

Les interventions efficaces dans le cas de troubles des apprentissages en mathématiques

Marie-Pascale Noël

- 1) A paraître dans la revue *ANAE : Approche neuropsychologique des apprentissages chez l'enfant*, 197, 001-008.

Professeure à l'UCLouvain (Université Catholique de Louvain)
Maitre de recherche au Fonds National de la Recherche Scientifique de Belgique
Responsable académique du Centre de Consultations Psychologiques Spécialisées en
Neuropsychologie et logopédie de l'enfant.
Marie-pascale.noel@uclouvain.be
10 place C. Mercier, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique

Résumés (moins de 500 signes)

Cet article examine les interventions visant à remédier aux difficultés d'apprentissage en mathématiques, en abordant 4 questions. Quelle est l'efficacité de l'entraînement des processus cognitifs généraux, tels que la mémoire de travail ? Quels sont les interventions sur les processus numériques de base les plus efficaces ? Peut-on agir sur l'anxiété mathématique ? Une intervention efficace peut-elle aussi normaliser l'activité cérébrale chez les enfants en difficulté d'apprentissage ?

This article examines interventions to remedy learning difficulties in mathematics, addressing 4 questions. How effective is training general cognitive processes, such as working memory? Which interventions for basic numerical processes are most effective? Is it possible to act on mathematical anxiety? Can an effective intervention also normalize brain activity in children with learning difficulties?

Este artículo examina las intervenciones dirigidas a remediar las dificultades de aprendizaje en matemáticas, abordando 4 preguntas. ¿Hasta qué punto es eficaz el entrenamiento de procesos cognitivos generales, como la memoria de trabajo? ¿Cuáles son las intervenciones más eficaces para los procesos numéricos básicos? ¿Es posible actuar sobre la ansiedad matemática? ¿Puede una intervención eficaz normalizar también la actividad cerebral de los niños con dificultades de aprendizaje?

Mots clés :

Dyscalculie, difficultés d'apprentissages, mathématiques, intervention, entraînement, efficace, anxiété mathématique

Dyscalculia, learning difficulties, mathematics, intervention, training, effective, mathematical anxiety

Discalculia, dificultades de aprendizaje, matemáticas, intervención, formación, eficaz, ansiedad matemática

Les difficultés d'apprentissage en mathématiques (DAM) sont associées, sur le plan cognitif, à des faiblesses dans certains processus cognitifs généraux d'une part, et à des déficits dans des processus numériques fondamentaux d'autre part (Noël, Rousselle & De Visscher, 2013). De nombreuses études ont également mis en lumière les corrélats neurofonctionnels des DAM. Par ailleurs, il convient de noter que les troubles d'apprentissage en mathématiques peuvent également être influencés par des facteurs émotionnels. Cet article se propose d'explorer les approches thérapeutiques et les interventions efficaces dans le cadre des DAM, en tenant compte de ces 4 dimensions.

1. Facteurs cognitifs généraux

La recherche scientifique a examiné divers facteurs cognitifs généraux qui facilitent l'apprentissage des mathématiques, en particulier les fonctions exécutives telles que les capacités d'inhibition, les capacités attentionnelles et les capacités de mémoire de travail. Dans ce chapitre, l'accent sera mis spécifiquement sur les capacités de mémoire de travail.

Plusieurs études ont démontré que les capacités de mémoire de travail sont corrélées aux performances en mathématiques et constituent également des prédicteurs significatifs de la facilité d'apprentissage dans ce domaine (méta-analyse de Peng, Namkung, Barnes & Sun, 2016). Par exemple, chez des jeunes enfants âgés de 4 à 5 ans, il a été établi que de bonnes capacités de mémoire de travail sont associées à une acquisition plus précoce du vocabulaire numérique, de la compréhension de la suite numérique et du niveau d'élaboration de la chaîne numérique verbale (Noël, 2009). De plus, chez des enfants de première année primaire (CP), ceux présentant de meilleures capacités de mémoire de travail réussissent à résoudre des additions simples avec une plus grande précision et emploient des stratégies plus avancées que leurs pairs ayant des capacités de mémoire de travail moins développées (Noël, Seron & Trovarelli, 2004). De nombreuses recherches ont également révélé que les enfants souffrant de difficultés d'apprentissage en mathématiques présentent, en moyenne, des capacités de mémoire de travail inférieures à celles des enfants typiques (voir la méta-analyse de David, 2012).

Comme il s'agit de compétences générales qui ont un impact sur l'ensemble des processus d'apprentissage, plusieurs chercheurs ont eu l'idée de développer des rééducations ou des entraînements de la mémoire de travail en espérant avoir ainsi un impact sur l'apprentissage mathématique. En collaboration avec Nastasia Honoré, nous avons développé deux recherches de ce type. Les deux études s'intéressaient à des enfants de GSM (5 ans) répartis aléatoirement entre un groupe expérimental et un groupe contrôle.

