LA DYSCALCULIE DÉVELOPPEMENTALE : BASES CÉRÉBRALES ET COGNITIVES

Flora **SCHWARTZ**

Department of Psychiatry and Behavioral Sciences, Stanford University, USA

Email: florasch@stanford.edu

Jérôme **PRADO**

Institut des Sciences Cognitives Marc Jeannerod, UMR 5304, Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS) & Université de Lyon, France

Email: jprado@isc.cnrs.fr

Résumé

L'hétérogénéité du niveau en mathématiques des élèves peut être attribuée à de multiples facteurs socio-économiques, affectifs et motivationnels. Pourtant, il est estimé que de 3% à 7% des enfants et adolescents sont confrontés à des difficultés importantes en mathématiques malgré un environnement familial et scolaire tout à fait adapté. Ces enfants sont susceptibles d'être atteints de dyscalculie, un trouble de l'apprentissage neuro-développemental se caractérisant par des difficultés importantes en mathématiques qui ne sont pas dues à un retard intellectuel ou à un déficit sensoriel. Si les causes de ce trouble sont encore méconnues, cela est en partie dû au profil hétérogène des enfants dyscalculiques, qui ne présentent ni les mêmes difficultés en mathématiques, ni les mêmes atteintes cognitives. Afin d'identifier au mieux les individus à risque et de proposer une prise en charge précoce et adaptée, les études en sciences cognitives et neurosciences se sont multipliées depuis plusieurs années. Dans cette revue, nous décrivons les déficits en mathématiques les plus fréquemment observés chez les enfants dyscalculiques et passons en revue quelques-unes des théories principales expliquant la dyscalculie.

Mots clés : dyscalculie, psychologie cognitive, neurosciences cognitives

La dyscalculie fait partie des troubles des apprentissages scolaires. Elle est définie par un retard sévère d'acquisition des mathématiques, qui n'est lié ni à un retard intellectuel, ni à un retard scolaire général, ni à un autre trouble neurologique ou psychiatrique (Kaufmann & al., 2013; von Aster & Shalev, 2007). Peu connue du grand public, la dyscalculie est souvent présentée comme le pendant de la dyslexie (ou trouble de l'acquisition de la lecture) pour les mathématiques. D'ailleurs, les questions théoriques qui se posent sur la définition de la dyslexie se posent également sur la dyscalculie. Ces questions renvoient à la spécificité des difficultés, à leur sévérité, aux éventuelles comorbidités et aux critères de diagnostic à utiliser. Dans une première partie, nous tentons d'abord de préciser ce qu'est la dyscalculie en présentant les principaux critères de diagnostic et leur variabilité. Nous décrivons ensuite les difficultés en mathématiques rencontrées par les dyscalculiques, puis les déficits cognitifs associés à ce trouble de l'apprentissage. Dans une seconde partie, nous discutons de quelques-unes des principales théories cherchant à expliquer les causes de la dyscalculie.

I. QU’EST-CE QUE LA DYSCALCULIE ?

1. Prévalence, critères de diagnostic et comorbidités

La prévalence de la dyscalculie serait comprise entre 3 et 7%, avec un taux variant de 1 à 10% selon les études démographiques (Devine et al., 2013). Cette variabilité est due à la divergence des critères utilisés pour caractériser un individu comme « dyscalculique ».

Un premier critère essentiel pour identifier la dyscalculie est bien entendu la sévérité des difficultés en mathématiques. Pourtant, il n’existe pas de consensus quant au seuil statistique à appliquer, ni quant à la nature des troubles à observer. Par exemple, les études démographiques considèrent comme seuil pathologique un score en mathématiques qui peut aller du 3ème (Desoete & al., 2004) au 15ème centile (Barbaresi & al., 2005; Dirks & al., 2008). Certaines études estiment que la dyscalculie se caractérise par un retard en mathématiques d’au moins 2 ans rapport aux enfants de même niveau scolaire (Gross-Tsur et al., 1996). Par ailleurs, les troubles ne doivent pas être transitoires mais doivent au contraire persister dans le temps (Mazzocco & Myers, 2003) voire se maintenir après une remédiation (Desoete & al., 2004). Aussi, la nature des tests à effectuer pose question. Faut-il utiliser des tests scolaires, impliquant plusieurs compétences ? Faut-il privilégier des tests de compétences numériques élémentaires (Kaufmann & al., 2013)? En tout cas, le choix des tests de mathématiques influence l’identification des dyscalculiques puisque différentes compétences seront mesurées. L’influence du test utilisé pour le diagnostic dépend en plus du stade développemental (Mazzocco & Myers, 2003). Les différences individuelles sont susceptibles de s’effacer lorsque le test choisi cible des capacités mathématiques précoces, qui auront été acquises par les dyscalculiques. Pour finir, une anxiété aux mathématiques chez certains individus (Ashcraft & Kirk, 2001) risque de dégrader leur performance dans une situation de test, alors que leurs capacités à manipuler les nombres seraient tout à fait dans la norme.

Deuxièmement, puisque la dyscalculie n’est pas sensée venir d’un retard mental, les capacités intellectuelles devraient être prises en compte dans la définition de ce trouble. Notamment, le Quotient Intellectuel (QI) devrait être dans la norme. Il a même été suggéré qu’un écart conséquent entre le QI et le score standardisé en mathématiques constituerait un des critères de diagnostic. Certaines études épidémiologiques qui ont ainsi pris en compte cet écart entre les compétences en mathématiques et le QI global (Barbaresi & al., 2005) ou le QI non-verbal (Lewis et al., 1994) reportent une prévalence de 1,3 à 10%. Cependant, l’importance de cet écart entre QI et niveau en mathématiques a été remise en cause (Mazzocco & Myers, 2003) puisqu’il ne permettrait pas d’identifier de façon plus fiable les individus dyscalculiques. Certains enfants ne présentant pas d’écart entre QI et score en mathématiques sont susceptibles de présenter des troubles en mathématiques aussi pénalisants que les enfants montrant un écart entre QI et score en mathématiques. Ainsi, il serait bénéfique d’utiliser des mesures complémentaires pour détecter la dyscalculie (Mazzocco & Räsänen, 2013).

Une mesure supplémentaire s’avère être le niveau en lecture, qui est souvent testé dans les études de prévalence. Toutefois, les capacités de lecture sont fortement corrélées au niveau en mathématiques (Bull & Scerif, 2001; Devine & al., 2013). D’ailleurs, une proportion importante de dyscalculiques présenterait un retard en lecture (Lewis & al., 1994; Ostad, 1998). Plus précisément, environ la moitié des dyscalculiques présenterait également une dyslexie (Lewis & al., 1994; Ostad, 1998). Un autre trouble fréquemment associé à la dyscalculie est le trouble du déficit de l'attention avec hyperactivité (TDAH), qui pourrait toucher jusqu'à 25% des dyscalculiques (Gross-Tsur & al., 1996). La présence de ces comorbidités représente un enjeu supplémentaire pour le diagnostic de la dyscalculie. En effet, ces comorbidités peuvent rendre la dyscalculie plus difficile à détecter (von Aster & Shalev, 2007). Au contraire, les comorbidités peuvent avoir un effet additif sur les difficultés en mathématiques. Il a été montré que les enfants présentant à la fois une dyscalculie et une dyslexie réussissaient moins bien certaines tâches mathématiques que les « dyscalculiques purs » (von Aster & Shalev, 2007).

Enfin, on peut se demander si les différences culturelles (notamment linguistiques) et le sexe des individus ont un impact sur la prévalence. Cependant, cela ne semble pas être le cas. En effet, plusieurs études ont montré que la dyscalculie toucherait les garçons autant que les filles (Devine & al., 2013; Gross-Tsur & al., 1996; Koumoula & al., 2004). Aussi, une prévalence comparable d'environ 5% a été reportée à travers différents pays avec différentes langues, d'Israël (Gross-Tsur & al., 1996) aux Etats-Unis (Mazzocco & Myers, 2003), en passant par la Grèce (Koumoula & al., 2004), les Pays-Bas (Dirks & al., 2008) et la Belgique (Desoete & al., 2004).

Une meilleure caractérisation de la dyscalculie nécessiterait donc de tester plusieurs compétences mathématiques et leur évolution dans le temps, d'écarter l'anxiété en mathématiques comme principale source de difficulté, de vérifier la présence de comorbidité et d'évaluer les capacités cognitives générales.

