'apprentissage des nombres plus grands que 16 afin de limiter le coût mnésique (Lecointre et al., 2005). Selon Carey (2004), la comptine numérique orale joue un rôle d'agent du développement du nombre et de son sens, elle permet d'associer la quantité perçue avec le mot-nombre. La comptine numérique permet à l'enfant de comprendre la notion de succession (Schneider et al., 2020) qui est nécessaire à la mise en place du dénombrement et des capacités arithmétiques d'addition et de soustraction.

Le système visuel arabe est le dernier système à se mettre en place : l'enfant apprend à l'école les **symboles arabes** (c'est-à-dire les chiffres) et le fonctionnement du système de numération. Il apprend ainsi à faire le lien entre la numérosité perçue, les étiquettes mots-nombres et le code arabe. En effet, les compétences numériques

1 Le ratio de Weber (ou fraction de Weber) est égal à la différence entre les deux nombres divisée par le plus petit nombre, par exemple pour calculer le ratio de Weber 9:12, on fera $(12-9)/9 \approx .333$.

asymboliques et les connaissances symboliques s'influencent mutuellement. L'influence des compétences numériques symboliques est prédominante sur l'accroissement de la précision numérique (c'est-à-dire acuité numérique ; Goffin & Ansari, 2019). Le développement des codes numériques symboliques est important pour le développement mathématique ultérieur (Mononen & Niemivirta, 2023). Une fois ces systèmes mis en place, l'enfant devient capable de placer les nombres arabes sur une **ligne numérique**, manifestation de l'organisation de ses représentations mentales des nombres. Cette étape constitue la dernière phase de développement des représentations numériques (Von Aster & Shalev, 2007).

Un autre prédicteur important du développement mathématique est le **dénombrement**, à savoir l'action qui consiste à déterminer le nombre d'éléments d'une collection à partir du comptage ou des techniques de calculs combinatoires et de la cardinalité. Gelman et Gallistel (1978) ont décrit cinq principes nécessaires à sa mise en place. Le principe d'ordre stable de la comptine numérique consiste à énoncer la suite des étiquettes mots-nombres de manière ordonnée et fixe. Le principe de correspondance terme à terme consiste à associer chaque élément de la collection à une étiquette mot-nombre. Pour cela, l'enfant peut mettre en place une stratégie oro-manuelle avec le pointage digital ou une stratégie oro-visuelle avec le regard. Le principe de cardinalité revient à comprendre que le dernier mot-nombre énoncé représente le cardinal de la collection. Le principe de non-pertinence de l'ordre repose sur la compréhension que l'ordre du dénombrement n'a pas d'incidence sur le cardinal. Enfin, le principe d'abstraction consiste à pouvoir compter ensemble des ensembles différents. Van De Rijt et Van Luit (1998) décrivent le développement de ces principes. La première étape est le comptage acoustique : la comptine est perçue par l'enfant comme une suite de sons sans but apparent. Lors de la deuxième étape, se développe la comptine numérique asynchrone : l'enfant récite les mots-nombres sans association avec des objets (maîtrise du principe d'ordre stable de la comptine numérique). La troisième étape est le comptage synchrone : l'enfant peut associer les mots-nombres avec des objets grâce à la correspondance terme à terme. La quatrième étape est le comptage résultat : à ce stade, l'enfant comprend que le dernier mot-

nombre correspond au nombre d'éléments de l'ensemble compté (maîtrise du principe de cardinalité). Il peut développer au cinquième stade le comptage raccourci qui lui permet de dénombrer plus rapidement et plus efficacement en subitisant un sous-ensemble et en surcomptant le reste des objets. Au sixième stade, les principes d'abstraction et de non-pertinence de l'ordre sont en place, l'enfant atteint un comptage fluide et flexible qui permet de compter n'importe quel ensemble d'objets dans n'importe quel ordre. Le principe d'abstraction se met en place tardivement. Il nécessite d'avoir acquis deux notions : le comptage résultat ainsi que la capacité à identifier et à se représenter l'unité (Wege et al., 2023). Ainsi, l'habileté en dénombrement en maternelle est prédictive du développement mathématique en CP (Jordan et al., 2007). Les stades d'acquisition des principes de dénombrement donnent des repères développementaux mais évaluer ces principes seulement par la production d'un dénombrement peut sous-estimer les capacités des enfants d'âge préscolaire entre 3 et 5 ans. Il est donc essentiel d'évaluer également leur compréhension (Johnson et al., 2019). En effet, la réussite en maternelle à une épreuve de jugement du respect des principes de dénombrement d'un personnage est prédictive du développement mathématique en fin de CP (Jordan et al., 2007).

Par ailleurs, les enfants de 4 ans montrent une **compréhension intuitive des opérations** d'ajout et de retrait. Ils sont capables de déterminer les résultats de ce type d'opération dans des problèmes non-verbaux. Cette capacité est observée précocement chez les bébés (Wynn, 1992), suggérant une certaine innéité de la compétence, mais elle est aussi basée sur des expériences de la vie quotidienne (Levine et al., 1992). Les enfants de 5 ans réussissent aussi bien les opérations additives que les tâches de comparaison de quantités. Ainsi, ces compétences précèdent et sont un appui pour l'enseignement symbolique des mathématiques (Barth et al., 2005).

De plus, les enfants de 2 à 6 ans utilisent déjà du **vocabulaire mathématique** dans la vie quotidienne (par exemple : cet arbre est très grand, j'ai beaucoup de petits pois dans mon assiette, le nuage a une forme de 5, etc.). À 4 ans, les enfants comprennent généralement les mots « premier », « deuxième », « dernier », « ensemble », « le moins », « le plus », « aucun », « chaque », « plusieurs » et « la moitié » (Boisseau, 2005). La compréhension du vocabulaire mathématique

est significativement associée à la plupart des compétences numériques et notamment le comptage verbal, la correspondance terme à terme, l'identification de chiffres, la cardinalité, la comparaison d'ensembles et/ou de nombres arabes ainsi que la connaissance de l'ordre des nombres (Hornburg et al., 2018 ; Lafay et al., 2023 ; Turan & de Smedt, 2023).

En résumé, les performances mathématiques des enfants sont prédites par les compétences en subitizing et en estimation de quantités, par la connaissance de la comptine numérique orale et les compétences en dénombrement, par la compréhension intuitive des opérations d'ajout et de retrait, par la compréhension et l'utilisation du vocabulaire mathématique en fin de MSM. Les repères d'âges indiqués dans les paragraphes précédents sont donnés à titre indicatif, à partir de la littérature scientifique, mais une hétérogénéité entre les jeunes enfants existe.

État des lieux des outils d'évaluation en fin de MSM

Des outils standardisés sont nécessaires pour évaluer les capacités mathématiques. Ces outils doivent permettre d'objectiver les difficultés mathématiques et un déficit des habiletés numériques de base pour identifier un trouble ou un risque de trouble cognitif numérique et envisager le diagnostic de TSAM (Lafay et al., 2014). Des outils standardisés, valides, fidèles et normés sont nécessaires pour la pratique d'évaluation (Lafay & Cattini, 2018). En particulier, la validité réfère au degré avec lequel un test mesure ce qu'il prétend mesurer. Il existe plusieurs types de validité. La validité de contenu, ou validité théorique, réfère à la pertinence du contenu du test, mais on ne peut pas affirmer qu'un test est valide pour toujours : la conception de l'outil et le choix des items qui le composent doivent reposer sur les modèles théoriques valides de la fonction cognitive évaluée. La validité de critère renvoie au fait que la batterie mesure bien la performance adéquate par rapport à un critère de référence. La validité de construit est le fait qu'un test mesure un construit théorique. La validité en lien avec les caractéristiques de l'individu réfère au fait que la mesure de ce construit doit être sensible à une relation comme l'âge, le sexe, la pathologie, etc.

À ce jour, quelques batteries permettent d'évaluer les capacités mathématiques générales chez les jeunes enfants de 4 ans et demi à 5 ans (voir Cattini & Lafay, 2024 ; Lafay & Cattini, 2018 ; Lafay et al., 2014 pour des recensions et des analyses systématiques). Les batteries de tests Exalang 3-6² (Helloin & Thibault, 2006), la NEE-L (Chevrie-Muller & Plaza, 2001) et l'UDN 2 (Meljac & Lemmel, 2007) permettent d'évaluer le vocabulaire mathématique par exemple. Tedi-MATH (Van Nieuwenhoven et al., 2001) et Exalang 3-6 permettent également d'évaluer le dénombrement, mais sur très peu d'items ou seulement en production. L'UDN 2 permet aussi d'évaluer la comptine numérique et le comptage. Néanmoins, ces batteries ne permettent pas d'identifier la cause des difficultés (Lafay et al., 2014) car elles évaluent les performances des enfants sans investiguer les compétences sous-jacentes à ces performances. Seule la batterie d'Évaluation Des fonctions cognitives et des Apprentissages (EDA ; Billard & Touzin, 2012) propose une évaluation du traitement des quantités dans cette tranche d'âge avec des tâches évaluant le traitement cognitif du nombre (Lafay & Cattini, 2018), un trouble du traitement des quantités étant une des causes éventuelles des difficultés en mathématiques (Butterworth, 1999 ; Dehaene, 2010 ; Rousselle & Noël, 2007 ; voir plus bas). Cette batterie n'est plus éditée et a été remplacée par la Batterie Modulable de Tests (BMT-i) en 2019 (Billard et al.). Il s'agit d'une batterie de dépistage, à destination des médecins par exemple, qui évalue plusieurs fonctions et qui permet d'orienter vers les orthophonistes qui réaliseront par la suite des tests destinés à préciser le diagnostic.

La présente étude s'intéresse à la batterie Examath 5-8 (Helloin & Lafay, 2021) qui est initialement destinée aux enfants de la GSM au CE1 en début des apprentissages formels des mathématiques. Cette batterie évalue les habiletés numériques de base, le calcul, le raisonnement verbal et non-verbal ainsi que le lexique mathématique. La batterie informatisée Examath 5-8 permet d'établir un portrait global des habiletés mathématiques chez les enfants de 5 à 8 ans afin de mesurer l'ampleur d'éventuelles difficultés dans les habiletés mathématiques. Elle permet d'objectiver un TSAM ou d'émettre des hypothèses diagnostiques d'un risque de TSAM.

2 L'ensemble des batteries de tests citées est analysé au regard des compétences mathématiques ciblées dans la partie introductive. Ces batteries évaluent parfois d'autres compétences mathématiques.