Dans la première étude (Honoré & Noël, 2017a), les enfants recevaient un entraînement quotidien durant 5 semaines avec le programme Cogmed (Klingberg, Forssberg, & Westerberg, 2002), un logiciel visant la stimulation des capacités de la mémoire de travail. Dans l'entraînement expérimental, le niveau de difficulté, en termes de nombre d'items à mémoriser, augmentait au fur et à mesure des séances suivant la capacité de l'enfant (apprentissage progressif et adaptatif) alors que l'entraînement contrôle restait à un niveau de difficulté très faible. Les enfants étaient testés avant tout entraînement, directement après et 10 semaines après la fin de l'entraînement. Juste après l'intervention, nous avons observé un

effet significatif sur 2 tâches de mémoire visuo spatiale (ce qui est intéressant puisque ce programme travaille sur cette composante mnésique), mais aucune amélioration de la mémoire verbale. Malheureusement, 10 semaines plus tard, cet effet n'était plus présent. Il s'agissait donc d'un bénéfice temporaire. Enfin, aucun effet n'a pu être observé dans aucune des 6 tâches numériques évaluées.

Des résultats similaires ont aussi été observés dans notre seconde étude (Honoré et Noël, 2017b) dans laquelle nous avons utilisé un programme de stimulation de la mémoire de travail verbale. La moitié des enfants de 5 ans recevaient 16 séances de ce programme alors que les autres recevaient un entraînement contrôle (écoute d'histoires et apprentissage de vocabulaires). Cette intervention s'est montrée très peu efficace pour améliorer les compétences en mémoire de travail verbale ou visuo-spatiale (effet significatif sur 1 tâche sur 4) et n'a eu aucun impact sur le développement numérique des enfants.

Nos résultats ne sont pas isolés. En effet, bien que certaines études aient rapporté des résultats prometteurs, la méta-analyse de Melby-Lervåg et Hulme (2013) montre que les entraînements de la mémoire de travail ont une efficacité faible et limitée à court terme qui souvent ne se traduit pas par un transfert significatif vers les compétences arithmétiques.

2. Processus numériques de base

Les bébés naissent avec la capacité de discriminer des numérosités, pourvu qu'elles soient suffisamment distantes (sur le plan numérique) l'une de l'autre (Xu & Spelke, 2000). L'hypothèse sous-jacente est que nous aurions dès le départ, un mécanisme de représentation approximative de la numérosité, l'Approximate Number System ou ANS. Selon certains, cette représentation permettrait de comprendre le sens des mots nombres par un simple processus de couplage. Cette représentation donnerait sens, de manière plus large, aux mathématiques. La précision de ce système serait associée aux compétences mathématiques futures et la dyscalculie serait due à un déficit de cette représentation approximative de la quantité (Mazzocco, Feigenson & Halberda, 2011, Piazza et al., 2010 ou Decarli & al., 2023). Sur base de cette idée, certaines recherches ont montré qu'un entraînement visant à augmenter la précision de cette représentation avait aussi un impact sur les capacités mathématiques (par exemple, Hyde, Khanum & Spelke, 2014, mais voir les critiques de Szucs & Myers, 2017).

Une autre perspective met l'accent sur le fait que la plupart des cultures ont développé un (ou plusieurs) système(s) numérique(s) symbolique(s) : des mots, des chiffres, ... Généralement, le premier code numérique symbolique que l'enfant apprend est le système numérique verbal. Assez rapidement, le petit de 2-3 ans apprend la séquence de la chaîne numérique verbale (un, deux, trois,) et l'utilise pour dénombrer des petites collections. Même lorsque l'enfant maîtrise ces premières compétences, il lui faudra plusieurs mois, voire presque un an, pour comprendre la signification des mots nombres qu'il utilise déjà. C'est à travers la tâche « donne-moi » (3 billes, par exemple), que cette compréhension de la valeur cardinale des mots-nombres est évaluée (Wynn, 1992, Rousselle & Vossius, 2021). La durée prolongée nécessaire à l'apprentissage de la valeur cardinale de « un », « deux », « trois », etc., indique qu'il ne s'agit probablement pas d'un simple processus de couplage avec le système numérique approximatif (ANS). Au contraire, ce processus semble constituer un véritable défi car il requiert la construction d'une nouvelle représentation, à savoir une représentation numérique « exacte ». En effet, lorsque l'on demande à un enfant de donner 5 billes, par exemple, il doit être en mesure de donner précisément cinq billes, et non 4 ou 6. Cette construction se baserait notamment sur la fonction de succession : la valeur du mot « $n + 1$ » est la même que celle du

mot précédent (n) dans la suite de la chaîne numérique verbale, plus un (Carey, 2000). Ce ne serait qu'une fois cette représentation numérique exacte construite, qu'elle serait mise en lien avec l'ANS, permettant alors, d'estimer le cardinal d'une collection sans avoir à dénombrer les éléments (Le Corre & Carey, 2007). Dans cette optique, Noël et Rousselle (2011) ont suggéré que les apprentissages arithmétiques étaient basés essentiellement sur cette représentation exacte et que la dyscalculie résulterait d'une difficulté à créer et à manipuler cette représentation.