2. Les difficultés en mathématiques dans la dyscalculie

Les mathématiques font appel à un large ensemble de compétences, dont certaines sont plus importantes que d'autres à un âge donné. La connaissance du nombre comporte elle-même plusieurs concepts à acquérir, notamment la cardinalité et l'ordinalité, ainsi que plusieurs notations à maîtriser, des entiers naturels aux nombres décimaux et fractions. Apprendre la correspondance entre une quantité numérique, un chiffre arabe et un mot-nombre est déjà un premier défi. Maîtriser l'arithmétique et les notions de base de géométrie sont d'autres défis de l'école primaire. Extraire les informations numériques pertinentes d'un énoncé est une compétence supplémentaire à développer. Toutes ces compétences peuvent être atteintes chez les dyscalculiques. Nous présentons ici les difficultés en mathématiques les plus fréquemment observées chez les dyscalculiques, en gardant à l'esprit que la définition de la dyscalculie varie en fonction des études expérimentales et que les dyscalculiques peuvent également présenter des déficits cognitifs plus généraux (par exemple en mémoire de travail). Nous commençons par les déficits observés lors d'activités numériques non-symboliques, avant d'évoquer les difficultés à maîtriser le comptage et les différentes notations numériques, puis les retards d'acquisition de l'arithmétique.

Représentation non-symbolique des nombres

Les activités numériques non symboliques renvoient à l'estimation et à la manipulation de nombres présentés sous forme de nuages de points ou de collections d'objets, voire de séquence de sons. Une tâche très fréquemment utilisée par les psychologues et neuroscientifiques consiste à comparer deux quantités numériques présentées simultanément ou successivement, ou à estimer la quantité numérique présentée. Les très petits nombres (de 1 à 4) sont généralement étudiés séparément des plus grands nombres puisque leur traitement serait qualitativement différent (Feigenson & al., 2004). En effet, l'être humain aurait une représentation exacte des nombres inférieurs à 4 (le comptage ne serait pas nécessaire). A l'inverse, la représentation des quantités supérieures à 4 est considérée approximative (Feigenson & al., 2004).

D'une part, la représentation approximative des quantités numériques a été largement étudiée chez les dyscalculiques, notamment par des tâches de comparaison. La difficulté de ce type de tâches (illustré par la Figure 1) dépend à la fois de la distance entre les deux quantités et de leur taille. En effet, plus les quantités sont « proches », plus la comparaison est difficile. Par exemple, il est plus difficile de comparer 24 à 28 points que de comparer 24 à 48 points. Mais il est également plus difficile de comparer deux quantités de grande taille que de petite taille. Ainsi, il est plus difficile de comparer 44 à 48 points que 24 à 28 points (même si la distance entre les deux quantités est égale). Ces effets de « distance » et de « taille » peuvent être calculés pour le temps de réponse et le taux de réponses correctes de chaque participant. Il est également possible de combiner ces effets. En effet, plus les deux quantités à comparer augmentent, plus la différence entre ces deux quantités doit augmenter pour qu'elles puissent être distinguées. L'écart minimal nécessaire à la comparaison de deux quantités est variable d'un individu à l'autre et se nomme « l'acuité numérique ». L'acuité numérique obéit à la loi de Weber (van Oeffelen & Vos, 1982), qui postule que la différence de sensibilité sensorielle entre deux stimuli de même type dépend de leur rapport, plus que de leur valeur absolue (Fechner, 1966). L'acuité numérique s'exprime sous forme de fraction ou de nombre décimal (la fraction de weber) obtenue en divisant la différence entre les 2 nombres comparés par le plus petit nombre. Plus l'acuité numérique est élevée, plus l'individu est capable de discriminer des rapports proches de 1. Un déficit de représentation des quantités non-symboliques dans la dyscalculie est suggéré par plusieurs études, mais n'a pas toujours été répliqué. Ainsi, quelques études ont montré que les dyscalculiques auraient une acuité numérique plus faible que les enfants neurotypiques (Mazzocco, Feigenson & Halberda, 2011; Piazza & al., 2010). Les dyscalculiques auraient également un effet de distance plus marqué que les neurotypiques (Mejias & al., 2012; Mussolin, Mejias & Noël, 2010; Price & al., 2007) : la différence de performance entre les comparaisons faciles et difficiles serait plus conséquente. En effet, ils auraient besoin de plus de temps pour les comparaisons difficiles que les neurotypiques. Deux autres études reportent aussi un temps de réponse moyen plus long chez les dyscalculiques (Kucian & al., 2011; Landerl, 2013). En revanche, d'autres travaux n'ont pas trouvé de différences entre tout-venants et dyscalculiques au niveau de la représentation des quantités non-symboliques (De Smedt & Gilmore, 2011; Landerl & Kölle, 2009; Rousselle & Noël, 2007)

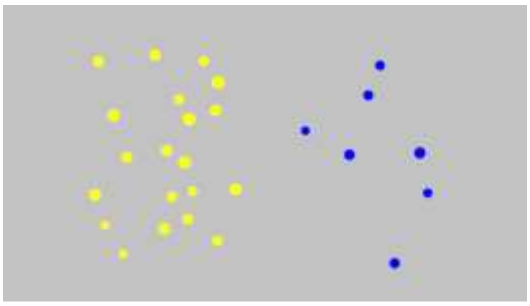

Figure 1 : Tâche typique de comparaison non-symbolique. Le participant doit juger s'il y a plus de points jaunes ou de points bleus.

D'autre part, la reconnaissance exacte des quantités de 1 à 4, appelée « subitizing », a aussi été documentée chez les dyscalculiques. Cette capacité très précoce serait affectée chez les dyscalculiques, qui seraient plus lents à distinguer les petits nombres (Landerl, 2013; Schleifer & Landerl, 2011) et montreraient même un effet de distance (Ashkenazi & al., 2013; Landerl, 2013). Par exemple, reconnaître la quantité 4 serait plus long que reconnaître la quantité 2. A l'inverse, une telle différence est réduite voire inexistante chez les enfants contrôles, qui distinguent aussi rapidement 2 que 4. La latence observée chez les dyscalculiques par rapport aux individus de même âge pourrait venir d'une exploration visuelle moins efficace, comme suggéré par Ashkenazi et al. (2013) et par une étude de cas en eye-tracking (Moeller & al., 2009). Cependant une autre étude récente n'a pas montré de difficulté de subitizing chez les dyscalculiques (Szucs & al., 2013).

En somme, la représentation des quantités non-symboliques semble être une des difficultés associée à la dyscalculie. Ce déficit est toutefois plus controversé que la représentation des quantités symboliques et pourrait dépendre de l'âge des enfants testés (Noël & Rousselle, 2011).

Représentation symbolique des nombres

La maîtrise des mathématiques passe par l'association d'une quantité numérique donnée à un symbole (mot-nombre ou chiffre arabe). Il faut aussi comprendre la correspondance entre différents formats de notation. Le passage d'un format à un autre, ou transcodage, est essentiel à la compréhension du système numérique (Seron & Fayol, 1994). Le système numérique indo-arabe que nous utilisons fonctionne avec un système positionnel en « base 10 » : 10 unités forment une dizaine, 10 dizaines forment une centaine, etc. En d'autres termes, il faut 10 éléments d'un niveau hiérarchique pour passer au niveau hiérarchique suivant. Les différents niveaux hiérarchiques sont notés dans un ordre précis : par exemple, pour « 267 », les unités sont notées à droite du nombre et les centaines à gauches. Ces structures enchâssées rappellent que les mathématiques comportent une dimension syntaxique qui nécessite un apprentissage rigoureux. Les dyscalculiques montreraient un retard dans la maîtrise de cette syntaxe numérique. Ils auraient plus de difficulté à nommer un chiffre arabe présenté (Landerl & al., 2004), ou à écrire un chiffre dicté (**Figure 2**), ainsi qu'à manipuler des nombres à plusieurs chiffres (Andersson, 2010). A un niveau scolaire plus avancé, les dyscalculiques auraient plus de difficulté à lire un nombre décimal et à identifier un nombre rationnel (Mazzocco & Devlin, 2008). Ce retard d'acquisition du système numérique est en lien avec leurs difficultés à comprendre le système positionnel (Andersson, 2010).

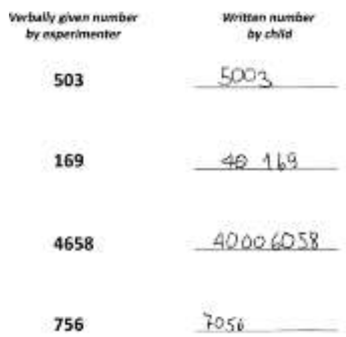

Figure 2 : Exemple d'erreurs commises par un enfant dyscalculique lors d'une dictée de nombres. Le système positionnel n'est que partiellement acquis. (Reproduit à partir de Kucian & von Aster, 2015).