L'étalonnage de la batterie a été réalisé chez les enfants de GSM, CP et CE1 de mars à juin 2021. D'après les données du manuel, certaines épreuves de la batterie sont saturées ou proches de la saturation pour au moins un de leurs scores dès la fin de GSM chez les enfants tout-venant et correspondent à des compétences développementales précoces en mathématiques. Ces épreuves ont cependant un réel intérêt dans l'évaluation ou le dépistage des enfants en difficultés. Dans une perspective développementale, évaluer les performances d'enfants en fin de MSM sur une sélection des tâches saturées ou globalement réussies en fin de GSM, concernant les habiletés numériques de base, le raisonnement numérique et non-numérique permettrait d'obtenir des données normatives dans cette tranche d'âge afin d'établir des repères développementaux à destination des orthophonistes cliniciens. Cela permettra par ailleurs d'envisager l'extension de l'utilisation de la batterie dans une version courte à une tranche d'âge inférieure à la cible d'âge initiale, afin de repérer le plus tôt possible les risques de TSAM.

La présente étude vise donc à évaluer si la batterie Examath 5-8 peut aussi être adaptée aux enfants de MSM. D'une part, la batterie Examath 5-8 a été choisie car elle propose des tâches pour une tranche d'âge proche de celle visée dans la présente étude. En effet, la batterie Examath 5-8 montre une bonne validité de surface de la GSM jusqu'au CE2, c'est-à-dire que le test est bien compris et bien accepté par les orthophonistes et par les enfants testés. D'autre part, la batterie Examath 5-8 a aussi été choisie car elle présente des propriétés psychométriques satisfaisantes (qualification de l'évaluateur, standardisation, validité de surface, validité de contenu théorique, validité de critère concomitante, validité prédictive, validité de construit en lien avec les caractéristiques individuelles de niveau scolaire, fidélité temporelle, fidélité interjuge, cohérence interne) que les tests doivent respecter (Lafay & Cattini, 2018). La batterie Examath 5-8 démontre une bonne validité de contenu en s'appuyant sur des modèles théoriques actuels en psychologie cognitive et neuropsychologie faisant état des connaissances du développement des habiletés mathématiques chez le jeune enfant. Elle montre également une bonne validité de critère et une bonne validité de construit en lien avec les caractéristiques des individus (la classe ou la présence d'un trouble par exemple) chez les GSM jusqu'au CE2.

Le trouble spécifique des apprentissages mathématiques (TSAM)

Le trouble spécifique des apprentissages mathématiques est défini par le Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux (5e édition) comme un « déficit du traitement du nombre ou du calcul » et/ou « un trouble du raisonnement mathématique » qui entravent le traitement des données numériques, l'apprentissage des faits arithmétiques, le calcul et la résolution de problèmes (American Psychiatric Association et al., 2015). Les difficultés apparaissent au cours de la scolarité et persistent pendant au moins six mois malgré la mise en place d'interventions ciblées. Le TSAM influence significativement les performances scolaires et les activités de la vie quotidienne. Les performances des personnes avec TSAM sont quantifiées comme nettement en dessous du niveau attendu pour leur âge chronologique ou niveau scolaire. Ces difficultés ne peuvent pas être mieux expliquées par un handicap intellectuel, un trouble sensoriel, neurologique, psychiatrique ou une carence environnementale. Selon les études, la prévalence du TSAM varie entre 1 et 10 % des enfants d'âge scolaire (Badian, 1999 ; Barbaresi et al., 2005 ; Devine et al., 2013 ; Dirks et al., 2008 ; Gross-Tsur et al., 1996 ; Lewis et al., 1994 ; Share et al., 1988).

La littérature propose deux hypothèses numériques prédominantes pour expliquer l'origine du TSAM avec trouble cognitif numérique. Il peut s'agir d'un déficit du *sens du nombre* (Dehaene, 2010) ou du *module nombre* (Butterworth, 1999) ou d'un déficit d'accès au sens du nombre via les codes oral et arabe (Rousselle & Noël, 2007) (voir Castaldi et al., 2020 pour une revue). Des hypothèses de déficit cognitif général ont également été posées, mais il ne s'agit pas du focus de ce présent article (voir Agostini et al., 2022 et Castaldi et al., 2020 pour une discussion à ce sujet).

Les enfants avec un TSAM ou avec un risque de TSAM montrent des compétences numériques inférieures dès la fin de MSM. Concernant le sens du nombre, Gray et Reeve (2014) montraient que les enfants de 4 ans étaient capables de subitiser la quantité 4, les plus rapides les subitisaient en 2284 ms quand les plus lents (à risque de TSAM) les subitisaient en 6026 ms. Les enfants les plus lents, à risque de TSAM, étaient significativement moins précis sur les additions lors d'une tâche arithmétique non-verbale. À 4 ans, un enfant tout-venant connaît la comptine numérique en

moyenne jusqu'à 17 +/- 9 (Van Rinsveld et al., 2020) alors que les enfants de 5 ans à risque de TSAM dans la cohorte de l'étude de Hinton et al. (2015) connaissent la comptine numérique seulement jusqu'à 10. La stratégie utilisée pour la correspondance terme à terme évolue avec l'âge. À 4-5 ans, les enfants tout-venant utilisent le plus souvent une stratégie digitale (Ginsburg & Russell, 1981) et leurs performances sont significativement meilleures avec le pointage digital qu'avec le pointage visuel (pointage non-manuel avec les yeux) (Saxe & Kaplan, 1981). Dans la cohorte de l'étude de Hinton et al. (2015), les enfants de 5 ans à risque de TSAM n'ont pas acquis le comptage synchrone, c'est-à-dire que seul l'ordre stable de la comptine numérique est acquis sur des quantités inférieures à 10 mais qu'ils n'arrivent pas à utiliser cette comptine, le pointage et leur coordination pour dénombrer. Concernant la compréhension des principes, Gelman et Meck (1983) ont démontré qu'à partir de 3 ans, les enfants sont capables de détecter des erreurs dans la comptine numérique ainsi que des erreurs de correspondance terme à terme lors du dénombrement, par exemple si une poupée compte deux fois un même objet.

OBJECTIFS

L'objectif général de cette étude est d'évaluer la validité d'une sélection de tâches (voir ci-après dans la partie Méthode) de la batterie informatisée Examath 5-8 pour les enfants de fin de MSM. Un objectif secondaire est d'établir des normes sur le niveau scolaire de fin de MSM. Les questions de recherche et les hypothèses sont les suivantes :

1. La sélection de tâches de la batterie Examath 5-8 est-elle **acceptable** pour des enfants en fin de MSM ? Nous supposons que le niveau de satisfaction moyen des enfants sur une échelle de Likert à 6 degrés devrait être supérieur ou égal au 3ème degré (hypothèse 1).
2. La sélection de tâches de la batterie Examath 5-8 est-elle **accessible** pour des enfants en fin de MSM ? Nous supposons que le niveau de réussite pour cette tranche d'âge devrait être satisfaisant ; autrement dit, la moyenne devrait se situer au-dessus du seuil de 50 % (hypothèse 2). Le seuil de 50% est utilisé pour s'assurer que les réponses des enfants ne sont pas données au hasard et que plus de la moitié des items sont réussis par la classe d'âge.
3. La sélection de tâches de la batterie Examath 5-8 montre-t-elle une bonne **validité de construit**

en lien avec les caractéristiques individuelles liées au niveau scolaire ? Autrement dit, permet-elle de mettre en évidence des différences entre les enfants de MSM et de GSM ? Nous présentons ci-dessous une hypothèse générale (3a) et six hypothèses spécifiques opérationnelles (3b à 3g) qui concernent chaque tâche. Notons qu'il n'y a pas d'hypothèse spécifique pour les tâches Opération analogique et Estimation contextuelle.

a. De manière générale, nous supposons que les scores de réussite obtenus sur la sélection de tâches en MSM seront significativement inférieurs aux scores de réussite obtenus en GSM, et que les temps de traitement relevés en MSM seront significativement supérieurs aux temps relevés en GSM (hypothèse 3a).

b. Dans la tâche Comparaison symbolique arabe, nous supposons que les enfants de MSM se montreront moins précis que les enfants de GSM dans la discrimination de quantités. Autrement dit, les MSM seront plus en difficulté (score plus faible et temps de traitement plus long) que les GSM lorsqu'ils compareront des quantités dont le ratio est petit (en appui sur Halberda & Feigenson, 2008) (hypothèse 3b).

c. Dans la tâche de Subitizing naturel, nous supposons que les MSM et GSM obtiendront des scores et des temps similaires pour les rangs 1, 2 et 3 qui sont considérés comme innés (Fayol et al., 2004) et un score et un temps significativement différents pour le rang 4 qui est davantage dépendant de l'âge (Schleifer & Landerl, 2011). Dans la tâche de Subitizing exposition, nous supposons que les MSM et GSM obtiendront des scores et un temps similaires pour le rang 3 qui est considéré comme inné et des différences significatives, sur le score et le temps, pour les rangs 4, 5 et 6 qui sont davantage dépendants de l'exposition et de l'âge (hypothèse 3c).

d. Dans la tâche Comptine numérique orale, nous supposons que les enfants de MSM obtiendront un score significativement inférieur aux enfants de GSM et connaîtront en moyenne la comptine numérique au moins jusqu'à 17 (en appui sur Van Rinsveld et al., 2020) (hypothèse 3d).

e. Dans la tâche Dénombrement Compréhension, nous supposons que les MSM auront, pour chaque principe du dénombrement pris un à un, un taux de réussite significativement inférieur à celui des GSM et que les MSM auront au moins acquis le principe de la suite ordonnée stable des nombres, la

TABEAU 1 : Âge et genre des deux cohortes.

| Classe | Genre | Nombre | Pourcentage | Âge minimum | Âge maximum | Âge moyen | Écart-type (en mois) |
|--------|---------|--------|-------------|---------------|--------------|---------------|----------------------|
| MSM | Filles | 22 | 61 % | 4 ans 5 mois | 5 ans 4 mois | 4 ans 10 mois | 3.96 |
| | Garçons | 14 | 39 % | 4 ans 5 mois | 5 ans 5 mois | 4 ans 11 mois | 3.89 |
| | Total | 36 | 100 % | 4 ans 5 mois | 5 ans 5 mois | 4 ans 10 mois | 3.89 |
| GSM | Filles | 60 | 51 % | 5 ans 2 mois | 6 ans 3 mois | 5 ans 9 mois | 3.33 |
| | Garçons | 58 | 49 % | 4 ans 11 mois | 6 ans 5 mois | 5 ans 9 mois | 3.99 |
| | Total | 118 | 100 % | 4 ans 11 mois | 6 ans 3 mois | 5 ans 9 mois | 3.66 |

comptine numérique en production étant acquise jusqu'à 17 en moyenne à 4 ans (Van Rinsveld et al., 2020) : le pourcentage de réussite pour le principe Comptine numérique ordre stable devrait être supérieur à 75 % en fin de MSM (hypothèse 3e).

f. Dans la tâche Dénombrement Production, nous supposons que les stratégies utilisées en MSM par principe de dénombrement seront qualitativement différentes de celles utilisées en GSM (hypothèse 3f).

g. Enfin, dans la tâche Vocabulaire mathématique (Vocabulaire en réception, désignation), nous supposons une progression dans l'acquisition du vocabulaire mathématique entre les MSM et les GSM. Autrement dit, les MSM auront acquis seulement certains mots, les plus fréquemment rencontrés à l'école (d'après Boisseau, 2005) et les scores de réussite des MSM seront significativement inférieurs à ceux obtenus en GSM pour certains items (hypothèse 3g).