Dans une étude avec Nastasia Honoré (Honoré & Noël, 2016), nous avons comparé deux entraînements numériques proposés à des jeunes enfants de fin de maternelle (GSM): l'un qui portait sur des quantités non symboliques (des collections de points) et qui favorisait donc l'activation de l'ANS et l'autre qui portait sur des nombres symboliques (des chiffres arabes) et qui favorisait l'activation de la représentation numérique exacte. Chacun de ces entraînements comportait deux tâches principales : une comparaison dans laquelle l'enfant devait trouver la plus petite/grande quantité ou chiffre parmi 3, et une tâche de positionnement de nombres (arabes ou collections de points) sur une ligne numérique. Dans chacune de ces tâches, le niveau de difficulté augmentait progressivement au cours de l'entraînement (entraînement adaptatif avec feedback continu). Un troisième groupe, contrôle, écoutait des histoires et apprenait de nouveaux mots de vocabulaire. Chacun des 3 groupes bénéficiait de 10 sessions de 30 minutes. Les deux entraînements numériques se sont révélés très efficaces, entraînant une augmentation des performances lors d'autres tâches de comparaison numérique et de positionnement de nombres sur une ligne numérique. Cependant, l'entraînement sur les collections a surtout permis d'améliorer les performances dans les tâches non symboliques, tandis que l'entraînement sur les nombres arabes a permis d'améliorer les performances dans les tâches symboliques et non symboliques. Enfin, dans une tâche non entraînée d'addition, nous avons observé une progression significative suite aux deux entraînements, mais de plus grande ampleur après l'entraînement symbolique que non symbolique. Ces résultats vont également dans le sens de la méta-analyse de Schneider et al. (2017), qui indique que les capacités de comparaison de collections ou de nombres arabes sont liées de manière significative aux performances en mathématiques, mais que cette dernière corrélation est significativement plus importante.

Les modèles actuels partent du postulat que la magnitude numérique est représentée sur un médium spatial orienté de gauche à droite. De nombreuses recherches montrent en effet une association entre la magnitude du nombre à traiter et le côté spatial de la réponse (effet SNARC). Par exemple, dans une tâche de comparaison ou de jugement de parité, les participants réagissent plus rapidement aux petits nombres avec des réponses du côté gauche et aux grands nombres avec des réponses du côté droit (Dehaene, Bossini, & Giraux, 1993). Dans la résolution de problèmes arithmétiques (Masson & Pesenti, 2014, pour une revue, voir Prado & Knops, 2024), on observe un déplacement attentionnel vers la droite pour les opérations d'addition et un déplacement vers la gauche pour les opérations de soustraction (Masson, Dormal, Stephany & Schiltz, 2024). Dans ce contexte, Siegler (2016) parle d'une ligne numérique mentale et montre que des entraînements à des jeux numériques dans lesquels les nombres sont disposés de manière linéaire avec les petits à gauche et les grands à droite conduisent à des améliorations de performance dans des tâches telles la comparaison de nombres ou le positionnement des nombres sur une ligne (Ramani & Siegler, 2008, Booth & Siegler, 2008).

Par ailleurs, toute une littérature s'est intéressée au rôle des doigts dans la cognition numérique, allant jusqu'à développer l'idée d'une cognition incarnée dans laquelle la

représentation des nombres serait intégrée à la représentation motrice et sensorielle des doigts (pour une revue de la littérature, voir Neveu, Geurten, Durieux & Rousselle, 2023).

En lien avec ces approches, nous (Crollen & al., 2020) avons évalué l'importance de 2 facteurs lors de l'apprentissage arithmétique : (1) la présentation du matériel d'intervention sous format linéaire ou aléatoire et (2) des expériences sensorimotrices ou uniquement visuelles. Notre paradigme comportait 4 types d'interventions brèves (3 séances de 20 minutes) portant sur l'apprentissage de petites additions ou soustractions et présentée à des enfants de grande section de maternelle. Illustrons ces 4 interventions avec la situation suivante : « Donald donne 4 billes à Mickey, puis il lui en donne encore 2. Combien Mickey a-t-il de billes ? ». Dans la condition *visuelle linéaire*, une série de 10 billes « transparentes » sont dessinées en ligne sur une feuille de papier avec Mickey d'un côté et Donald de l'autre (voir figure 1). Pour résoudre le problème, l'expérimentateur colle 4 pastilles rouges sur les billes du côté de Mickey, puis 2 pastilles bleues sur les suivantes et demande à l'enfant de produire la réponse. Dans la condition *linéaire avec expérience sensorimotrice*, les billes sont disposées sur une abaque avec d'un côté Mickey, de l'autre Donald. Cette fois, l'enfant est acteur : il fait glisser 4 billes du côté de Mickey, met une pince à linge, puis fait glisser 2 autres billes vers Mickey et met une nouvelle pince à linge. Dans la condition *aléatoire visuelle*, 10 billes « transparentes » sont dessinées de manière aléatoire sur la feuille de papier avec Mickey d'un côté et Donald de l'autre. L'expérimentateur colle 4 pastilles rouges sur certaines billes aléatoires, puis 2 pastilles bleues sur d'autres. Enfin, dans la condition *aléatoire avec expérience sensorimotrice*, deux pots sont présentés : le pot de Mickey est vide au départ, celui de Donald a 10 billes. L'enfant met 4 billes dans la boîte de Mickey, puis en rajoute 2 autres.