Une maîtrise moins efficace du code associé à chaque quantité numérique devrait (sans surprise) entraîner des difficultés à comparer des nombres présentés sous un format donné. La méthode utilisée pour évaluer cette compétence est la même que celle employée pour les comparaisons non-symboliques. La plupart des études ont montré que la comparaison de nombres sous forme symbolique était plus lente chez les dyscalculiques, aussi bien pour les nombres à un chiffre (De Smedt & Gilmore, 2011; Iuculano & al., 2008; Landerl & al., 2009, 2004; Landerl & Kölle, 2009; Rousselle & Noël, 2007) que pour les nombres à plusieurs chiffres (Landerl & al., 2009; Landerl & Kölle, 2009). L'effet de distance serait également plus marqué chez les enfants dyscalculiques (Ashkenazi, Rubinsten & Henik, 2009; Mussolin, Mejias & Noël, 2010).

Contrairement aux enfants tout-venant, les symboles numériques ne semblent pas non plus évoquer d'intuitions spatiales spécifiques chez les enfants dyscalculiques. En effet, les recherches en psychologie cognitive montrent que les nombres sont généralement associés à un côté ou un autre de l'espace mental selon leur valeur, aussi bien chez l'adulte (Dehaene, Bossini & Giraux, 1993) que chez l'enfant (Berch & al., 1999; Yang & al., 2014). Cette relation est connue sous le nom d'effet « SNARC » (Spatial-Numerical Association of Response Code). Elle est initialement basée sur une différence de temps de réaction lorsque les participants jugent la parité d'un nombre. Plus précisément, le temps de réponse des participants pour les petits nombres est dans l'ensemble plus rapide avec la main gauche qu'avec la main droite. A l'inverse, le temps de réponse pour les grands nombres est dans l'ensemble plus rapide avec la main droite qu'avec la main gauche. Il existe un autre marqueur de ce lien nombres-espace chez l'enfant. Au cours du développement, les enfants apprennent normalement à représenter les nombres sur un espace mental, appelé ligne numérique mentale (Dehaene, 1997). Ceci est généralement testé en demandant à l'enfant de placer un nombre sur une ligne dont les extrémités gauche et droite sont notées respectivement 0 et 100. Au début de l'apprentissage des mathématiques, une partie disproportionnée de la ligne serait occupée par les petits nombres, tandis que les grands nombres seraient compressés à l'extrémité droite de la ligne. Cette représentation s'affine progressivement en fin d'école maternelle et début d'école primaire de sorte que la distance numérique devient proportionnelle à la distance spatiale entre les symboles de la ligne numérique mentale. Le degré de linéarisation de la ligne numérique mentale serait un prédicteur essentiel de l'apprentissage des mathématiques en début d'école primaire (Booth & Siegler, 2006; Gunderson & al., 2012). Ces associations des symboles numériques avec l'espace seraient notamment atteintes chez les dyscalculiques. En premier lieu, les enfants dyscalculiques ne présenteraient pas d'effet SNARC (Bachot et al., 2005). Ensuite, les dyscalculiques présenteraient une ligne numérique mentale immature (Geary & al., 2007 ; Geary & al., 2008).

La manipulation des symboles numériques est donc limitée chez les dyscalculiques, qu'il s'agisse de l'association entre nombres et espace ou du passage d'un format numérique à un autre. Ces différentes anomalies de représentation des nombres se répercutent sur l'apprentissage de l'arithmétique et des notions mathématiques plus complexes.

Apprentissage des faits et procédures arithmétiques

L'apprentissage de l'arithmétique est un des piliers de l'école primaire et mobilise de nombreuses compétences. Une maîtrise solide de l'arithmétique requiert non seulement une exécution sans faille des procédures de calcul, mais aussi une mémorisation de certains faits, de bonnes connaissances conceptuelles et des capacités de résolution de problème (Dowker, 2005). Différentes études ont montré les limites des dyscalculiques dans un ou plusieurs de ces aspects de l'arithmétique.Pour résoudre une opération arithmétique simple comme « 4 + 3 », un large panel de stratégies peut être utilisé (Baroody & Ginsburg, 1986). Il est généralement admis qu'au début de l'apprentissage de l'arithmétique, les enfants ont recours au comptage. Une première stratégie observée à l'école maternelle, le « comptage du tout » consiste à dénombrer les deux opérandes 4 et 3 séparément. Chaque opérande peut être matérialisé par une collection d'objets ou par ses doigts. Ainsi, l'enfant va réciter la séquence numérique en partant de 1 jusqu'à atteindre le cardinal du premier opérande, puis répéter cela pour le second opérande. Pour finir, l'enfant va dénombrer l'ensemble formé par les deux opérandes. Des stratégies de plus en plus efficaces vont rapidement se développer après 5 ans (Carpenter & Moser, 1984; Groen & Parkman, 1972). Par exemple, l'enfant ne comptera qu'à partir du premier terme, jusqu'au résultat. Puis l'enfant choisira de compter à partir du plus grand terme, ce qui lui fera gagner du temps. Enfin, le comptage sur les doigts s'efface progressivement (Carpenter & Moser, 1984) tandis que le recours à la décomposition va également être observé en milieu de primaire (Russell & Ginsburg, 1984). Par exemple, pour calculer « 6 + 7 » alors qu'il connait le résultat de « 6 + 6 », l'enfant va transformer l'opération en « 6 + 6 + 1 ». Ce raccourci permet d'ajouter simplement une unité à un résultat déjà mémorisé. Les stratégies plus rapides vont remplacer progressivement les stratégies élémentaires. Le calcul va donc s'automatiser avec la pratique chez la majorité des élèves d'école primaire. La stratégie considérée comme la plus optimale consiste à récupérer en mémoire le résultat d'opérations (Ashcraft & Fierman, 1982). Ainsi, il est généralement admis que vers l'âge de 10 ans, les enfants récupèrent en mémoire le résultat des opérations simples. Les faits arithmétiques mémorisés formeraient un réseau, dont les éléments seraient plus ou moins fortement associés selon leur proximité sémantique (Ashcraft, 1992).

En revanche, les enfants dyscalculiques continueront souvent à avoir recours à des stratégies immatures pour résoudre les opérations simples. Par exemple, ils continueront à compter sur leurs doigts plus longtemps que leurs pairs (Geary & al., 2000). La stratégie consistant à dénombrer l'ensemble des opérandes est également davantage utilisée (Geary, 2011), alors que la décomposition est moins souvent utilisée (Hanich & al., 2001).

Dans l'ensemble, ces différences de stratégies de résolution chez les dyscalculiques sont associées à des temps de réponse plus longs et/ou à des erreurs plus nombreuses lors de l'exécution des procédures de calcul (Andersson, 2010; Geary, Brown & Samaranayake, 1991; Jordan, Hanich & Kaplan, 2003), y compris lorsque les opérations arithmétiques sont présentées sous forme d'énoncé (Jordan & al., 2003; Jordan & Montani, 1997; Ostad, 1998). L'exécution imprécise des procédures est à mettre en lien avec une connaissance conceptuelle plus faible. En particulier, les dyscalculiques ont une moins bonne maîtrise des principes arithmétiques tels que la commutativité et l'inversion (Andersson, 2010; Jordan et al., 2003). La commutativité désigne le fait que la position des opérandes n'a pas d'influence sur le résultat de l'addition ou de la multiplication (par exemple, « 8 + 7 = 7 + 8 »). L'inversion renvoie à la relation complémentaire entre les opérations, notamment entre l'addition et la soustraction (par exemple, si « 7 + 3 = 10 » alors « 10 - 3 = 7 »). Une compréhension limitée de ces principes arithmétiques peut expliquer un manque d'automatisation des procédures.

Lorsque la stratégie la plus automatisée, à savoir la récupération en mémoire, est utilisée, elle s'avère moins efficace chez les dyscalculiques (Barrouillet, Fayol & Lathulière, 1997; Geary, Hamson & Hoard, 2000; Geary, Brown & Samaranayake, 1991; Russell & Ginsburg, 1984). En particulier, le réseau de faits arithmétiques serait plus sensible aux interférences (Barrouillet & al., 1997). Ceci est suggéré par l'analyse des erreurs commises par exemple lors de la resolution de multiplications (qui reposent généralement sur un apprentissage par cœur) ou d'additions. Les réponses incorrectes proviennent souvent de la table de l'un des opérandes. Par exemple, lors de la résolution de « 8 x 7 », une erreur fréquente est de répondre « 48 », un produit de la table de 8. De même, lors de la résolution de « 3 + 4 », le produit de « 3 x 4 » serait parfois récupéré. Les dyscalculiques seraient plus sujets à ces intrusions lors de la résolution de multiplications (Barrouillet & al., 1997) et d'additions (Geary & al., 2000).