MÉTHODE

Participants

Deux écoles privées aux alentours de Rouen ont accueilli le projet au sein de leurs établissements. Nous avons recruté 36 enfants de MSM dans ces établissements pour participer à l'étude (voir tableau 1). Les responsables légaux ont été informés au préalable de l'étude et ont signé une autorisation parentale attestant de leur accord quant à la participation de leur enfant. Les critères d'inclusion pour le recrutement des participants sont une scolarisation en classe de MSM pour l'année scolaire 2021-2022 et la maîtrise du français en première ou seconde langue. Les critères d'exclusion sont un redoublement ou une prise en soin actuelle ou antérieure en orthophonie concernant le langage oral ou la cognition mathématique.

Concernant le groupe des enfants de GSM, nous utilisons les résultats des 118 enfants ayant participé à l'étalonnage de la batterie Examath 5-8 (Helloin & Lafay, 2021). Parmi ces enfants, 60 sont des filles, 80 sont des droitiers et ils ont en moyenne 69.08 mois (écart-type = 3.66).

L'ensemble de la cohorte parentale (sans distinction de sexe) a été comparé à la population française selon l'âge des parents et leurs catégories socioprofessionnelles (voir tableau 2) d'après les références INSEE (RP 2017, mise à jour 01/01/2020). Pour ce faire, nous avons sélectionné les données de la tranche d'âge 25-54 ans en cohérence avec une cohorte parentale d'enfants de 4 ans et demi à 5 ans. Notre cohorte parentale de MSM ne représente pas parfaitement la population nationale car nous observons une sous-représentation des catégories 1, 5, 6 et 8 et une sur-représentation des catégories 3 et 4. Concernant la cohorte de GSM, nous observons une sur-représentation des catégories 1, 2, 3 et 4 et une sous-représentation des catégories 5, 6 et 8.

Mesures

Huit épreuves issues de la batterie Examath 5-8 (Helloin & Lafay, 2021) ont été sélectionnées. Ces huit épreuves ont été sélectionnées selon deux critères : premièrement, l'épreuve devait cibler une compétence mathématique reportée comme acquise en MSM (à 3-4 ans) et prédictive du développement mathématique futur dans la littérature scientifique ; deuxièmement, ces épreuves ne devaient pas mettre les enfants plus âgés (GSM) en difficulté selon les normes obtenues à l'étalonnage de la batterie. Cette batterie est composée de 35 épreuves réparties en sept modules et d'une épreuve de dépistage indépendante. Nous décrivons par la suite uniquement les tâches concernées par l'étude. Pour chacune des épreuves, des exemples sont

TABLEAU 2 : Catégories socio-professionnelles des parents pour les cohortes de MSM et GSM par rapport à la répartition de l'INSEE des 25-54 ans en 2020.

| Catégories | Répartition en pourcentage dans la cohorte parentale MSM | Répartition en pourcentage dans la cohorte parentale GSM | Répartition en % RP2017 25-54 ans Insee |
|---|--|--|---|
| (1) Agriculteurs exploitants | 0.0 % | 2.1 % | 1.1 % |
| (2) Artisans, commerçants, chefs d'entreprise | 5.8 % | 9.0 % | 5.6 % |
| (3) Cadres et professions intellectuelles supérieures | 34.6 % | 21.5 % | 15.9 % |
| (4) Professions intermédiaires | 30.8 % | 40.3 % | 23.6 % |
| (5) Employés | 11.5 % | 13.7 % | 24.8 % |
| (6) Ouvriers | 11.5 % | 8.6 % | 18.9 % |
| (7) Retraité | 0.0 % | 0.0 % | 0.3 % |
| (8) Autres personnes sans activités professionnelles | 5.8 % | 4.7 % | 9.8 % |

donnés. De plus, une mesure d'appréciation par les enfants a été proposée (et ne fait pas partie de la batterie Examath 5-8).

Comparaison symbolique arabe (petits nombres)

La tâche Comparaison symbolique arabe teste le traitement numérique des nombres symboliques arabes et l'accès au sens du nombre via ce code. Elle se situe dans le module Sens des quantités et du nombre. Seule la partie Petits nombres a été utilisée. Il est demandé à l'enfant de comparer 10 paires de nombres en code arabe allant de 1 à 4 avec 5 ratios Weber différents allant de 0.33 à 3 (tâche isomorphe à la tâche de comparaison non-symbolique). Par exemple, pour un ratio Weber de 3, l'enfant compare 1 et 4 ; pour un ratio de 2, il compare 1 et 3 ; pour un ratio de 1, il compare 1 et 2 ou 2 et 4 ; pour un ratio de 0.5, il compare 2 et 3 et pour un ratio de 0.33, il compare 3 et 4. La paire est affichée pendant 1 seconde et l'enfant a 5 secondes pour répondre avant que l'item suivant n'apparaisse. Un score total sur 10 est attribué automatiquement avec 1 point par bonne réponse. Le plus petit ratio Weber identifié par l'enfant constitue le score Ratio Weber. Un temps moyen par item réussi est calculé automatiquement.

Subitizing

La tâche Subitizing permet d'évaluer l'accès au sens du nombre et plus précisément le système numérique précis (subitizing) via le code oral. Elle

se situe dans le module Sens des quantités et du nombre et est composée de deux séries d'items. Dans la série Subitizing naturel, des quantités allant de 1 à 4 sont disposées de manière aléatoire sur l'écran. Huit nombres en code analogique (étoiles) sont présentés à l'enfant qui doit dire le plus vite possible combien il y a d'étoiles. Dans la série Subitizing exposition, des quantités allant de 3 à 6 sont organisées de manière ordonnée, selon des configurations canoniques fréquentes (celles du dé), dans l'espace de l'écran. Cette tâche permet l'évaluation du subitizing dit « conceptuel ». L'exercice est le même que dans la série précédente : huit nombres en code analogique (étoiles) sont présentés à l'enfant qui doit dire le plus vite possible combien il y a d'étoiles. Chaque item est affiché pendant 1 seconde, suivi d'un temps maximum de 5 secondes au-delà duquel l'item suivant apparaît. Pour chaque série, un score sur 8 est attribué automatiquement, avec 1 point par bonne réponse, et un temps moyen par item réussi est calculé automatiquement. Un score total sur 16 est automatiquement calculé.

Comptine numérique orale

La tâche Comptine numérique orale évalue la connaissance de la séquence conventionnelle des mots-nombres du français. Elle se situe dans le module Connaissance des nombres symboliques et comporte initialement 10 items donnant lieu à 2 scores indépendants. Pour la présente étude, seul le premier item correspondant au premier score est proposé à l'enfant. Il s'agit

de compter le plus loin possible. L'enfant récite verbalement ; l'expérimentatrice saisit le nombre atteint par l'enfant. Un score sur 100 est obtenu, correspondant au plus grand nombre atteint sans erreur. Si l'enfant atteint ou dépasse 100, il obtient 100 points.

Dénombrement Compréhension

La tâche Dénombrement compréhension évalue la compréhension des principes de dénombrement par l'enfant. Dix items sont proposés à l'enfant. Celui-ci voit un personnage animé compter des objets et doit répondre à des questions sur le dénombrement effectué par le personnage ou juger de la justesse du dénombrement effectué par le personnage. L'enfant doit répondre à la question par vrai ou faux. Un item évalue l'ensemble des principes de dénombrement, deux items évaluent la compréhension du principe d'ordre stable de la comptine numérique, trois items évaluent la compréhension du principe de correspondance terme à terme, deux items évaluent la compréhension du principe de cardinalité et deux items évaluent la compréhension de la non-pertinence de l'ordre du comptage. Un score total sur 10 est attribué automatiquement, avec 1 point attribué pour chaque bonne réponse.

Dénombrement Production

La tâche Dénombrement production évalue les compétences de dénombrement en production. Elle se situe dans le module Dénombrement et est composée de deux séries d'items. Dans la série Combien ? six collections d'objets ou de personnages statiques allant de 4 à 13 sont proposées à l'enfant (les objets ou personnes sont à l'écran et non-manipulables par l'enfant). L'enfant doit dire combien il y en a. L'enfant n'a pas de contrainte temporelle pour répondre, ce qui lui permet d'appliquer une procédure de comptage. Dans la série Mouvement, six collections allant de 3 à 11 sont présentées en mouvement à l'enfant. Les stimuli arrivent de manière séquentielle : ils apparaissent, isolément ou par groupes, traversent l'écran puis disparaissent et l'enfant doit dire combien d'objets ou de personnages sont passés en tout. Le temps d'affichage est d'une seconde par élément (personnage, groupe ou objet) isolé, le temps d'affichage total de chaque item est proportionnel au nombre d'objets traversant l'écran en groupe. Chaque série s'arrête après deux échecs consécutifs de l'enfant. Pour chaque série, un score sur 6 est attribué automatiquement avec 1 point par bonne réponse. Un score total sur

12 est automatiquement calculé. Les principes du dénombrement ainsi que les stratégies utilisées sont évalués en direct par l'expérimentatrice au moyen d'une grille qualitative et sont notés sur le cahier de passation.