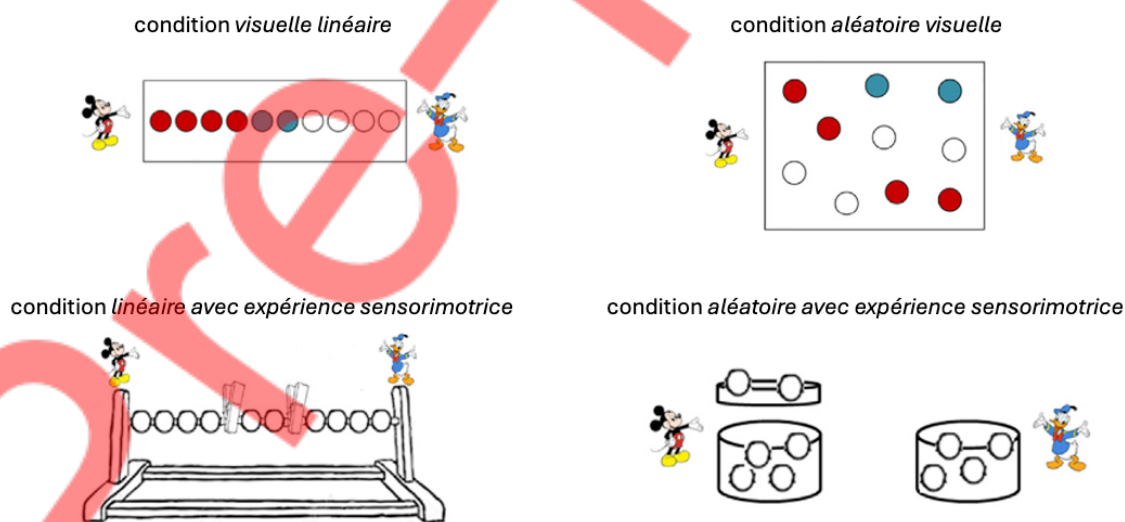


Figure 1 : Illustrations des 4 interventions expérimentales de Crollen & al. (2020)

Les 4 interventions examinées démontrent une efficacité significative. Toutefois, la progression la plus marquée dans la capacité à résoudre des calculs simples est observée dans les deux conditions où l'enfant interagit manuellement avec le matériel. En revanche, la présentation du matériel, linéaire ou non, n'influence pas les résultats.

1. Particularités neuro-fonctionnelles

Plusieurs études ont montré que les enfants avec des DAM présentent des particularités sur le plan cérébral (même si ces différences ne sont pas observées de manière identiques dans toutes les études, voir De Smedt et al., 2019 pour une synthèse). Au niveau de la structure cérébrale, une densité de matière grise réduite a été observée dans le cortex pariétal postérieur, y compris le sillon intra pariétal (Isaacs, & al., 2001 ; Rotzer et al., 2008 ; Rykhlevskaia, & al., 2009) ainsi que dans le cortex préfrontal (Rotzer et al., 2008) et dans les zones hippocampiques (Rykhlevskaia et al., 2009). Ces zones correspondent grossièrement aux processus de représentation de la magnitude numérique (pour le sillon intra-pariétal), aux processus de contrôle et aux processus mnésiques. Des connexions plus faibles entre le cortex préfrontal et le cortex pariétal postérieur ont également été rapportées chez les enfants avec DAM (Tsang, & al., 2009 ; Van Beek, & al., 2014, Rykhlevskaia et al., 2009, Kucian et al., 2014) ou au contraire plus forte (Michels, O'Gorman & Kucian, 2018). Enfin, une moindre activité a été observée dans le sillon intra pariétal lors de tâches de comparaison non symboliques (Price, & al., 2007) ou symboliques (Mussolin et al., 2010, Soltész, & al., 2007) ainsi que dans l'ordonnancement de chiffres (Kucian et al., 2011). Lors d'activités de calcul par contre, une activité cérébrale accrue a été mesurée dans le réseau fronto-pariétal (Davis et al., 2009, Rosenberg-Lee et al., 2015), probablement lié à la mise en œuvre de mécanismes compensatoires caractérisés par un recrutement plus important des zones de soutien associées à la mémoire de travail ou aux processus de contrôle.