Enfin, si les dyscalculiques montrent des performances nettement inférieures pour les opérations simples, c'est sans surprise également le cas pour les opérations complexes

(Andersson, 2010; Jordan & al., 2003; Russell & Ginsburg, 1984) sur des nombres à plusieurs chiffres ou sur des nombres décimaux. Les erreurs sont susceptibles de venir d'une mauvaise compréhension du système positionnel, entraînant une erreur de placement des nombres lors d'un calcul posé. La **Figure 3** illustre la résolution par un enfant dyscalculique de 11 ans (testé au laboratoire) d'une addition de 3 termes, dont deux nombres décimaux (« 2,50 + 3,25 + 5 = ? »). Ce participant commet l'erreur de placer le dernier terme entier dans une colonne correspondant aux décimales. Son erreur de positionnement le conduit à conclure que « 2,50 + 3,25 + 5 = 5,80 ».

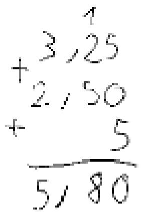

Figure 3 : Exemple de calcul posé par un enfant dyscalculique de 11 ans.

Nous venons de résumer un ensemble de difficultés procédurales, factuelles et conceptuelles rencontrées par les enfants dyscalculiques en mathématiques. Plusieurs études suggèrent un défaut de traitement des quantités non-symboliques (Mazzocco, Feigenson & Halberda, 2011; Piazza & al., 2010), alors que d'autres soulignent davantage le déficit de représentation des quantités symboliques (Rousselle & Noël, 2007). La nature des difficultés en mathématiques et le degré d'atteinte d'une compétence peut donc varier d'un individu à l'autre.

II. LES CAUSES HYPOTHÉTIQUES DE LA DYSCALCULIE

A l'heure actuelle, plusieurs théories proposent d'expliquer les causes de la dyscalculie en combinant des données comportementales et de neuro-imagerie. Nous commençons par présenter une théorie très populaire selon laquelle la dyscalculie serait due à une atteinte spécifique du sens du nombre (Piazza & al., 2010; Wilson & Dehaene, 2007; Butterworth, 2005), puis nous verrons que la dyscalculie pourrait aussi venir d'une incapacité à associer une grandeur numérique à un symbole (Noël & Rousselle 2011). Ces deux hypothèses impliquent que la dyscalculie serait liée à un déficit primaire et spécifique. Nous présentons ensuite quelques théories qui soutiennent que les difficultés mathématiques des dyscalculiques sont causées par des atteintes cognitives plus générales. Celles-ci incluent des troubles visuo-spatiaux (Rourke, 1993; Szucs & al., 2013) ainsi qu'un déficit de ressources attentionnelles et de mémoire de travail (Ashkenazi & Henik 2010; De Visscher & Noël 2013).

1. Un déficit spécifique

Un déficit du sens du nombre

Peut-être l'une des hypothèses parmi les plus populaires postule que la dyscalculie serait liée à une anomalie cérébrale affectant spécifiquement le traitement des quantités numériques non-symboliques. Plus précisément, un dysfonctionnement d'une région cérébrale appelée sillon intra-pariétal (IPS) qui entraînerait des difficultés à reconnaître les quantités numériques non-symboliques, ce qui empêcherait l'acquisition des mathématiques symboliques (Butterworth, 2005; Piazza & al., 2010; Wilson & Dehaene, 2007). Cette hypothèse découle des théories dites du « sens du nombre » (Stanislas Dehaene, 1997; Feigenson & al., 2004) postulant que la représentation des quantités numériques serait une capacité innée, ou en tout cas extrêmement précoce sur le plan du développement. Il est important de noter que les théories diffèrent quant à la définition de « sens du nombre ». Pour certaines, ce « sens du nombre » fait référence à la capacité à traiter et comparer des quantités numériques non-symboliques approximatives (Feigenson & al., 2004). D'autres auteurs définissent le « sens du nombre » comme la capacité à représenter la quantité exacte dans un ensemble (Butterworth, 2005). D'autres encore font la distinction entre les petites quantités exactes et les quantités approximatives (Feigenson & al., 2004) qui seraient traitées selon deux processus distincts, respectivement le subitizing et le système numérique approximatif. Dans tous les cas, ces théories reposent sur l'idée que la faculté à reconnaître les quantités numériques serait très ancienne au niveau de l'évolution. Cette capacité serait partagée par de nombreuses espèces animales, dont les primates non-humains (Brannon & Terrace, 2000), les oiseaux (Brannon et al., 2001), jusqu'aux invertébrés comme les poissons (Agrillo & al., 2009) et les abeilles (Gross et al., 2009). Chez l'homme, les mécanismes de traitement numérique semblent présents dès la naissance (Izard, Sann, Spelke & Streri, 2009). Les bébés seraient capables de subitizing (Wynn, 1992), et pourraient également détecter une différence entre des quantités numériques approximatives (Izard & al., 2009; Xu & Spelke, 2000) et effectuer des opérations approximatives (McCrink & Wynn, 2004). Ces observations comportementales suggèrent que les substrats cérébraux du sens du nombre ont été conservés au cours de l'évolution (Stanislas Dehaene, 1997). En effet, l'implication de l'IPS dans le traitement des nombres a été montrée chez le singe (Nieder & Miller, 2004). Des enregistrements électrophysiologiques ont révélé que des neurones de l'IPS répondent préférentiellement à une quantité numérique donnée. Plus la quantité présentée s'éloigne de la quantité préférée, moins le neurone décharge (Nieder & Miller, 2004). La représentation des quantités numériques viendrait de l'intégration des signaux émis par les différentes populations de neurones sensibles aux différentes quantités numériques. Plus des quantités numériques à comparer seraient éloignées, plus les populations de neurones répondant à chaque quantité seraient distinctes (Dehaene & Changeux, 1993), ce qui faciliterait la comparaison. Chez l'homme, l'IPS répond de la même manière aux différences de quantités numériques (Piazza & al., 2004). La réponse de l'IPS aux quantités numériques s'observe aussi bien dans des conditions passives (Cantlon & al., 2006; Piazza & al., 2004) qu'actives (Dehaene & al., 1999), quel que soit le format des nombres (Pinel et al., 2001) et quelle que soit la modalité de présentation (Eger & al., 2003). De plus, les structures cérébrales impliquées dans le sens du nombre chez l'adulte sont les mêmes chez l'enfant de 4 ans (Cantlon & al., 2006) et chez le bébé de 3 mois (Izard & al., 2008).

Même si les théories du « sens du nombre » postulent que les mécanismes de traitement des quantités numériques sont présents dès la naissance, ces théories ne voient pas ce « sens du nombre » comme une capacité figée. Ainsi, l'acuité numérique (la capacité à différencier des quantités numériques) s'affinerait rapidement au cours des premières années (Halberda & Feigenson, 2008). Alors que le nouveau-né serait sensible à une différence de quantités de 1:3 (Izard & al., 2009), le bébé de 6 mois serait sensible à une différence de 1:2 et le bébé de 9 mois détecterait une différence de 2:3 (Lipton and Spelke, 2003). L'acuité numérique continuerait à progresser au début de l'enfance pour atteindre 3:4 à 3 ans et 5:6 à 5-6 ans (Halberda & Feigenson, 2008). Chez l'adulte, l'acuité numérique serait d'environ 7:8 en moyenne (Barth, Kanwisher & Spelke, 2003) mais pourrait varier de 5:6 à 9:10 selon les individus (Pica, 2004). Les différences inter-individuelles d'acuité numérique chez l'adulte se retrouvent par ailleurs dès le plus jeune âge et seraient relativement stables au cours du développement. Il a par exemple été observé que les bébés disposant d'une moins bonne acuité numérique à 6 mois étaient ceux qui montraient la moins bonne acuité numérique à 9 mois. De telles différences d'acuité numérique pourraient en partie être innées, et dans le même temps liées à un rythme de développement différent (Piazza & al., 2010). Dans tous les cas, les théories du « sens du nombre » soutiennent que la précision avec laquelle les quantités numériques sont représentées chez le jeune enfant serait essentielle à l'acquisition des symboles numériques (Butterworth, 2005; Libertus, Feigenson & Halberda, 2011; Piazza & al., 2010). L'acuité numérique serait effectivement un prédicteur de la réussite en mathématiques à différents stades ontogéniques. Par exemple, la capacité à discriminer des quantités approximatives à 4 ans est corrélée au niveau en mathématiques à 6 ans. Aussi, l'acuité numérique à 14 ans est corrélée à la réussite arithmétique des mêmes individus à 8 ans (Halberda & al., 2008). Cette corrélation positive entre précision du sens du nombre et niveau en mathématiques se maintient même chez l'adulte (Lourenco & al., 2012). A l'extrémité du continuum, plusieurs travaux présentés au chapitre précédent ont montré un déficit d'acuité numérique ou plus globalement un déficit du sens du nombre chez les dyscalculiques (Landerl & al., 2009; Mussolin, Mejias & Noël, 2010; Piazza & al., 2010). Par exemple, Piazza et collègues (2010) ont montré que des enfants dyscalculiques de 10 ans présentaient l'acuité numérique attendue à 5 ans. Il a donc été suggéré que c'est un dysfonctionnement du sens du nombre qui retarderait l'association entre un symbole et sa grandeur numérique chez les dyscalculiques et compliquerait l'acquisition des mathématiques symboliques.