Opérations analogiques

La tâche Opérations analogiques évalue le sens intuitif des opérations d'ajout et de retrait sans intervention de codes symboliques pour la présentation des opérandes. Cette tâche se situe dans le module Raisonnement numérique et est composée de deux séries. Dans chaque série, six items (de type $a+b$ ou $a-b$, a et b étant des ensembles non-symboliques, allant de 1 à 5) sont proposés à l'enfant dans chaque série. Une opération arithmétique est proposée dans un format non-verbal. Des clowns entrent ou sortent d'un chapiteau ; l'enfant doit déterminer, à la fin de l'animation, le nombre de clowns présents dans le chapiteau. Dans la série Réponse analogique, l'enfant doit pointer successivement le nombre de clowns dans une banque de clowns identiques. Dans la série Réponse orale, l'enfant doit donner oralement la réponse (code symbolique oral). Si l'enfant échoue aux trois premiers items, la série s'arrête automatiquement et passe à la suivante. Au cours de cette tâche, 2 points sont accordés pour une réponse exacte, 1 point est accordé si le sens de l'opération est respecté alors que la réponse est inexacte et aucun point n'est accordé si la réponse ne respecte pas le sens de l'opération. Un score sur 12 est calculé automatiquement pour chaque série. Un score total sur 24 est également calculé automatiquement.

Jugement de quantité en contexte

La tâche Jugement de quantité en contexte évalue la capacité d'estimation de quantité en contexte, mais aussi la qualité des représentations numériques dans des situations du quotidien ou relatives à des connaissances sémantiques de l'enfant. Cette tâche se situe dans le module Raisonnement numérique. Dix items sont proposés à l'enfant. Deux images sont présentées à l'enfant dont une avec une quantité non-contingente à la situation. L'enfant doit désigner l'image qu'il juge comme étant bizarre. Par exemple, l'enfant voit un cornet avec deux boules de glace et un cornet avec une vingtaine de boules de glace et il doit identifier celle qu'il juge étonnante. Dans cette épreuve, un score sur 10 est attribué automatiquement avec 1 point par bonne réponse.

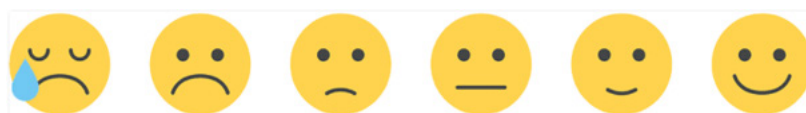


FIGURE 1 : Échelle d'évaluation de validité sociale

Vocabulaire en réception (désignation)

La tâche Vocabulaire mathématique en réception évalue la compréhension des termes relatifs au vocabulaire mathématique. Cette tâche se situe dans le module Raisonnement non-numérique et comporte deux séries. Seule la première série en désignation est administrée. Neuf items sont proposés à l'enfant. Les mots évalués sont « premier », « deuxième », « dernier », « ensemble », « la moitié », « le moins », « le plus », « aucun », « chaque » et « plusieurs ». Une image scénique est présentée à l'enfant qui entend une consigne et doit désigner la bonne réponse à l'écran. Par exemple, l'enfant voit des enfants faire une course et doit pointer le premier enfant. Dans cette tâche, un score sur 10 est attribué automatiquement, avec 1 point par bonne réponse.

Échelle d'évaluation de validité sociale

Une échelle de Likert à six degrés est présentée aux enfants à la fin du test sous forme de smileys (voir figure 1) pour évaluer le niveau de validité sociale. Les enfants sélectionnent le smiley qui

correspond à leur ressenti global vis-à-vis du test. Un score sur 6 est attribué à l'enfant selon le smiley choisi, 6 étant le niveau de satisfaction maximum. La consigne donnée était « Montre-moi comment tu t'es senti durant nos petits jeux ».

Procédure générale

Les tests ont été administrés au sein des établissements scolaires et sur le temps scolaire. Une pièce isolée a été mise à disposition de la testeuse (la première autrice de cet article) en juin 2022. Les enfants de MSM ont été vus individuellement, une seule fois pendant environ 25 minutes. L'ordre des huit épreuves issues d'Examath 5-8 a été randomisé à l'aide du site randomizer.org car la batterie a vocation à être administrée de façon aléatoire. 36 séquences ont été aléatoirement générées au total (correspondant au nombre de participants). Les tâches ont été effectuées sur le logiciel Examath 5-8 et les stratégies utilisées par l'enfant ont été notées en direct sur le cahier de passation. L'échelle d'appréciation était administrée à la fin de la passation.

TABLEAU 3 : Résultats en MSM pour la sélection de tâches.

| Épreuve | Moyenne | Écart-type |
|-----------------------------------|-----------|------------|
| Comparaison arabe petits nombres | 7.81/10 | 2.40 |
| Subitizing total | 11.97/16 | 3.29 |
| Subitizing naturel | 6.69/8 | 1.43 |
| Subitizing exposition | 5.19/8 | 2.21 |
| Comptine numérique | 23.53/100 | 13.47 |
| Dénombrement production | 8.83/12 | 1.40 |
| Dénombrement combien | 4.10/6 | 0.79 |
| Dénombrement mouvement | 4.67/6 | 1.03 |
| Dénombrement compréhension | 6.78/10 | 1.76 |
| Opération analogique total | 10.83/24* | 1.87 |
| Opération analogique - analogique | 5.56/12* | 1.40 |
| Opération analogique - orale | 5.30/12* | 1.02 |
| Jugement quantité en contexte | 8.53/10 | 1.68 |
| Vocabulaire mathématique | 8.42/10 | 1.39 |

* = notes sous le seuil du hasard. Les résultats bruts obtenus par les GSM sont disponibles dans le manuel d'Examath 5-8.

RÉSULTATS

L'ensemble des résultats a été obtenu grâce au logiciel SPSS version 28.

Analyse de l'acceptabilité de la sélection de tâches (hypothèse 1)

Le taux de satisfaction des enfants de MSM sur l'échelle d'évaluation de validité sociale (échelle de Likert à six degrés) est strictement supérieur au niveau 3. La validité sociale moyenne est de 5.8 avec un écart-type (ET) de 0.5. Nous observons que 86.1 % des enfants ont choisi le niveau 6, que 8.3 % des enfants ont choisi le niveau 5 et que 5.6 % des enfants ont choisi le niveau 4.

Analyse de l'accessibilité de la sélection de tâches (hypothèse 2)

La sélection de tâches montre un niveau de réussite supérieur au seuil de 50 % de la note maximale possible pour toutes les tâches, à l'exception de la tâche Opérations analogiques en modalité analogique et orale (voir tableau 3). La tâche Comptine numérique orale est particulière car

elle ne possède pas de note maximale en tant que telle (les enfants ont été arrêtés à 100 pour des raisons temporelles) : elle permet de constater que, en fin de MSM, les enfants comptent en moyenne jusqu'à 23. Cependant les scores varient considérablement d'un enfant à l'autre à cet âge, avec un écart-type à 13.5.

Analyse de la validité de construit en lien avec la caractéristique individuelle de la classe (hypothèse 3)

Comparaison des scores de réussite sur l'ensemble des tâches selon la classe (hypothèse 3a)

D'après les tests de Shapiro-Wilk, les données ne suivent pas la loi normale. De ce fait, des tests statistiques inférentiels de type non-paramétrique sont utilisés pour comparer les MSM et les GSM à la sélection de tâches d'Examath 5-8. Des analyses de variance de Mann-Whitney ont été réalisées avec le score total de chaque épreuve comme variables dépendantes et le niveau scolaire (classe) comme variable indépendante (voir tableau 4). Les résultats indiquent un effet de Classe pour toutes les tâches

TABLEAU 4 : Résultats de la comparaison interclasses pour la sélection de tâches.

| Épreuve | Variable dépendante | Moyenne (ET) | | p (Mann-Whitney) |
|----------------------------------|---------------------|-------------------|-------------------|------------------|
| | | MSM | GSM | |
| Comparaison arabe petits nombres | Score | 7.81/10 (2.40) | 9.54/10 (0.80) | < .001* |
| | Temps | 1746.33 (394.32) | 2126.70 (506.00) | < .001* |
| Subitizing | Score | 11.97/16 (3.29) | 14,89/16 (1.96) | < .001* |
| | Temps | 1554.69 (374.15) | 1570.78 (281.60) | .353 |
| Subitizing naturel | Score | 6.69/8 (1.43) | 7.58/8 (0.98) | < .001* |
| | Temps | 1554.69 (374.15) | 1570.78 (281.60) | .353 |
| Subitizing exposition | Score | 5.19/8 (2.21) | 7.32/8 (1.20) | < .001* |
| | Temps | 1535.09 (288.43) | 1694.46 (380.55) | .024* |
| Comptine numérique | Score | 23.53/100 (13.47) | 46.27/100 (23.66) | < .001* |
| Dénombrement production | Score | 8.83/12 (1.40) | 9.01/12 (2.13) | .460 |
| Dénombrement combien | Score | 4.10/6 (0.79) | 4.22/6 (1.38) | .312 |
| Dénombrement mouvement | Score | 4.67/6 (1.03) | 4.79/6 (1.38) | .305 |
| Dénombrement compréhension | Score | 6.78/10 (1.76) | 8.74/10 (1.24) | < .001* |
| Opération analogique | Score | 10.83/24 (1.87) | 18.20/24 (5.39) | < .001* |
| Opération analogique -Analogique | Score | 5.56/12 (1.40) | 9.19/12 (2.75) | < .001* |
| Opération analogique -Oral | Score | 5.30/12 (1.02) | 9.07/12 (2.92) | < .001* |
| Estimation contextuelle | Score | 8.53/10 (1.68) | 9.59/10 (0.67) | < .001* |
| Vocabulaire math | Score | /10 (1.39) | 8.65/10 (1.50) | .302 |

* = significatif à $p < .05$. Les scores sont des scores de réussite. Les temps sont en ms.

hormis pour les scores de la tâche Dénombrement Production, Vocabulaire Mathématique ainsi que sur les temps de traitement pour la tâche de Subitizing naturel.

Analyse de la réussite à la tâche Comparaison de quantités (hypothèse 3b)

Concernant la Comparaison de nombres arabes (partie Petits nombres), une analyse de variance (ANOVA) avec le score et le temps comme variables dépendantes et la classe et le ratio comme variables indépendantes, a été utilisée pour investiguer la précision numérique des enfants.

L'analyse des scores montre un effet de Classe, $F(1,144) = 44.298$, $p < .001$, $\eta^2_p = .235$, et un effet de Ratio, $F(4,141) = 5.198$, $p < .001$, $\eta^2_p = .129$. Plus important, une interaction Classe x Ratio est observée, $F(4,141) = 3.731$, $p < .05$, $\eta^2_p = .096$. Les comparaisons montrent que les enfants de GSM réussissent de façon équivalente la comparaison de nombres pour chacun des ratios, alors que les enfants de MSM sont plus performants pour comparer des paires de nombres dont le ratio est 3 que des paires de nombres dont le ratio est 0.33 ou 0.50 (voir graphique 1).