En lien avec ces particularités neuro-fonctionnelles, l'étude de Luculano et al. (2015) nous semble particulièrement intéressante. Ces auteurs vont offrir un programme d'intervention portant sur l'apprentissage des petites additions et soustractions à des enfants dyscalculiques en mesurant, non seulement leur performance en calcul avant et après l'intervention mais aussi les effets de cette intervention sur l'activation cérébrale lors d'une tâche de vérification de petits calculs. Des enfants de 3^{ème} année primaire (CE2) présentent des difficultés avérées en mathématiques sont comparés à des enfants de la même année scolaire qui ne présentent pas de difficultés d'apprentissage mais de même niveau de quotient intellectuel et de capacités de mémoire de travail. L'intervention comporte 22 séances de 40 à 50 minutes réparties sur 8 semaines. Les séances correspondent à des séquences d'instruction soigneusement séquencées et intégrées pour apprendre à résoudre des additions et des soustractions sur des nombres à un chiffre. Sans surprise, initialement, le groupe d'enfants en difficulté présente des performances en calcul inférieures à celles du groupe témoin. Cette disparité disparaît après l'intervention, ce qui indique l'efficacité de celle-ci. Avant et après l'intervention, les auteurs procèdent également à une évaluation de l'activité cérébrale des enfants lorsqu'ils vérifient des opérations d'addition ou de soustraction (par exemple, $3 + 4 = 7$?). Avant l'intervention, une activation cérébrale plus prononcée est observée chez les enfants dyscalculiques par rapport aux enfants typiques, notamment dans le cortex préfrontal, le cortex pariétal et le cortex occipito-temporal ventral. Après l'intervention, il y a une normalisation complète de l'activité cérébrale : plus aucune différence significative n'est observée entre celle des enfants en difficulté ou des enfants typiques

2. Facteurs émotionnels

Enfin, il convient de souligner l'impact des facteurs émotionnels sur les difficultés d'apprentissage. Les enfants présentant des DAM sont souvent confrontés à des échecs scolaires, peuvent être la cible de moqueries et, par conséquent, développer une estime de soi diminuée. Parmi les difficultés fréquemment observées, l'anxiété mathématique se distingue. Ce phénomène se manifeste par une appréhension ou une anxiété face à des situations

nécessitant un traitement des nombres ou un raisonnement mathématique. Une patiente adulte atteinte de dyscalculie illustre parfaitement cette réalité : « *Lorsque je dois me confronter à un calcul, je me liquéfie, je suis prise de sueurs glacées, puis j'ai des crises de panique, des angoisses paralysantes, mes capacités intellectuelles s'effondrent, je ne comprends plus rien, tout se mélange et je bascule dans une crise de nerf qui m'épuise pour plusieurs heures* ».

Devine, Hill, Carey, et Szűcs (2018) ont étudié ce problème sur plus de 1700 enfants d'écoles primaires et secondaires. Ils montrent que les enfants souffrant d'une dyscalculie développementale ont deux fois plus de risque que les enfants typiques de présenter une anxiété mathématique élevée. Toutefois, tous les enfants en difficulté ne sont pas tous anxieux et cette anxiété mathématique n'est pas toujours liée à des difficultés d'apprentissage en mathématiques. En effet, dans cette étude, 77% des enfants avec une haute anxiété mathématique ont des performances en mathématiques dans la norme voire au-dessus.

Cette anxiété mathématique est doublement pénalisante. D'une part, il n'est pas agréable de se sentir anxieux et cette appréhension peut conduire à des stratégies d'évitement et donc, à une exposition moindre aux contenus ou exercices mathématiques. D'autre part, cette anxiété mathématique est liée à des pensées ou verbalisations internes qui vont occuper de l'espace en mémoire de travail et réduire de ce fait, les capacités cognitives disponibles pour mener à bien la tâche mathématique en cours.

Cette anxiété mathématique se manifeste également sur le plan cérébral. Ainsi, Young, Wu et Menon (2012) ont comparé des enfants de 7-8 ans selon qu'ils avaient une haute ou une faible anxiété mathématique. Ils ont montré que lors d'une tâche de vérification de la réponse à des petits calculs, l'anxiété mathématique était associée à une hyperactivité dans les régions de l'amygdale droite qui jouent un rôle important dans le traitement des émotions négatives et à une activité réduite dans les régions du cortex pariétal postérieur et du cortex préfrontal dorsolatéral, des régions impliquées dans le raisonnement mathématique et le calcul. En outre, les enfants présentant une haute anxiété mathématique montraient une connectivité plus élevée entre l'amygdale et les régions du cortex préfrontal ventromédian qui régulent les émotions négatives.