Quelques études de neuro-imagerie ont examiné l'intégrité des substrats cérébraux du « sens du nombre » chez les dyscalculiques. Premièrement, l'IPS présente des atteintes structurales chez ces individus (Rotzer & al., 2008). Au niveau fonctionnel, l'IPS est moins sensible aux variations de quantités numériques chez les dyscalculiques (Mussolin, Mejias & Noël, 2010; Price & al., 2007) et son activité est réduite lors du calcul approximatif (Kucian & al., 2006). Ces quelques études soutiennent l'hypothèse d'une atteinte cérébrale affectant le traitement des quantités numériques dans la dyscalculie.

Les théories du déficit du « sens du nombre » ont donc été appuyées par des données empiriques variées. Cependant, le déficit de représentation des quantités numériques chez les dyscalculiques n'a pas toujours été mis en évidence dans le cas de quantités non-symboliques et s'avère au contraire plus robuste dans le cas de quantités symboliques (De Smedt & al., 2013). Une cause de la dyscalculie pourrait alors être un déficit de représentation des quantités numériques à partir des symboles. L'hypothèse a été nommée « *access-deficit* » ou « déficit d'accès aux quantités numériques » (Rousselle & Noël, 2007).

Un déficit d'accès aux quantités numériques à partir des symboles

Si la précision du système numérique approximatif est un prédicteur de la réussite en mathématiques au cours de la scolarité, les compétences symboliques compteraient davantage (Holloway & Ansari, 2009; Lyons & al., 2014). Une des principales caractéristiques de la dyscalculie est la difficulté à manipuler les symboles numériques, par exemple lors de simples comparaisons ou lors de l'exécution d'un calcul (Geary, Brown & Samaranayake, 1991). D'ailleurs, plusieurs études comportementales ont souligné des difficultés à comparer des nombres sous forme symbolique chez les dyscalculiques en l'absence de déficit de comparaison de nombres sous forme non-symbolique (De Smedt & Gilmore, 2011; Iuculano & al., 2008; Landerl & Kölle, 2009; Rousselle & Noël, 2007). Plus précisément, les difficultés symboliques seraient observées plus tôt que les difficultés à manipuler les quantités numériques approximatives, qui n'émergeraient que vers 9-10 ans (De Smedt & al., 2013). Pour certains chercheurs, cette dissociation suggère que la dyscalculie serait due à un déficit d'accès aux quantités numériques associées aux symboles (Noël & Rousselle, 2011; Rousselle

& Noël, 2007). Pour mieux comprendre cette hypothèse, il faut tout d'abord préciser que la représentation exacte des quantités numériques serait construite, contrairement à la représentation approximative. La signification des premiers adjectifs cardinaux s'acquiert progressivement et successivement (Carey, 2004). Par exemple, l'enfant doit d'abord comprendre que le mot « deux » de la comptine orale correspond uniquement à la cardinalité 2, pour ensuite maîtriser le concept « trois » et comprendre que le mot « trois » renvoie à une unité de plus que le mot « deux ». A un moment du développement, l'enfant réalise qu'il faut ajouter une unité à une cardinalité connue pour atteindre le mot suivant de la comptine numérique (Carey, 2004). La confrontation aux adjectifs cardinaux et symboles numériques permettrait donc l'acquisition d'une représentation exacte des nombres. Les grandeurs numériques sont même automatiquement associées à leur symbole chez les enfants contrôles à l'école primaire (Rubinsten & al., 2002). Or, cette association ne serait pas automatisée chez les dyscalculiques. Quelques travaux ont en effet montré que les adultes dyscalculiques n'accédaient pas automatiquement à la représentation non-symbolique à partir des chiffres arabes. Les participants de ces études devaient réaliser une tâche de Stroop numérique consistant à comparer des chiffres arabes. Le chiffre ayant la plus grande valeur était affiché soit en caractère plus petit que le chiffre ayant la plus petite valeur (5 7), soit en caractère plus grand (5 7). Les participants devaient juger soit la taille physique soit la valeur numérique. En d'autres termes, la quantité numérique interagissait avec un aspect perceptif (facilitation ou interférence). Au contraire des participants contrôles, les adultes dyscalculiques ne montraient pas d'effet d'interférence avec la grandeur numérique lors de la comparaison de taille physique. Ainsi, la présentation d'un chiffre de plus petite valeur en caractère plus grand n'augmentait pas le temps de réaction comme chez les participants contrôles (Ashkenazi, Rubinsten & Henik, 2009; Rubinsten & Henik, 2005). Cela indique que, au contraire des participants contrôles, les dyscalculiques n'accèdent pas automatiquement à la représentation numérique dans cette tâche. Ce résultat suggère un déficit de traitement automatique des symboles numériques et appuie l'hypothèse d'un déficit d'accès aux grandeurs numériques. Des données de neuro-imagerie récentes rejoignent en partie cette théorie en laissant penser que la dyscalculie serait un « syndrome de déconnexion » (Jolles & al., 2016). Les auteurs ont en effet montré une atteinte de la connectivité fonctionnelle entre l'IPS et de nombreuses autres régions cérébrales chez les enfants dyscalculiques, suggérant que le traitement des quantités non-symboliques serait mal synchronisé avec les autres processus (notamment linguistiques) impliqués dans l'arithmétique (Jolles & al., 2016). Ces résultats sont notamment en accord avec le modèle du triple-code selon lequel, chez l'adulte, la représentation analogique des quantités numériques (e.g., ∴) serait connectée à une représentation verbale (e.g., « trois ») et à une représentation visuelle (e.g., « 3 »). Une communication anormale entre ces codes pourrait donc engendrer des difficultés dans le traitement des nombres.

Nous venons d'expliquer que la représentation exacte des nombres serait atteinte chez les dyscalculiques. Cependant, qu'est-ce qui explique le déficit du système numérique approximatif qui émerge vers l'âge de 9-10 ans (De Smedt & al., 2013)? La représentation exacte du nombre, acquise par la confrontation aux symboles, améliorerait le système numérique approximatif (Noël & Rousselle, 2011). Cette proposition est appuyée par des données empiriques indiquant que l'apprentissage des mathématiques formelles améliore l'acuité numérique (Piazza & al., 2013). Chez les indiens Mundurucu d'Amazonie, dont le langage ne comporte pas d'adjectifs cardinaux après 5, une partie de la population suit un enseignement primaire en portugais. Les enfants scolarisés sont alors confrontés aux adjectifs cardinaux portugais et à la correspondance entre un mot, un symbole et un nombre entier. Les enfants scolarisés présentent un système numérique approximatif plus développé que les enfants non-scolarisés, un avantage qui ne semble pas dû à des différences sociales ou cognitives (Piazza & al., 2013). Ainsi, après un développement « programmé » dans les premières années de vie, un environnement culturel riche en symboles numériques permettrait la construction d'une représentation exacte du nombre, ce qui favoriserait l'amélioration du système numérique approximatif (Piazza & al., 2013). A l'inverse, un déficit de traitement symbolique rendrait plus difficile la construction d'une représentation exacte des quantités numériques. Ainsi, la théorie du déficit d'accès permet d'expliquer les différences apparaissant au cours du développement entre dyscalculiques et neurotypiques en ce qui concerne la représentation des quantités non symboliques. Le déficit du « sens du nombre » émergerait progressivement suite à l'affinement du système numérique approximatif par la manipulation des symboles numériques. Ce processus se déroulerait chez les enfants neurotypiques, mais pas chez les dyscalculiques. Cette idée expliquerait pourquoi le déficit de « sens du nombre » ne serait pas observable chez les enfants dyscalculiques avant 9 ans (Noël & Rousselle, 2011). Nous voyons donc que la théorie du déficit d'accès aux quantités numériques à partir des symboles n'est pas totalement incompatible avec les théories du « sens du nombre ». Mais il existe des différences essentielles, en particulier en ce qui concerne la direction du lien entre la représentation exacte et approximatives des nombres.

2. Une dyscalculie secondaire à des déficits généraux

Si la dyscalculie se définit surtout par des difficultés à manipuler les nombres, une grande partie des dyscalculiques présente également des déficits cognitifs plus généraux (Kucian & von Aster, 2015 ; Rubinsten & Henik, 2009). Les difficultés en mathématiques pourraient donc également être attribuables à ces déficits. En particulier, l'une des premières hypothèses avancées pour expliquer la dyscalculie est la présence de troubles visuo-spatiaux (Rourke, 1993).