L'analyse des temps de traitement montre un effet de Classe, $F(1,135) = 9.090$, $p < .05$, $\eta^2_p = .063$ mais pas d'effet de Ratio, $F(4, 132) = 2, 305$, $p = .062$. Les enfants de GSM sont généralement plus lents que ceux de MSM. Une interaction Classe x Ratio est observée, $F(4, 132) = 4.986$, $p < .001$, $\eta^2_p = .131$. Les enfants de GSM sont significativement plus

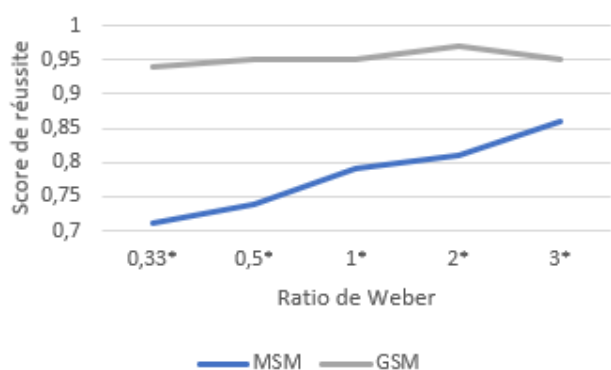
rapides pour comparer des nombres dont le ratio est 1, 2 ou 3 que des nombres dont le ratio est 0.5 de même que pour des nombres dont le ratio est 2 ou 3 par rapport à des nombres dont le ratio est 0.33. Les enfants de MSM sont significativement plus rapides pour comparer des nombres dont le ratio est 0.33 que des nombres dont le ratio est 3 (voir graphique 2).

Comparaison de la réussite à la tâche Subitizing (hypothèse 3c)

Concernant le Subitizing naturel et exposition, une ANOVA, avec le score et le temps comme variables dépendantes et la classe et le rang (nombre d'éléments à subitiser) comme variables indépendantes a été utilisée pour investiguer la capacité de subitizing des enfants.

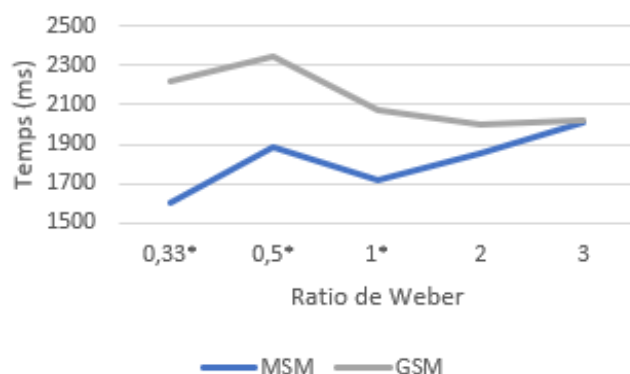
Analyse de la tâche Subitizing naturel

L'analyse des scores en subitizing naturel (voir graphique 3) montre un effet de Classe, $F(1,144) = 15.865$, $p < .001$, $\eta^2_p = .099$ et un effet de Rang, $F(3,142) = 14.953$, $p < .001$, $\eta^2_p = .242$. Une interaction Classe x Rang est observée, $F(3,142) = 8.462$, $p < .001$, $\eta^2_p = 0.152$. Les comparaisons montrent que les enfants de GSM réussissent de manière équivalente à subitiser 1, 2, 3 ou 4 éléments alors que les MSM montrent des résultats significativement inférieurs pour subitiser 4 éléments par rapport à 1, 2 ou 3 éléments ainsi que pour subitiser 3 éléments par rapport à 1 élément.



* = différence significative à $p < .05$ entre le score de MSM et de GSM

GRAPHIQUE 1 : Score de réussite par classe dans la tâche Comparaison de nombres arabes (petits nombres).



* = différence significative à $p < .05$ entre le temps de MSM et de GSM

GRAPHIQUE 2 : Temps moyen (en ms) par ratio par classe dans la tâche Comparaison de nombres arabes (petits nombres).

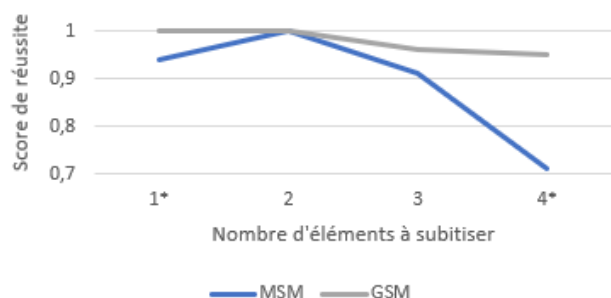
L'analyse des temps de traitement en subitizing naturel (voir graphique 4) montre un effet de Rang, $F(3,123) = 255.193, p < .001, \eta^2_p = .862$ mais ne montre pas d'effet de Classe, $F(1,125) = 1.103, p = .296$, ni d'interaction Classe x Rang, $F(3,123) = 0.042, p = .988$. Les comparaisons montrent que les enfants de GSM et de MSM sont significativement plus rapides pour subitiser 2 éléments par rapport à 1, 3 ou 4 éléments, pour subitiser 1 élément par rapport à 3 ou 4 éléments et pour subitiser 3 éléments par rapport à 4 éléments.

Analyse de la tâche Subitizing exposition

L'analyse des scores en subitizing exposition (voir graphique 5) montre un effet de Classe, $F(1, 145) = 34.207, p < .001, \eta^2_p = .955$ et un effet de Rang, $F(3,143) = 18.690, p < .001, \eta^2_p = .282$. Une interaction Classe x Rang est observée, $F(3,143) = 12.421, p < .001, \eta^2_p = .207$. Les

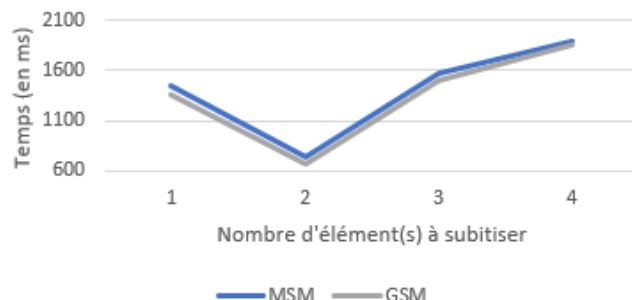
comparaisons montrent que les enfants de GSM réussissent de manière équivalente à subitiser 3, 4, 5 ou 6 éléments tandis que les MSM présentent des résultats significativement inférieurs pour subitiser 6 éléments par rapport à 3, 4 ou 5 éléments ainsi que pour subitiser 4 ou 5 éléments par rapport à 3.

L'analyse des temps de traitement en subitizing exposition (voir graphique 6) montre un effet de rang, $F(3,116) = 10.086, p < .001, \eta^2_p = .207$ mais pas d'effet de Classe, $F(1,118) = .021, p = .885$, ni d'effet d'interaction Classe x Rang, $F(3,116) = .474, p = .701$. Les enfants (MSM et GSM) sont significativement plus rapides pour subitiser 3 éléments que pour subitiser 4, 5 ou 6 éléments ($p < .05$). Aucune différence significative de temps de traitement n'est observée entre le subitizing de 4, 5 ou 6 éléments.

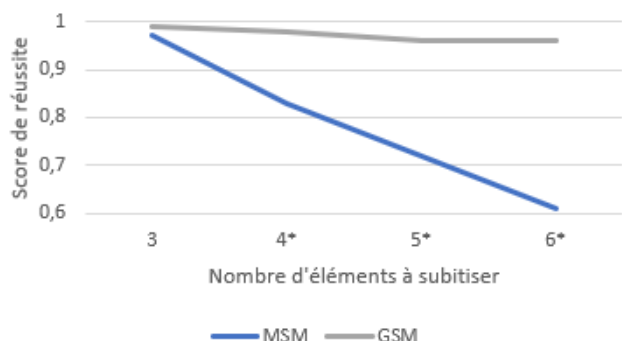


* = différence significative à $p < .05$ entre le score de MSM et de GSM

GRAPHIQUE 3 : Score de réussite en subitizing par rang et par classe dans la tâche Subitizing Naturel.

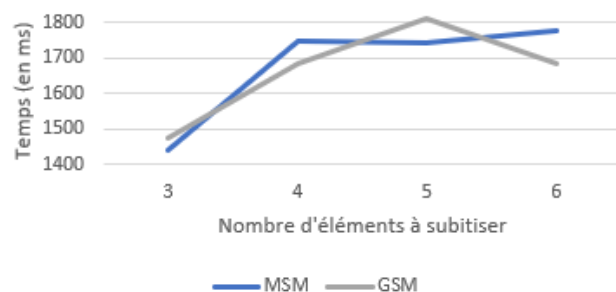


GRAPHIQUE 4 : Temps moyen par rang et par classe dans la tâche Subitizing Naturel.



* = différence significative à $p < .05$ entre le score de MSM et de GSM

GRAPHIQUE 5 : Score de réussite en subitizing par rang et par classe dans la tâche Subitizing exposition.



GRAPHIQUE 6 : Temps moyen par rang et par classe dans la tâche Subitizing exposition.

Analyse de la tâche Comptine numérique (hypothèse 3d)

Concernant la Comptine numérique, une analyse de variance de Mann-Whitney a été réalisée avec la moyenne des scores en Comptine numérique comme variable dépendante et la classe comme variable indépendante. Les enfants de MSM obtiennent des scores significativement inférieurs à ceux des GSM ($p < .001$). En moyenne, les MSM connaissent la comptine numérique jusqu'à 23 avec un écart-type de 13.5 tandis que les GSM connaissent la comptine numérique jusqu'à 46 avec un écart-type de 23.7.

Analyse de la tâche Dénombrement compréhension (hypothèse 3e)

Concernant le Dénombrement Compréhension, une analyse de variance de Mann-Whitney a été réalisée avec la moyenne des scores pour chaque principe de dénombrement comme variables dépendantes et la classe comme variable indépendante. Les résultats montrent un effet de Classe pour les 4 principes de dénombrement testés ($p < .05$; comptine numérique efficiente, correspondance terme à terme, non-pertinence de l'ordre, cardinalité).