L'équipe de recherche dirigée par Menon s'interroge sur les moyens d'assistance à apporter aux enfants confrontés à des problèmes d'anxiété mathématique, ainsi que sur la possibilité que des interventions efficaces puissent exercer un impact significatif sur la signature cérébrale associée à ce problème. Dans le domaine des phobies, il est bien établi que les thérapies d'exposition se révèlent particulièrement efficaces. Supekar, Iuculano, Chen et Menon (2015) avancent l'hypothèse selon laquelle une intervention axée sur les mathématiques, réalisée dans un environnement sécurisant et caractérisée par une progression graduelle permettant à l'enfant d'évoluer à son propre rythme, ainsi que l'intégration de facteurs de motivation positive et d'éléments ludiques, pourrait, d'une certaine manière, agir comme une forme de thérapie d'exposition pour les problèmes d'anxiété mathématique. Sur cette base, ces auteurs proposent à des enfants de 3^{ème} primaire (CE2) qui ont une anxiété mathématique élevée de suivre un cycle de 22 séances portant sur la résolution d'additions et de soustractions simples. Ces enfants sont comparés à un autre groupe témoin d'enfants de même niveau d'âge, de QI, de mémoire de travail et de performance en calculs mais avec une faible anxiété mathématique. Avant l'intervention, ces groupes ne diffèrent donc qu'en termes d'anxiété mathématique. Sur le plan cérébral, lors d'une tâche de vérification de petits calculs, des différences émergent et montrent une activation plus forte chez les enfants anxieux dans les régions de l'amygdale droite, du sillon intrapariétal gauche, du gyrus

angulaire gauche et des régions préfrontales. L'intervention portant sur la résolution d'addition et de soustraction amène effectivement une diminution tout à fait significative de l'anxiété mathématique mais aussi une normalisation de l'activité cérébrale.

3. Conclusions

Les recherches relatives aux interventions visant à promouvoir le développement numérique, telles que présentées dans cet article, fournissent des informations variées et significatives.

Un premier ensemble de travaux a cherché à favoriser le développement de processus cognitifs généraux en lien avec l'apprentissage des mathématiques. En particulier, plusieurs études se sont concentrées sur la mémoire de travail. Ces investigations ont globalement révélé une efficacité limitée. Les programmes de stimulation de la mémoire de travail affichent une efficacité modérée, souvent associée à une amélioration temporaire des capacités mnésiques, avec un transfert minimal vers les compétences numériques.

En revanche, les interventions axées sur les processus numériques de base se sont révélées efficaces pour stimuler le développement numérique. Nos recherches ont démontré que les programmes portant sur les nombres symboliques semblent plus performants que ceux se limitant aux quantités non symboliques. De plus, l'implication active de l'enfant dans la manipulation du matériel est cruciale. En revanche, la modalité de présentation du matériel, qu'elle soit en ligne ou non, n'a pas montré d'impact significatif.

Par ailleurs, des interventions efficaces peuvent entraîner une normalisation de l'activité cérébrale lors de la tâche ciblée. Par exemple, un programme d'instruction dédié à la résolution de petits calculs a non seulement amélioré la capacité à effectuer des additions et des soustractions, mais a également normalisé les activations cérébrales mesurées lors d'une tâche de vérification de calculs. De surcroît, ce type d'instruction a contribué à réduire le niveau d'anxiété mathématique chez les enfants et à normaliser l'activité cérébrale observée lors de la même tâche de vérification.

Dans un contexte clinique, il est toutefois essentiel de souligner qu'aucune de ces interventions ne permet de « guérir » la dyscalculie. En effet, ce trouble des apprentissages en mathématiques nécessite souvent un suivi à long terme, durant lequel l'enfant est soutenu dans les différentes phases d'apprentissage de concepts numériques de plus en plus abstraits et de procédures ou algorithmes de plus en plus complexes. Intervenir dans le cadre de troubles des apprentissages demande une très bonne compréhension du profil des forces et faiblesses de l'enfant dans le domaine numérique mais également dans le domaine cognitif plus large. En effet, la rééducation diffère selon qu'il s'agisse de difficultés de transcodage, de calcul, de résolution de problèmes ou de compréhension des nombres fractionnaires, par exemple. Les stratégies proposées pourront également différer selon que l'enfant a de bonnes capacités de mémoire, ou non, ou des capacités de raisonnement faibles ou fortes. Pour chaque type de processus numérique à soutenir, le clinicien doit avoir une idée claire du parcours développemental dans ce domaine et des erreurs typiques ou mauvaises compréhensions souvent observées par les enfants en difficulté. De cette manière, le clinicien pourra mieux comprendre où en est l'enfant et ses mécompréhensions éventuelles. Enfin, il est important de connaître la littérature sur les différents modes d'intervention et, en particulier, celles qui se sont avérées les plus efficaces. A partir de là, il s'agira de créer un parcours progressif et motivant, basé sur les preuves. C'est ce travail d'analyse et de synthèse que nous avons proposé dans notre dernier ouvrage (Noël & Karagannakis, 2020). Celui-ci se veut une base

concrète et détaillée pour permettre à chaque clinicien de développer au mieux les séquences d'interventions efficaces qui répondent au besoin de l'enfant qu'il accompagne, tout en ayant une compréhension théorique des mécanismes sous-jacents.

Pre-print

Références bibliographiques

Booth, J. L., & Siegler, R. S. (2008). Numerical magnitude representations influence arithmetic learning. *Child Development*, 79, 1016–1031.