Les troubles visuo-spatiaux

Dans une série d'études neuropsychologiques, Rourke (1993) a comparé les capacités cognitives de différents groupes d'enfants présentant des déficits en arithmétique en l'absence de retard intellectuel global. L'auteur a dans l'ensemble caractérisé deux groupes d'enfants. Dans un premier groupe, les enfants présentaient un retard en lecture et en arithmétique, le retard en lecture étant plus marqué que le retard en arithmétique. Les enfants de ce groupe avaient un QI verbal inférieur au QI visuo-spatial. De plus, leurs compétences phonologiques étaient inférieures à celles correspondant à leur âge. Au contraire, leurs capacités visuo-spatiales étaient dans la norme. Les enfants du second groupe, en revanche, ne présentaient pas de difficulté de lecture mais leur retard en arithmétique était extrêmement important. Ces enfants montraient un QI verbal normal et un QI visuo-spatial inférieur à la norme. Leurs capacités phonologiques étaient épargnées, mais leurs capacités visuo-spatiales (motrices et perceptives) étaient très atteintes. L'auteur a détaillé les atteintes cognitives chez ce groupe d'enfants : problèmes de coordination motrice, d'orientation droite-gauche, dysgraphie, incapacité à bénéficier d'un feed-back, plus faible perception tactile, représentation des doigts moins développée (agnosie digitale). Ce tableau très similaire au syndrome de Gertsman développemental (Benson & Geschwind, 1970) fait penser à une atteinte de l'hémisphère droit observé en neuropsychologie chez l'adulte. Ce tableau clinique est désigné sous le terme de «dysfonction non-verbale », aussi synonyme de « dyspraxie visuo-spatiale ».

La catégorisation des dyscalculiques en fonction de leur profil cognitif établie par Rourke (1993) se retrouve dans une méta-analyse récente (Szucs, 2016). L'auteur propose de distinguer d'une part les enfants dyscalculiques avec de faibles capacités de mémoire de travail verbale et un retard en lecture, et d'autre part les dyscalculiques avec de faibles capacités de mémoire de travail visuo-spatiale sans retard en lecture (Szucs, 2016). Alors que le premier profil pourrait être qualifié de comorbidité dyslexie-dyscalculie (avec des difficultés en mathématiques secondaires à la dyslexie), le deuxième profil correspond aux symptômes principaux de la dysfonction non-verbale ou dyspraxie visuo-spatiale. Ces conclusions suggèrent également que les difficultés à manipuler les symboles numériques peuvent venir d'une représentation plus fragile de la ligne numérique mentale en mémoire de travail visuo-spatiale, plutôt que de difficultés d'accès au cardinal correspondant (von Aster & Shalev, 2007). En effet, les capacités visuo-spatiales sont liées à la linéarisation de la ligne numérique mentale (Gunderson & al., 2012). Un déplacement efficace le long de la ligne numérique mentale facilite la réalisation de tâches numériques (Fias & van Dijck, 2016). A l'inverse, les individus avec des capacités visuo-spatiales atteintes, comme les patients avec hémi-négligence gauche, montrent un déficit de représentation de la ligne numérique mentale (Zorzi & al., 2002). De la même manière, une anomalie du lien nombres-espace chez les dyscalculiques (Ashkenazi & Henik, 2010; Bachot & al., 2005) pourrait venir de difficultés à se représenter la ligne numérique qui correspond aux nombres à manipuler (Fias & van Dijck, 2016).

Ainsi, ceci soulève l'hypothèse que les difficultés des dyscalculiques ne seraient pas dues à une atteinte d'une capacité isolée comme le « sens du nombre » ou l'accès au sens du nombre, mais plutôt à des déficits cognitifs généraux, notamment en mémoire de travail visuo-spatiale (Rourke 1993; Szucs & al. 2013).

Une hypersensibilité à l'interférence

Dans le cadre des déficits généraux d'attention et de mémoire de travail associés à la dyscalculie, une hypothèse récente offre une explication aux déficits en arithmétique fréquemment rencontrés par les dyscalculiques (Geary, 2004). Les difficultés à maîtriser l'arithmétique élémentaire pourraient venir d'une hypersensibilité à l'interférence (De Visscher & al. 2015; De Visscher & Noël 2014, 2013). Pour mieux comprendre ce dysfonctionnement potentiel de la mémoire de travail et des ressources attentionnelles chez les dyscalculiques, revenons sur les mécanismes de résolution des problèmes arithmétiques.

Les faits arithmétiques seraient stockés en mémoire à long terme, formant un réseau de faits arithmétiques constitué progressivement lors de l'apprentissage du calcul (Campbell, 1995). L'association d'un problème arithmétique et de son résultat serait encodée et ajoutée à ce réseau. Avec la pratique, l'association problème-résultat se renforcerait (Siegler, 1996). La trace mnésique des faits arithmétiques appris se consoliderait. En conséquence, la confrontation à un problème entraînerait la récupération du résultat, qui serait activé temporairement en mémoire de travail (Campbell, 1995). Cependant, la présentation d'un problème activerait non seulement le résultat, mais aussi les faits fortement associés au résultat, c'est-à-dire, sémantiquement proches (Campbell & Timm, 2000). Par exemple, la présentation du problème « 6 x 3 » pourrait activer le résultat « 18 », mais également les réponses non pertinentes « 9 » (confusion avec « 6 + 3 ») ou « 12 » (confusion avec 6 x 2). Ces faits non pertinents, qui peuvent venir de la même table que l'un des opérandes, ou être obtenus en changeant l'opérateur, entreraient en compétition avec le résultat. Plus la similarité entre le résultat et les « compétiteurs » est élevée, plus l'interférence en mémoire de travail est importante (Jonides & Nee, 2006). Un niveau d'interférence important entraînerait donc la formation d'un réseau très fragile en mémoire à long terme (Campbell, 1995). L'inhibition proactive, ou la capacité à résister à l'interférence en mémoire de travail, est donc susceptible d'expliquer des différences de performance en arithmétique (Barrouillet & Lépine, 2005; De Visscher & Noël, 2014). Les individus capables de résister à l'interférence sont en effet en mesure d'encoder un nombre plus important d'associations (Barrouillet & Lépine, 2005). Ces individus s'avèrent également plus performants pour récupérer la solution d'un problème arithmétique (Barrouillet & Lépine, 2005). A l'inverse, les individus avec des déficits sévères en arithmétique élémentaire sont plus affectés par le niveau d'interférence lors de la production ou de la vérification d'un résultat (Barrouillet & al., 1997). Il a également été reporté que ces individus étaient davantage sensibles aux informations non pertinentes dans une tâche de mémoire de travail (Passolunghi & Siegel, 2004). Cette sensibilité accrue à l'interférence pourrait contribuer aux déficits arithmétiques d'une partie des dyscalculiques (De Visscher & al. 2015; De Visscher & Noël 2014, 2013).

Une première étude de cas a mis en évidence des difficultés d'inhibition proactive chez une patiente dyscalculique dont les capacités intellectuelles, phonologiques et visuo-spatiales étaient intactes (De Visscher & Noël, 2013). Ses compétences mathématiques se caractérisaient par des difficultés très marquées en arithmétique, notamment en résolution d'additions et de multiplications simples. En revanche, ses capacités à manipuler les quantités non-symboliques étaient préservées. Ses capacités à résister à l'interférence ont été testées notamment par des tâches d'apprentissage associatif nécessitant de mémoriser des paires d'éléments. Lorsque les éléments d'une paire présentent peu de ressemblance (tels qu'un nom d'objet associé à un nom d'animal), l'interférence est faible. A l'inverse, lorsque les éléments d'une même paire sont similaires (par exemple, un prénom associé à un nom de famille), l'interférence est élevée. La performance de la patiente était similaire à celles d'individus neurotypiques dans la condition de faible interférence. Au contraire, lorsque l'interférence était élevée, la performance de la patiente était très dégradée, aussi bien en rappel immédiat qu'en rappel après délai. Ces résultats indiquent une sensibilité élevée à l'interférence à l'encodage ou à la récupération. En somme, l'ensemble des résultats de cette patiente dyscalculique révèlent un défaut de traitement des informations en mémoire dans un contexte de forte interférence. Bien que les difficultés mentionnées par cette personne soient limitées à l'arithmétique, son déficit ne s'avère pas spécifique au traitement des symboles arithmétiques (De Visscher & Noël, 2013).