Nous considérons qu'un principe est acquis lorsqu'il est maîtrisé par au moins 75 % de la population testée, en cours d'acquisition pour 50 à 75 % et non-acquis pour moins de 50 %. En fin de MSM, seul le principe Comptine numérique stable est acquis (76 %), alors que les principes Correspondance terme à terme (61 %), Non-pertinence de l'ordre (72 %) et Cardinalité (56 %) sont en cours d'acquisition. En fin de GSM, tous les principes sont acquis (Comptine numérique stable :

96 %, Correspondance terme à terme : 91 %, Non-pertinence de l'ordre : 85 %) excepté le principe de Cardinalité qui est en cours d'acquisition (70 %).

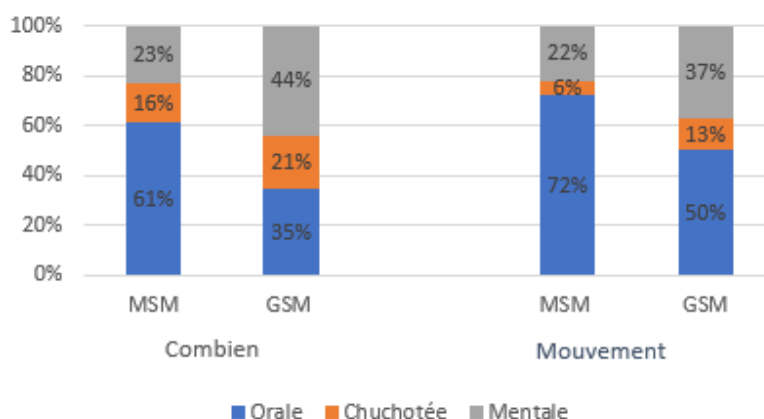
Analyse de la tâche Dénombrement production : stratégies utilisées pour les principes Comptine numérique efficiente et Correspondance terme à terme (hypothèse 3f)

Concernant le Dénombrement Production, une analyse qualitative des stratégies utilisées par classe a été effectuée. Un pourcentage d'utilisation des différentes stratégies pour les principes Comptine numérique efficiente et Correspondance terme à terme (observées par l'expérimentateur si l'enfant ne produit pas de double comptage ou de saut de comptage lorsqu'il énonce les mots-nombres et pointe les objets) a été calculé (voir graphiques 7 et 8). La comptine numérique orale et le pointage digital sont préférentiellement utilisés par les MSM dans la partie Combien. Dans cette même partie de la tâche, les GSM utilisent des stratégies caractérisées comme mentalisées car celles-ci sont non-observables, il pourrait s'agir de la comptine numérique mentale et du pointage visuel. Dans la partie Mouvement, les MSM et les GSM utilisent préférentiellement la comptine numérique orale et le pointage visuel.

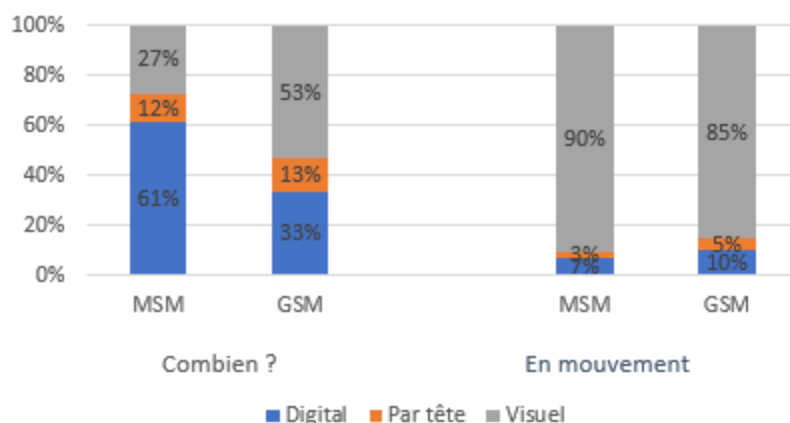
Analyse de la tâche vocabulaire mathématique (hypothèse 3g)

Concernant le vocabulaire mathématique, une analyse de variance de Mann-Whitney a été réalisée avec le score pour chaque item comme variables dépendantes et la classe comme variable indépendante (voir tableau 5).

Les enfants de MSM obtiennent des scores significativement inférieurs aux GSM pour les



GRAPHIQUE 7 : Stratégies utilisées pour la comptine numérique chez les MSM et les GSM dans les sous-tâches Combien et Mouvement du dénombrement.



GRAPHIQUE 8 : Stratégies utilisées pour la correspondance terme à terme chez les MSM et les GSM dans les sous-tâches Combien et Mouvement du dénombrement

TABEAU 5 : Résultats (moyenne (ET) du score) de la tâche Vocabulaire mathématique.

| Items | MSM | GSM | p (Mann-Whitney) |
|--------------------|-------------|-------------|------------------|
| Premier | 1,00 (0.00) | 0.97 (0.16) | 0.32 |
| Deuxième | 0.86 (0.35) | 0.96 (0.19) | < .05* |
| Dernier | 0.53 (0.51) | 0.92 (0.28) | 0.00* |
| Ensemble | 0.51 (0.51) | 0.57 (0.50) | 0.55 |
| La moitié | 0.42 (0.50) | 0.74 (0.44) | < .01* |
| Le moins | 0.88 (0.33) | 0.97 (0.16) | < .05* |
| Le plus | 1.00 (0.00) | 1.00 (0.00) | 1.00 |
| Aucun | 0.92 (0.27) | 0.98 (0.13) | 0.11 |
| Chaque / plusieurs | 0.85 (0.25) | 0.82 (0.37) | 0.72 |

* = significatif à $p < .05$.

mots « deuxième », « dernier », « la moitié » et « le moins ». Cependant, nous ne notons pas de différence significative entre les MSM et les GSM pour les scores des items « premier », « ensemble », « le plus », « aucun », « chaque » et « plusieurs ».

Un mot de vocabulaire est considéré comme acquis lorsqu'il est compris par au moins 75 % de la population testée, en cours d'acquisition pour 50 à 75 % et non-acquis pour moins de 50 %. En fin de MSM, les enfants ont acquis les mots « premier », « deuxième », « le moins », « le plus », « aucun », « chaque » et « plusieurs ». Les mots « dernier » et « ensemble » sont en cours d'acquisition et le mot « la moitié » n'est pas encore acquis à cet âge. Tous les mots sont acquis en fin de GSM, excepté « ensemble » et « la moitié » qui sont encore en cours d'acquisition.

DISCUSSION

Interprétation des résultats

Acceptabilité

Le premier objectif était d'évaluer l'acceptabilité de la sélection de tâches informatisées de la batterie Examath 5-8 pour des enfants en fin de MSM. La batterie montre une très bonne acceptabilité par cette classe d'âge. Les enfants ont apprécié les tâches proposées ainsi que leurs présentations. Toutefois, il est possible que cette échelle ait capturé de manière plus générale un plaisir à réaliser des mathématiques. Nous pouvons affirmer que l'évaluation n'a pas provoqué d'émotions négatives chez les enfants.

Accessibilité

Le deuxième objectif était d'évaluer l'accessibilité de la sélection de tâches de la batterie Examath 5-8 pour les enfants en fin de MSM. Toutes les tâches montrent un niveau de réussite supérieur au seuil de 50% hormis la tâche Opérations analogiques. Cela nous permet de valider notre hypothèse pour toutes les tâches sauf celle-ci. Pourtant, Levine et al. (1992) obtenaient dans leur étude des résultats supérieurs au seuil de 50% pour cette classe d'âge dans des tâches similaires (somme jusqu'à 6 dans l'étude de Levine et jusqu'à 5 dans notre étude). Ils exprimaient néanmoins que cela n'était pas représentatif d'une compétence complètement acquise à cet âge. En effet, dans cette classe d'âge, certains enfants obtenaient de très bons résultats mais la plupart en obtenaient des mauvais. Dans cette tâche, les auteurs montraient que les performances augmentaient avec l'âge dans toutes les tranches d'âge testées. Cela suggère que cette compétence commence à se mettre en place en MSM mais pas de manière homogène chez tous les enfants. De plus, dans l'étude de Levine et al. (1992), les enfants voyaient des objets réels apparaître ou disparaître l'un après l'autre, ce qui pouvait leur permettre de les dénombrer plus facilement alors que, dans la présente étude, la tâche est informatisée, ce qui nécessite un niveau d'abstraction supérieur.

Validité de construit en lien avec la classe

Le troisième objectif était d'évaluer la validité de construit de la sélection de tâches de la batterie Examath 5-8 en lien avec les caractéristiques individuelles liées à la classe. Les enfants de MSM obtiennent des scores de réussite significativement inférieurs et présentent des temps de traitement significativement plus longs que les GSM pour toutes les tâches, hormis pour les tâches Dénombrement production et Vocabulaire mathématique ainsi que pour les temps de traitement en Subitizing naturel. Ces résultats nous permettent de valider notre hypothèse pour toutes les tâches sauf celles citées précédemment.

Les interprétations relatives aux hypothèses spécifiques à chaque tâche seront détaillées ci-dessous.

Dans la tâche **Comparaison symbolique arabe**, les enfants de GSM se montrent significativement plus performants que les MSM pour comparer des nombres dont les ratios sont 3, 2, 1, 0.5 ou 0.33. Ces résultats nous permettent de valider notre

hypothèse, les MSM sont plus en difficulté que les GSM lorsqu'ils comparent des quantités dont le ratio est petit. Ces résultats sont cohérents avec les travaux de Halberda et Feigenson (2008) portant sur des quantités non-symboliques, les enfants de MSM sont capables de discriminer des quantités jusqu'au ratio de Weber de 0.33 et cette capacité s'améliore avec l'âge, accompagnée d'une accélération de la vitesse de traitement. Notons tout de même que le temps de traitement des GSM est généralement plus long que celui des MSM : il est possible que les MSM répondent pour certains au hasard, raccourcissant leur temps de réponse.

Dans la tâche **Subitizing naturel**, les enfants de GSM sont significativement plus performants en score que les enfants de MSM pour les rangs 1 et 4 mais ne le sont pas pour les rangs 2 et 3. En revanche, il n'y a pas de différence significative du temps de traitement entre ces deux classes d'âge pour les rangs 1, 2, 3 ou 4. Cependant, il convient de noter que le rang 1 n'apparaît qu'une fois et est le dernier item de la tâche. Il est possible qu'il y ait eu un effet de fatigabilité pour cet item chez les MSM. Ceux-ci obtiennent cependant un score de réussite de .93, ce score est abaissé par l'échec de seulement deux enfants de la cohorte à cet item. Il est possible qu'avec une taille d'échantillon plus importante en MSM, ce score serait apparu non-significativement différent du score des GSM. Ces résultats nous permettent de valider notre hypothèse. La différence significative de score pour le rang 4 est cohérente avec l'étude de Formoso et al. (2017) qui montrait une augmentation de l'étendue du subitizing entre 4 et 6 ans.