Carey, S. (2000) The origin of concepts. *Journal of Cognition and Development*, 1(1), 37-41.

Crollen, V., Noël, M-P., Honoré, N., Degroote, V. & Collignon, O. (2020). Investigating the respective contribution of sensory modalities and spatial disposition in numerical training. *Journal of Experimental Child Psychology*, 190, 104729.

David, C. (2012). Working memory deficits in math learning difficulties: A meta-analysis. *International Journal of Developmental Disabilities*, 58(2):67-84.

Davis, N., Cannistraci, C. J., Rogers, B. P., Gatenby, J. C., Fuchs, L. S., Anderson, A. W., & Gore, J. C. (2009). Aberrant functional activation in school age children at-risk for mathematical disability: A functional imaging study of simple arithmetic skill. *Neuropsychologia*, 47(12), 2470–2479.

De Smedt, B., Peters, L., Ghesquière, P., Fritz-Stratmann, A., Haase, V., & Räsänen, P. (2019). Neurobiological origins of mathematical learning disabilities or dyscalculia: A review of brain imaging data. In *International Handbook of Mathematical Learning Difficulties: From the Laboratory to the Classroom* (pp. 367–384). Springer; New York.

Decarli, G., Sella, F., Lanfranchi, S., Gerotto, G., Gerola, S., Cossu, G., & Zorzi, M. (2023). Severe developmental dyscalculia is characterized by core deficits in both symbolic and nonsymbolic number sense. *Psychological science*, 34(1), 8–21.

Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 626–641.

Devine, A., Hill, F., Carey, E., & Szűcs, D. (2018). Cognitive and emotional math problems largely dissociate: Prevalence of developmental dyscalculia and mathematics anxiety. *Journal of Educational Psychology*, 110(3), 431–444.

Honoré, N. & Noël, M-P. (2016). Improving preschoolers' arithmetic through number magnitude training: The impact of non-symbolic and symbolic training, *Plos One*, Nov 22;11(11):e0166685.

Honoré, N. & Noël, M-P. (2017a). Can working memory training improve preschoolers' numerical abilities. *Journal of Numerical Cognition*, 3(2), 516–539.

Honoré, N. & Noël, M-P. (2017b). Impact of working memory training targeting the central executive on kindergarteners' numerical skills. *Journal of Education and Training Studies*, 5(5), 131-144.

Hyde, D. C., Khanum, S., & Spelke, E. S. (2014). Brief non-symbolic, approximate number practice enhances subsequent exact symbolic arithmetic in children. *Cognition*, 131(1), 92-107.

Isaacs, E. B., Edmonds, C. J., Lucas, A., & Gadian, D. G. (2001). Calculation difficulties in children of very low birthweight: a neural correlate. *Brain : a journal of neurology*, 124(Pt 9), 1701–1707.

Iuculano, T., Rosenberg-Lee, M., Richardson, J., Tenison, C., Fuchs, L., Supekar, K., & Menon, V. (2015). Cognitive tutoring induces widespread neuroplasticity and remediates brain function in children with mathematical learning disabilities. *Nature communications*, 6, 8453.

Klingberg, T., Forssberg, H., & Westerberg, H. (2002). Training of working memory in children with ADHD. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 24(6), 781-791.

Kucian, K., Ashkenazi, S. S., Hänggi, J., Rotzer, S., Jäncke, L., Martin, E., & von Aster, M. (2014). Developmental dyscalculia: a dysconnection syndrome?. *Brain structure & function*, 219(5), 1721–1733.

Kucian, K., Grond, U., Rotzer, S., Henzi, B., Schönmann, C., Plangger, F., et al. (2011). Mental number line training in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage*, 57(3), 782–795.

Le Corre, M. & Carey, S. (2007). One, two, three, four, nothing more: An investigation of the conceptual sources of the verbal counting principles. *Cognition*, 105(2), 395-438.

Masson, N., & Pesenti, M. (2014). Attentional bias induced by solving simple and complex addition and subtraction problems. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67(8), 1514–1526.

Masson, N., Dormal, V., Stephany, M., & Schiltz, C. (2024). Eye movements reveal that young school children shift attention when solving additions and subtractions. *Developmental Science*, 27(2), e13452.

Mazzocco, M. M., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Impaired acuity of the approximate number system underlies mathematical learning disability (dyscalculia). *Child Development*, 82(4), 1224-1237.

Melby-Lervåg, M., Hulme, C. (2013). Is working memory training effective? A meta-analytic review. *Developmental Psychology*, 49(2), 270-291

Michels, L., O'Gorman, R., & Kucian, K. (2018). Functional hyperconnectivity vanishes in children with developmental dyscalculia after numerical intervention. *Developmental cognitive neuroscience*, 30, 291–303.

Mussolin, C., De Volder, A., Grandin, C., Schlögel, X., Nassogne, M.-C., & Noël, M.-P. (2010). Neural correlates of symbolic number comparison in developmental dyscalculia. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22, 860–874.