L'hypothèse de l'hypersensibilité à l'interférence comme cause des déficits arithmétiques a été confirmée par deux études successives utilisant des paradigmes d'apprentissage associatifs avec différents niveaux d'interférence. Premièrement, les enfants avec déficits en arithmétique élémentaire étaient moins efficaces que leurs pairs pour mémoriser des associations de stimuli visuels familiers dans des conditions de forte interférence entre ces stimuli (De Visscher & Noël, 2014). Les auteurs ont conclu que la sensibilité à l'interférence en mémoire de travail empêcherait les enfants dyscalculiques de se constituer un réseau de faits arithmétiques solide. Cette hypersensibilité à l'interférence pourrait toutefois ne concerner qu'un sous-type de dyscalculiques. Ceci est suggéré par De Visscher et collègues (2015), qui ont testé la résistance à l'interférence chez des adultes dyscalculiques dont les déficits mathématiques étaient soit limités à l'arithmétique, soit généraux. Tandis que les participants avec déficits généraux étaient dans l'ensemble moins performants dans l'apprentissage d'une séquence de syllabes, la mémorisation des participants avec déficits spécifiques en arithmétique dépendait du niveau d'interférence. L'apprentissage s'avérait moins efficace que chez les individus contrôles en cas de forte interférence (De Visscher & al., 2015).

Dans tous les cas, l'hypothèse d'un défaut d'inhibition proactive dans la dyscalculie permet d'expliquer les déficits limités à l'arithmétique, mais ne propose pas d'expliquer l'ensemble des difficultés rencontrées par les dyscalculiques. L'hypothèse de l'hypersensibilité à l'interférence s'appliquerait donc à un sous-type de dyscalculie mais n'exclut pas que d'autres déficits généraux puissent entraîner une dyscalculie (De Visscher & Noël, 2013).

III. CONCLUSION

En conclusion, les théories cognitives cherchant à expliquer la dyscalculie se divisent en deux camps. Pour certaines, la dyscalculie aurait une origine relativement spécifique, liée à un trouble du sens du nombre (Piazza & al., 2010; Wilson & Dehaene, 2007) ou à un déficit d'accès à ce sens du nombre à partir des symboles numériques (Rousselle & Noël, 2007). Pour d'autres, la dyscalculie aurait une origine plus générale, liée par exemple à des troubles visuo-spatiaux (Rourke, 1993; Szucs & al., 2013) ou à des problèmes de mobilisation des ressources attentionnelles (Ashkenazi & Henik, 2010; De Visscher & Noël, 2013). Cette diversité de positions peut d'une certaine façon s'expliquer par l'étendu et la variété des capacités cognitives requises par les activités mathématiques. Ceci se reflète dans l'hétérogénéité des atteintes observées chez les enfants dyscalculiques. C'est pour cette raison que de plus en plus de chercheurs appellent à considérer cette hétérogénéité comme l'une des caractéristiques de la dyscalculie. L'une des hypothèses serait par exemple de considérer qu'il existe des dyscalculies primaires (qui résulteraient de troubles fondamentaux des compétences numériques) et des dyscalculies secondaires (pour lesquelles les difficultés en mathématiques seraient intégralement dues à des troubles non-numériques) (Kaufmann & al., 2013). Dans tous les cas, et même si la recherche a encore beaucoup à faire dans ce domaine, il est clair que le diagnostic et la remédiation de la dyscalculie passe par une individualisation de la prise en charge afin de caractériser au mieux les troubles spécifiques et les comorbidités de chaque enfant.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

AGRILLO, C., DADDA, M., SERENA, G. & BISAZZA, A. (2009). Use of number by fish. *PLoS ONE*, *4*(3), e4786. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004786

ANDERSSON, U. (2010). Skill development in different components of arithmetic and basic cognitive functions: Findings from a 3-year longitudinal study of children with different types of learning difficulties. *Journal of Educational Psychology*, *102*(1), 115‑134. https://doi.org/10.1037/a0016838

ASHCRAFT, M. H. (1992). Cognitive arithmetic: A review of data and theory. *Numerical Cognition*, *44*(1), 75‑106. https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90051-I

ASHCRAFT, M. H. & FIERMAN, B. A. (1982). Mental addition in third, fourth, and sixth graders. *Journal of Experimental Child Psychology, 33*(2), 216‑234. https://doi.org/10.1016/0022-0965(82)90017-0

ASHCRAFT, M. H. & KIRK, E. P. (2001). The relationships among working memory, math anxiety, and performance. *Journal of Experimental Psychology: General*, *130*(2), 224‑237. https://doi.org/10.1037//0096-3445.130.2.224

ASHKENAZI, S. & Henik, A. (2010). A disassociation between physical and mental number bisection in developmental dyscalculia. *Neuropsychologia*, *48*(10), 2861‑2868. https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.05.028

ASHKENAZI, S., MARK-ZIGDON, N. & HENIK, A. (2013). Do subitizing deficits in developmental dyscalculia involve pattern recognition weakness? *Developmental Science*, *16*(1), 35‑46. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2012.01190.x

ASHKENAZI, S., RUBINSTEN, O. & HENIK, A. (2009). Attention, automaticity, and developmental dyscalculia. *Neuropsychology*, *23*(4), 535‑540. https://doi.org/10.1037/a0015347

BACHOT, J., GEVERS, W., FIAS, W. & ROEYERS, H. (2005). Number sense in children with visuospatial disabilities: Orientation of the mental number line. *Psychology Science*, *47*(1), 172‑183.

BARBARESI, 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

BAROODY, A. J. & GINSBURG, H. P. (1986). The relationship between initial meaningful and mechanical knowledge of arithmetic. *Conceptual and procedural knowledge: The case of mathematics.*, 75‑112.

BARROUILLET, P., FAYOL, M. & LATHULIÈRE, E. (1997). Selecting between competitors in multiplication tasks: An explanation of the errors produced by adolescents with learning difficulties. *International Journal of Behavioral Development, 21*(2), 253‑275. https://doi.org/10.1080/016502597384857

BARROUILLET, P. & LÉPINE, R. (2005). Working memory and children's use of retrieval to solve addition problems. *Journal of Experimental Child Psychology*, *91*(3), 183‑204. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2005.03.002

BARTH, H., KANWISHER, N. & SPELKE, E. (2003). The construction of large number representations in adults. *Cognition*, *86*(3), 201‑221. https://doi.org/10.1016/S0010-0277(02)00178-6

BERCH, D. B., FOLEY, E. J., HILL, R. J. & RYAN, P. M. (1999). Extracting parity and magnitude from arabic numerals: developmental changes in number processing and mental representation. *Journal of Experimental Child Psychology*, *74*(4), 286‑308. https://doi.org/10.1006/jecp.1999.2518

BOOTH, J. L. & SIEGLER, R. S. (2006). Developmental and individual differences in pure numerical estimation. *Developmental Psychology*, *42*(1), 189‑201. https://doi.org/10.1037/0012-1649.41.6.189

BRANNON, E. M. & TERRACE, H. S. (2000). Representation of the numerosities 1–9 by rhesus macaques (Macaca mulatta). *Journal of Experimental Psychology: Animal Behavior Processes*, *26*(1), 31‑49. https://doi.org/10.1037/0097-7403.26.1.31

BRANNON, E. M., WUSTHOFF, C. J., GALLISTEL, C. R. & GIBBON, J. (2001). Numerical subtraction in the pigeon: Evidence for a linear subjective number scale. *Psychological Science*, *12*(3), 238‑243. https://doi.org/10.1111/1467-9280.00342

BULL, R. & SCERIF, G. (2001). Executive functioning as a predictor of children’s mathematics ability: Inhibition, switching, and working memory. *Developmental Neuropsychology*, *19*(3), 273‑293. https://doi.org/10.1207/S15326942DN1903_3

BUTTERWORTH, B. (2005). Developmental dyscalculia. In *Handbook of Mathematical Cognition* (Psychology Press, p. 455‑467). Hove, UK: J. I. D. Campbell.

CAMPBELL, J. I. D. (1995). Mechanisms of simple addition and multiplication: A modified network-interference theory and simulation. *Mathematical Cognition*, *1*, 121‑164.