Dans la tâche **Subitizing exposition**, les enfants de GSM sont significativement plus performants en score que les enfants de MSM pour les rangs 4, 5 et 6 mais ne le sont pas pour le rang 3, ce qui nous permet de valider notre hypothèse. Les enfants de MSM et de GSM ne montrent pas de différence significative concernant le temps de traitement pour les rangs 3, 4, 5 et 6. Ce résultat montre que le subitizing s'étend au cours du développement aux patterns 4, 5 et 6 par exposition répétée, ce qui est concordant avec Mandler et Shebo (1982).

La tâche **Comptine numérique** montre que les enfants de MSM peuvent compter en moyenne jusqu'à 23, ce qui nous permet de valider notre hypothèse avec un score intermédiaire entre les résultats obtenus par Van Rinsveld et al. (2020) à 4 ans (17+/-9) et à 5 ans (28+/-3), sachant que la

moyenne d'âge de notre cohorte (4 ans 10 mois) se situe entre ces deux repères d'âge, bien que nos résultats montrent une grande dispersion (23+/-13.5). En revanche, cette dispersion persiste chez les enfants de GSM de la cohorte Examath 5-8 mais avec des scores plus élevés (46+/-23) alors que la dispersion était réduite à 5 ans dans l'étude de Van Rinsveld et al. (2020), ce qui peut aussi s'expliquer par le fait que, dans cette étude, les enfants étaient arrêtés dès qu'ils atteignaient 30.

Dans la tâche **Dénombrement compréhension**, les enfants de GSM sont significativement plus performants que les enfants de MSM pour détecter des erreurs sur les principes de dénombrement (ordre stable de la comptine numérique, correspondance terme à terme, non-pertinence de l'ordre et cardinalité). De plus, la compréhension du principe d'ordre stable de la comptine numérique est acquise en fin de MSM, comme attendu puisque la comptine numérique est acquise en production jusqu'à 17 à 4 ans d'après Van Rinsveld et al. (2020). Les autres principes sont encore en cours d'acquisition à ce stade. Ces résultats nous permettent de valider notre hypothèse. Néanmoins, ce résultat diffère de celui de l'étude plus ancienne de Gelman et Meck (1983) qui montrait que les enfants pouvaient détecter des erreurs dans la comptine numérique et de correspondance terme à terme à partir de 3 ans. Notre résultat peut s'expliquer par le fait que, dans l'étude de Gelman et Meck (1983), il était seulement demandé aux enfants de dire si une poupée avait bien compté. Or, dans notre étude, il est demandé de répondre par vrai ou faux à une question, qui implique une compétence langagière plus importante. De plus, il s'agit dans notre étude d'une tâche informatisée, cela implique une plus grande rigidité dans la cotation.

Dans la tâche **Dénombrement production**, les enfants de GSM et de MSM ne montrent pas de différence significative en termes de score de réussite. Néanmoins, les stratégies utilisées dans la sous-tâche Combien diffèrent entre les MSM et les GSM, ce qui nous permet de valider notre hypothèse. Les enfants de MSM utilisent préférentiellement une comptine numérique orale et le pointage digital, ce qui est en accord avec l'étude de Ginsburg et Russell (1981) chez des enfants de 4 ans et demi, alors que les GSM utilisent préférentiellement une comptine numérique mentale et le pointage visuel. Cela démontre une meilleure automatisation des

principes du dénombrement chez les GSM, malgré une différence de score global non-significative entre ces deux classes d'âge.

Enfin, concernant le **vocabulaire mathématique**, les résultats montrent une progression significative entre les MSM et les GSM pour les items « deuxième », « la moitié » et « le moins » mais une absence de différence significative pour les autres mots. Cette progression nous permet de valider notre hypothèse. Dans cette tâche, nos résultats correspondent à l'âge d'acquisition proposée par Boisseau (2005) pour tous les mots, à l'exception de « dernier », « ensemble » et « la moitié ». Le lexique mathématique s'acquiert très jeune, les mots proposés seraient acquis dès 3 ans sauf « la moitié » qui serait acquis à 4 ans selon Boisseau (2005). Cette étude ainsi que celle de Boisseau montrent que le lexique mathématique s'enrichit progressivement au cours des années de maternelle et que l'on peut observer une progression du lexique mathématique sur certains mots spécifiques. Cependant cela n'entraîne pas de différence significative dans le score total entre les résultats des enfants de MSM et de GSM.

Synthèse

En résumé, le protocole d'évaluation mathématique proposé pour les enfants en fin de MSM, utilisant quelques épreuves d'Examath 5-8, présente une bonne acceptabilité pour l'ensemble des tâches et une bonne accessibilité pour toutes les tâches, à l'exception de la tâche Opération analogique où les enfants de MSM obtiennent un score moyen sous le seuil de 50%. Toutes les tâches montrent également une bonne validité de construit en lien avec la classe sauf les tâches Dénombrement production et Vocabulaire mathématique où les scores de réussite de l'épreuve complète ne montrent pas de progression significative entre les MSM et les GSM. Néanmoins, dans la tâche Dénombrement production, les stratégies utilisées sont qualitativement différentes entre ces deux classes d'âge, témoignant d'une automatisation de la compétence en fin de GSM qui n'est pas encore présente en fin de MSM. De plus, la tâche Vocabulaire mathématique permet de mettre en lumière une progression sur trois des dix items proposés, ce qui démontre une expansion du lexique entre la MSM et la GSM.

Limites et forces de l'étude

L'étude présente certaines limites. Tout d'abord, la population étudiée est scolarisée

dans le secteur privé et bénéficie pour une grande partie d'un niveau socio-économique élevé et donc insuffisamment représentatif de l'ensemble des enfants scolarisés en France. Si certains apprentissages à l'entrée à l'école maternelle sont indépendants de l'environnement (ex : arithmétique non-verbale, Jordan et al., 1992 ; 1994), il est aussi reconnu que le niveau socio-économique peut avoir une influence sur les apprentissages en fin de maternelle (Tazouti et al., 2012). Il est possible que le niveau socio-économique de cet échantillon ait un impact sur les résultats pour certaines tâches (notamment vocabulaire mathématique par exemple). De plus, le nombre de participants est insuffisant pour généraliser, avec assurance, nos résultats à l'ensemble de la population nationale. Il serait intéressant d'élargir cette étude à un plus grand nombre d'enfants de cette même classe d'âge, en particulier de niveaux socio-économiques différents et variés.

Par ailleurs, l'étude est originale et d'intérêt public. Elle permet de faire un état des lieux des compétences des enfants de MSM au développement typique au regard des données fournies par la littérature scientifique et des modèles théoriques pris en référence. Elle fournit désormais des repères développementaux utiles aux orthophonistes pour leurs actions de prévention, d'évaluation ou d'intervention auprès des jeunes enfants de 4 ans et demi, en fin de MSM, qui ont de plus apprécié les tâches proposées.

Perspectives

Cette étude ouvre des perspectives de recherches intéressantes. En particulier, d'autres propriétés psychométriques devront être évaluées. Par exemple, l'inclusion d'enfants porteurs ou à risque de Trouble des Apprentissages Mathématiques sera nécessaire dans de futures études pour déterminer la validité discriminante et la sensibilité de la sélection de tâches et ainsi garantir le pouvoir diagnostique de la batterie pour cette classe d'âge.

En conclusion, cette étude, en testant l'acceptabilité, l'accessibilité et la validité de construit d'une sélection de tâches de la batterie Examath 5-8 chez les enfants de fin de MSM, s'inscrit dans le développement d'un élargissement de l'étalonnage de la batterie Examath 5-8 à cette classe d'âge. Les tests actuellement publiés ne permettent pas d'évaluer le traitement cognitif

du nombre chez les enfants en fin de MSM alors que certaines compétences sont déjà présentes à cet âge. Il s'agit ainsi d'une avancée notable pour la profession orthophonique. L'étude suggère qu'un protocole d'évaluation incluant les tâches Comparaison symbolique arabe (petits nombres), Subitizing, Comptine numérique orale (premier item : compter le plus loin possible), Dénombrement Compréhension, Dénombrement Production, Jugement de quantité en contexte et Vocabulaire en réception (mathématiques) est valide pour évaluer les compétences mathématiques des jeunes enfants de fin de MSM.

DECLARATION D'INTÉRÊTS

La deuxième et la troisième autrice de l'article sont co-autrices de la batterie Examath 5-8.

RÉFÉRENCES

- Agostini, F., Zoccolotti, P., & Casagrande, M. (2022). Domain-general cognitive skills in children with mathematical difficulties and dyscalculia: A systematic review of the literature. *Brain Sciences*, 12(2), 239. <https://doi.org/10.3390/brainsci12020239>
- American Psychiatric Association, Boyer, P., Crocq, M.-A., & Guelfi, J.-D. (2015). *Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux* (5e éd.). Elsevier Masson.
- Badian, N. A. (1999). Persistent arithmetic, reading, or arithmetic and reading disability. *Annals of Dyslexia*, 49, 43-70. <https://doi.org/10.1007/s11881-999-0019-8>
- Barbarese, W. J., Katusic, S. K., Colligan, R. C., Weaver, A. L., & Jacobsen, S. J. (2005). Math learning disorder: Incidence in a population-based birth cohort 1976-82, Rochester, Minn. *Ambulatory Pediatrics*, 5(5), 281-289. <https://doi.org/10.1367/A04-209R.1>
- 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 of the United States of America*, 102(39), 14116-14121. <https://doi.org/10.1073/pnas.0505512102>
- Billard, C., & Touzin, M. (2012). *Evaluation Des fonctions cognitives et des Apprentissages de 4 à 11 ans (EDA)*. Ortho Édition.
- Billard, C., Mirassou, A., & Touzin, M. (2019). *Batterie Modulable de Tests informatisée (BMT-i)*. Ortho Édition
- Boisseau, P. (2005). *Enseigner la langue orale en maternelle*. RETZ.
- Butterworth, B. (1999). *The Mathematical brain*. Macmillan.
- Carey, S. (2004). Bootstrapping & the origin of concepts. *Daedalus*, 133(1), 59-68. <https://doi.org/10.1162/001152604772746701>
- Castaldi, E., Piazza, M., & Luculano, T. (2020). Learning disabilities: Developmental dyscalculia. *Handbook of Clinical Neurology*, 174, 61-75. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-64148-9.00005-3>
- Cattini, J., & Lafay, A. (2024). Analyse critique des qualités psychométriques des batteries de performances évaluant la cognition mathématique. *A.N.A.E.*, 36(190), 280-290.