Neveu, M., Geurten, M., Durieux, N., & Rousselle, L. (2023). Finger use and arithmetic skills in children and adolescents: A scoping review. *Educational Psychology Review*, 35(1), 1–33.

Noël, M-P. (2009). Counting on working memory when learning to count and to add : a preschool study. *Developmental Psychology*, 45(6), 1630-1643.

Noël, M.-P. & Karagiannakis, G. (2020). *Dyscalculie et difficultés d'apprentissage en mathématiques. Guide pratique de prise en charge*. Louvain-la-Neuve, Belgique : De Boeck Supérieur.

Noël, M.-P. & Rousselle, L. (2011). Developmental changes in the profiles of dyscalculia: an explanation based on a double exact-and-approximate number representation model. *Frontiers in Human Neuroscience*, (5), article 165, 1-4.

Noël, M.-P., Rousselle, L. & De Visscher, A. (2013). La dyscalculie développementale : à la croisée de facteurs numériques spécifiques et de facteurs cognitifs généraux. *Développements: Revue interdisciplinaire du développement cognitive normal et pathologique*, 2(15), 24-31.

Noël, M.-P.; Seron, X. & Trovarelli, F. (2004). Working memory as a predictor of addition skills and addition strategies in children. *Current Psychology of Cognition*, 22(1), 3-25.

Peng, P., Namkung, J., Barnes, M., & Sun, C. (2016). A meta-analysis of mathematics and working memory: Moderating effects of working memory domain, type of mathematics skill, and sample characteristics. *Journal of Educational Psychology*, 108(4), 455–473.

Piazza, M., Facoetti, A., Trussardi, A. N., Bertelletti, I., Conte, S., Lucangeli, D., Dehaene, S. & Zorzi, M. (2010). Developmental trajectory of number acuity reveals a severe impairment in developmental dyscalculia. *Cognition*, 116, 33-41.

Prado, J., Knops, A. (2024). Spatial attention in mental arithmetic: A literature review and meta-analysis. *Psychonomic Bulletin & Review*, 31, 2036–2057.

Price, G. R., Holloway, I., Räsänen, P., Vesterinen, M., & Ansari, D. (2007). Impaired parietal magnitude processing in developmental dyscalculia. *Current Biology*, 17(24), 1042–1043.

Ramani, G. B., & Siegler, R. S. (2008). Promoting broad and stable improvements in low-income children's numerical knowledge through playing number board games. *Child Development*, 79, 375–394.

Rosenberg-Lee, M., Ashkenazi, S., Chen, T., Young, C. B., Geary, D. C., & Menon, V. (2015). Brain hyper-connectivity and operation-specific deficits during arithmetic problem solving in children with developmental dyscalculia. *Developmental Science*, 18(3), 351–372.

Rotzer, S., Kucian, K., Martin, E., von Aster, M., Klaver, P., & Loenneker, T. (2008). Optimized voxel-based morphometry in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage*, 39(1), 417–422.

Rousselle, L., & Vossius, L. (2021). Acquiring the cardinal knowledge of number words: a conceptual replication. *Journal of Numerical Cognition*, 7(3), 411-434.

Rykhlevskaia, E., Uddin, L. Q., Kondos, L., & Menon, V. (2009). Neuroanatomical correlates of developmental dyscalculia: Combined evidence from morphometry and tractography. *Frontiers in Human Neuroscience*, 3(November), 51.

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).

Siegler R. S. (2016). Magnitude knowledge: the common core of numerical development. *Developmental science*, 19(3), 341–361.

Soltész, F., Szucs, D., Dékány, J., Márkus, A., & Csépe, V. (2007). A combined event-related potential and neuropsychological investigation of developmental dyscalculia. *Neuroscience Letters*, 417(2), 181–186.

Supekar, K., Iuculano, T., Chen, L., & Menon, V. (2015). Remediation of childhood math anxiety and associated neural circuits through cognitive tutoring. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience*, 35(36), 12574–12583.

Szűcs, D. & Myers, T.V. (2017). A critical analysis of design, facts, bias and inference in the approximate number system training literature: A systematic review. *Trends in Neuroscience and Education*, 6, 187-203.

Tsang, J. M., Dougherty, R. F., Deutsch, G. K., Wandell, B. A., & Ben-Shachar, M. (2009). Frontoparietal white matter diffusion properties predict mental arithmetic skills in children. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 106(52), 22546–22551.

Van Beek, L., Ghesquière, P., Lagae, L., & De Smedt, B. (2014). Left fronto-parietal white matter correlates with individual differences in children's ability to solve additions and multiplications: A tractography study. *NeuroImage*, 90, 117–127.

Wynn, K. (1992). Children's acquisition of the number words and the counting systems. *Cognitive Psychology*, 24, 220-251.

Xu, F. & Spelke, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74, B1-B11.

Young, C. B., Wu, S. S., & Menon, V. (2012). The neurodevelopmental basis of math anxiety. *Psychological Science*, 23(5), 492-501.