- Chevrie Muller, C., & Plaza, M. (2001). *N-EEL - Nouvelles épreuves pour l'examen du Langage de 3 ans 7 mois à 8 ans 7 mois*. Pearson.
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44(1-2), 1-42. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(92\)90049-N](https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90049-N)
- Dehaene, S. (2010). *La Bosse des maths : Quinze ans après*. Odile Jacob.
- Devine, A., Soltész, F., Nobes, A., Goswami, U., & Szűcs, D. (2013). Gender differences in developmental dyscalculia depend on diagnostic criteria. *Learning and Instruction*, 27, 31-39. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2013.02.004>
- Dirks, E., Spyer, G., van Lieshout, E. C. D. M., & de Sonnevile, L. (2008). Prevalence of combined reading and arithmetic disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 41(5), 460-473. <https://doi.org/10.1177/0022219408321128>
- Fayol, M., Perros, H., & Seron, X. (2004). Les représentations numériques : caractéristiques, troubles, développement. Dans M.-N. Metz-Lutz, E. Demont, C. Seegmuller, M. de Agostini, et N. Bruneau (dir.), *Développement cognitif et troubles des apprentissages* (p. 69-107). Solal. <https://hal.science/hal-00115939>
- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307-314. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.05.002>
- Formoso, J., Barreyro, J. P., Jacubovich, S., & Injoque-Ricle, I. (2017). Possible associations between subitizing, estimation and visuospatial working memory (VSWM) in Children. *The Spanish Journal of Psychology*, 20, E27. <https://doi.org/10.1017/sjp.2017.23>
- Fuson, K. C. (1988). *Children's counting and concepts of number*. Springer-Verlag Publishing.
- Gelman, R., & Gallistel, C. R. (1978). *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)
- Ginsburg, H. P., & Russell, R. L. (1981). Social class and racial influences on early mathematical thinking. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 46(6), 1-69. <https://doi.org/10.2307/1165946>
- 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>
- Gray, S. A., & Reeve, R. A. (2014). Preschoolers' dot enumeration abilities are markers of their arithmetic competence. *PLOS ONE*, 9(4), e94428. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094428>
- Gross-Tsur, V., Manor, O., & Shalev, R. S. (1996). Developmental dyscalculia: Prevalence and demographic features. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 38(1), 25-33. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1996.tb15029.x>
- Halberda, J., & Feigenson, L. (2008). Developmental change in the acuity of the « number sense »: The approximate number system in 3-, 4-, 5-, and 6-year-olds and adults. *Developmental Psychology*, 44(5), 1457-1465. <https://doi.org/10.1037/a0012682>
- Helloin, M. C., & Lafay, A. (2021). *Examath 5-8* [Logiciel]. HappyNeuron Pro.
- Helloin, M. C., & Thibault, M. P. (2006). *Exalang 3-6* [Logiciel]. HappyNeuron Pro.
- Hinton, V. M., Flores, M. M., Schweck, K., & Burton, M. E. (2015). The effects of a supplemental explicit counting intervention for preschool children. *Preventing School Failure: Alternative Education for Children and Youth*, 60(3), 183-193. <https://doi.org/10.1080/1045988X.2015.1065400>
- Hornburg, C. B., Schmitt, S. A., & Purpura, D. J. (2018). Relations between preschoolers' mathematical language understanding and specific numeracy skills. *Journal of Experimental Child Psychology*, 176, 84-100. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2018.07.005>
- INSEE. (2020). *Évolution et structure de la population en 2017*. https://www.insee.fr/fr/statistiques/4515315?sommaire=4515349&geo=FE-1#ancre-POP_T6
- Johnson, N. C., Turrou, A. C., McMillan, B. G., Raygoza, M. C., & Franke, M. L. (2019). « Can you help me count these pennies? »: Surfacing preschoolers' understandings of counting. *Mathematical Thinking and Learning: An International Journal*, 21(4), 237-264. <https://doi.org/10.1080/10986065.2019.1588206>
- Jordan, N. C., Huttenlocher, J., & Levine, S. C. (1992). Differential calculation abilities in young children from middle- and low-income families. *Developmental Psychology*, 28(4), 644-653. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.28.4.644>
- Jordan, N. C., Kaplan, D., Locuniak, M. N., & Ramineni, C. (2007). Predicting first-grade math achievement from developmental number sense trajectories. *Learning Disabilities Research & Practice*, 22(1), 36-46. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5826.2007.00229.x>
- Jordan, N. C., Levine, S. C., & Huttenlocher, J. (1994). Development of calculation abilities in middle- and low-income children after formal instruction in school. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 15(2), 223-240. [https://doi.org/10.1016/0193-3973\(94\)90014-0](https://doi.org/10.1016/0193-3973(94)90014-0)
- Krajcsi, A., Szabó, E., & Mórocz, I. Á. (2013). Subitizing is sensitive to the arrangement of objects. *Experimental Psychology*, 60(4), 227-234. <https://doi.org/10.1027/1618-3169/a000191>
- Lafay, A., & Cattini, J. (2018). Analyse psychométrique des outils d'évaluation mathématique utilisés auprès des enfants francophones. *Canadian Journal of Speech-Language Pathology and Audiology*, 42(2), 127-144.
- Lafay, A., Cornet, N. M., & Barilaro, M. (2023). Le vocabulaire mathématique de l'enfant : revue de littérature systématique et synthèse narrative. *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*, 71(8), 399-410. <https://doi.org/10.1016/j.neurenf.2023.06.004>
- Lafay, A., Saint-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (2014). L'évaluation des habiletés mathématiques de l'enfant : inventaire critique des outils disponibles. *Glossa*, 116, 33-58. <https://www.glossa.fr/index.php/glossa/article/view/599>
- Lecointre, A., Lépine, R., & Camos, V. (2005). Développement et troubles des processus de quantification. Dans M.-P. Noël (dir.), *La dyscalculie : trouble du développement numérique de l'enfant* (p. 41-75). Solal.
- Levine, S. C., Jordan, N. C., & Huttenlocher, J. (1992). Development of calculation abilities in young children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 53(1), 72-103. [https://doi.org/10.1016/s0022-0965\(05\)80005-0](https://doi.org/10.1016/s0022-0965(05)80005-0)
- Lewis, C., Hitch, G. J., & Walker, P. (1994). The prevalence of specific arithmetic difficulties and specific reading difficulties in 9- to 10-year-old boys and girls. *The Journal of Child Psychology & Psychiatry*, 35(2), 283-292. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1994.tb01162.x>

- Mandler, G., & Shebo, B. J. (1982). Subitizing : An analysis of its component processes. *Journal of Experimental Psychology: General*, 111(1), 1-22. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.111.1.1>
- Mazzocco, M. M. M., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Preschoolers' precision of the approximate number system predicts later school mathematics performance. *PLOS ONE*, 6(9), e23749. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023749>
- Meljac, C., & Lemmel, G. (2007). *UDN-II Construction et utilisation du nombre*. ECPA.
- Mononen, R., & Niemivirta, M. (2023). Patterns of symbolic numerical magnitude processing and working memory as predictors of early mathematics performance. *European Journal of Psychology of Education*, 38(1), 311-332. <https://doi.org/10.1007/s10212-021-00596-4>
- Rousselle, L., & Noël, M.-P. (2007). Basic numerical skills in children with mathematics learning disabilities: A comparison of symbolic vs non-symbolic number magnitude processing. *Cognition*, 102(3), 361-395. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.01.005>
- Saxe, G. B., & Kaplan, R. (1981). Gesture in early counting: A developmental analysis. *Perceptual and Motor Skills*, 53(3), 851-854. <https://doi.org/10.2466/pms.1981.53.3.851>
- 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, R. M., Sullivan, J., Marušič, F., Žaucer, R., Biswas, P., Mišmaš, P., Plesničar, V., & Barner, D. (2020). Do children use language structure to discover the recursive rules of counting? *Cognitive Psychology*, 117, 101263. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2019.101263>
- Share, D. L., Moffitt, T. E., & Silva, P. A. (1988). Factors associated with arithmetic-and-reading disability and specific arithmetic disability. *Journal of Learning Disabilities*, 21(5), 313-320. <https://doi.org/10.1177/002221948802100515>
- Tazouti, Y., Viriot-Goeldel, C., Matter, C., Geiger-Jaillet, A., Carol, R., & Deviterne, D. (2012). Pratiques éducatives familiales et apprentissages premiers à l'école maternelle française et au Kindergarten allemand. *Éducation & formations*. <https://hal.science/hal-01862886>
- Turan, E., & de Smedt, B. (2023). Understanding mathematical development in preschool children: The association between mathematical language and mathematical abilities. *Cognitive Development*, 66, 101318. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2023.101318>
- Van De Rijt, B. A. M., & Van Luit, J. E. H. (1998). Effectiveness of the Additional Early Mathematics program for teaching children early mathematics. *Instructional Science*, 26(5), 337-358. <https://doi.org/10.1023/A:1003180411209>
- Van Nieuwenhoven, C., Grégoire, J., & Noël, M.-P. (2001). *Tedi-MATH. Test diagnostique des compétences de base en mathématiques de la MSM au CE2*. ECPA-Pearson.
- Van Rinsveld, A., Schiltz, C., Majerus, S., & Fayol, M. (2020). When one-two-three beats two-one-three: Tracking the acquisition of the verbal number sequence. *Psychonomic Bulletin & Review*, 27(1), 122-129. <https://doi.org/10.3758/s13423-019-01704-8>
- Vogel, S. E., & de Smedt, B. (2021). Developmental brain dynamics of numerical and arithmetic abilities. *Npj Science of Learning*, 6, 22. <https://doi.org/10.1038/s41539-021-00099-3>
- 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>
- Wege, T. E., de Smedt, B., Gilmore, C., & Inglis, M. (2023). Counting many as one: Young children can understand sets as units except when counting. *Journal of Experimental Child Psychology*, 225, 105533. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2022.105533>
- Wilkey, E. D., & Ansari, D. (2020). Challenging the neurobiological link between number sense and symbolic numerical abilities. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1464(1), 76-98. <https://doi.org/10.1111/nyas.14225>
- Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, 358(6389), 749-750. <https://doi.org/10.1038/358749a0>
- Yun, C., Havard, A., Farran, D., Lipsey, M., Bilbrey, C., & Hofer, K. (2011). Subitizing and mathematics performance in early childhood. *Proceedings of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, 33, 680-684. <https://escholarship.org/uc/item/8hs5h4f2>