CAMPBELL, J. I. D. & TIMM, J. C. (2000). Adults’ strategy choices for simple addition: Effects of retrieval interference. *Psychonomic Bulletin & Review*, *7*(4), 692‑699. https://doi.org/10.3758/BF03213008

CANTLON, J. F., BRANNON, E. M., CARTER, E. J. & PELPHREY, K. A. (2006). Functional imaging of numerical processing in adults and 4-y-old children. *PLoS Biology*, *4*(5), e125. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040125

CAREY, S. (2004). Bootstrapping & the origin of concepts. *Daedalus*, *133*(1), 59‑68. https://doi.org/10.1162/001152604772746701

CARPENTER, T. P. & MOSER, J. M. (1984). The acquisition of addition and subtraction concepts in grades one through three. *Journal for Research in Mathematics Education*, *15*(3), 179‑202. https://doi.org/10.2307/748348

DE SMEDT, B. & GILMORE, C. K. (2011). Defective number module or impaired access? Numerical magnitude processing in first graders with mathematical difficulties. *Journal of Experimental Child Psychology*, *108*(2), 278‑292. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.09.003

DE SMEDT, B., NOËL, M.-P., GILMORE, C. & ANSARI, D. (2013). How do symbolic and non-symbolic numerical magnitude processing skills relate to individual differences in children’s mathematical skills? A review of evidence from brain and behavior. *Trends in Neuroscience and Education*, *2*(2), 48‑55. https://doi.org/10.1016/j.tine.2013.06.001

DE VISSCHER, A. & NOËL, M.-P. (2013). A case study of arithmetic facts dyscalculia caused by a hypersensitivity-to-interference in memory. *Cortex*, *49*(1), 50‑70. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2012.01.003

DE VISSCHER, A. & NOËL, M.-P. (2014). Arithmetic facts storage deficit: the hypersensitivity-to-interference in memory hypothesis. *Developmental Science*, *17*(3), 434‑442. https://doi.org/10.1111/desc.12135

DE VISSCHER, A., SZMALEC, A., VAN DER LINDEN, L. & NOËL, M.-P. (2015). Serial-order learning impairment and hypersensitivity-to-interference in dyscalculia. *Cognition*, *144*, 38‑48. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2015.07.007

DEHAENE, S., SPELKE, E., PINEL, P., STANESCU, R. & TSIVKIN, S. (1999). Sources of mathematical thinking: Behavioral and brain-imaging evidence. *Science*, *284*(5416), 970. https://doi.org/10.1126/science.284.5416.970

DEHAENE, S. (1997). *The number sense: how the mind creates mathematics*. New York: Oxford University Press.

DEHAENE, S., BOSSINI, S. & GIRAUX, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, *122*(3), 371‑396.

DEHAENE, S. & CHANGEUX, J.-P. (1993). Development of elementary numerical abilities: A neuronal model. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *5*(4), 390‑407. https://doi.org/10.1162/jocn.1993.5.4.390

DESOETE, A., ROEYERS, H. & DE CLERCQ, A. (2004). Children with mathematics learning disabilities in Belgium. *Journal of Learning Disabilities*, *37*(1), 50‑61. https://doi.org/10.1177/00222194040370010601

DEVINE, A., SOLTÉSZ, F., NOBES, A., GOSWAMI, U. & SZUCS, 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 SONNEVILLE, L. (2008). Prevalence of combined reading and arithmetic disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, *41*(5), 460‑473. https://doi.org/10.1177/0022219408321128

DOWKER, A. (2005). Early identification and intervention for students with mathematics difficulties. *Journal of Learning Disabilities*, *38*(4), 324‑332. https://doi.org/10.1177/00222194050380040801

EGER, E., STERZER, P., RUSS, M. O., GIRAUD, A.-L. & KLEINSCHMIDT, A. (2003). A Supramodal Number Representation in Human Intraparietal Cortex. *Neuron*, *37*(4), 719‑726. https://doi.org/10.1016/S0896-6273(03)00036-9

FECHNER, G. (1966). *Elements of Psychophysics*. New York, NY: Holt.

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

FIAS, W. & VAN DIJCK, J.-P. (2016). The temporary nature of number—space interactions. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, *70*(1), 33-40. https://doi.org/10.1037/cep0000071
GEARY, D. C. (2004). Mathematics and Learning Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, *37*(1), 4‑15. https://doi.org/10.1177/00222194040370010201
GEARY, D. C. (2011). Cognitive predictors of achievement growth in mathematics: A 5-year longitudinal study. *Developmental Psychology*, *47*(6), 1539‑1552. https://doi.org/10.1037/a0025510
GEARY, D. C., BROWN, S. C. & SAMARANAYAKE, V. A. (1991). Cognitive addition: A short longitudinal study of strategy choice and speed-of-processing differences in normal and mathematically disabled children. *Developmental Psychology*, *27*(5), 787‑797. https://doi.org/10.1037/0012-1649.27.5.787
GEARY, D. C., HAMSON, C. O. & HOARD, M. K. (2000). Numerical and arithmetical Cognition: A longitudinal study of process and concept deficits in children with learning disability. *Journal of Experimental Child Psychology*, *77*(3), 236‑263. https://doi.org/10.1006/jecp.2000.2561
GROEN, G. J. & PARKMAN, J. M. (1972). A chronometric analysis of simple addition. *Psychological Review*, *79*(4), 329‑343. https://doi.org/10.1037/h0032950
GROSS, H. J., PAHL, M., SI, A., ZHU, H., TAUTZ, J. & ZHANG, S. (2009). Number-based visual generalisation in the honeybee. *PLoS ONE*, *4*(1), e4263. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0004263
GROSS-TSUR, V., MANOR, O. & SHALEV, R. S. (1996). Developmental dyscalculia: Prevalence and demographic features. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *38*(1), 25‑33.
GUNDERSON, E. A., RAMIREZ, G., BEILOCK, S. L. & LEVINE, S. C. (2012). The relation between spatial skill and early number knowledge: The role of the linear number line. *Developmental Psychology*, *48*(5), 1229‑1241. https://doi.org/10.1037/a0027433
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
HALBERDA, J., MAZZOCCO, M. M. & FEIGENSON, L. (2008). Individual differences in non-verbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature*, *455*(7213), 665‑668. https://doi.org/10.1038/nature07246
HANICH, L. B., JORDAN, N. C., KAPLAN, D. & DICK, J. (2001). Performance across different areas of mathematical cognition in children with learning difficulties. *Journal of Educational Psychology*, *93*(3), 615‑626. https://doi.org/10.1037/0022-0663.93.3.615
HOLLOWAY, I. D. & ANSARI, D. (2009). Mapping numerical magnitudes onto symbols: The numerical distance effect and individual differences in children's mathematics achievement. *Journal of Experimental Child Psychology*, *103*(1), 17‑29. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.04.001
IUCULANO, T., TANG, J., HALL, C. W. B. & BUTTERWORTH, B. (2008). Core information processing deficits in developmental dyscalculia and low numeracy. *Developmental Science*, *11*(5), 669‑680. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00716.x
IZARD, V., SANN, C., SPELKE, E. S. & STRERI, A. (2009). Newborn infants perceive abstract numbers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *106*(25), 10382‑10385. https://doi.org/10.1073/pnas.0812142106
IZARD, V., DEHAENE-LAMBERTZ, G. & DEHAENE, S. (2008). Distinct cerebral pathways for object identity and number in human infants. *PLoS Biology*, *6*(2), e11. https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060011
JOLLES, D., ASHKENAZI, S., KOCHALKA, J., EVANS, T., RICHARDSON, J., ROSENBERG-LEE, M. & MENON, V. (2016). Parietal hyper-connectivity, aberrant brain organization, and circuit-based biomarkers in children with mathematical disabilities. *Developmental Science*, *19*(4), 613‑631. https://doi.org/10.1111/desc.12399
JONIDES, J. & NEE, D. E. (2006). Brain mechanisms of proactive interference in working memory. *Neuroscience*, *139*(1), 181‑193. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2005.06.042
JORDAN, N. C., HANICH, L. B. & KAPLAN, D. (2003). A longitudinal study of mathematical competencies in children with specific mathematics difficulties versus children with comorbid mathematics and reading difficulties. *Child Development*, *74*(3), 834‑850. https://doi.org/10.1111/1467-8624.00571
JORDAN, N. C. & MONTANI, T. O. (1997). Cognitive arithmetic and problem polving: A comparison of children with specific and general mathematics difficulties. *Journal of Learning Disabilities*, *30*(6), 624‑634. https://doi.org/10.1177/002221949703000606
KAUFMANN, L., MAZZOCCO, M. M., DOWKER, A., VON ASTER, M., GÖBEL, S. M., GRABNER, R. H., HENIK, A., JORDAN, N. C., KARMILOFF-SMITH, A.D., KUCIAN, K., RUBINSTEN, O., SZUCS, D., SHALEV, R. & NUERK, H.-C. (2013). Dyscalculia from a developmental and differential perspective. *Frontiers in Psychology*, *4*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00516
KOUMOULA, A., TSIRONI, V., STAMOULI, V., BARDANI, I., SIAPATI, S., GRAHAM, A. & VON ASTER, M. (2004). An epidemiological study of number processing and mental calculation in Greek schoolchildren. *Journal of Learning Disabilities*, *37*(5), 377‑388. https://doi.org/10.1177/00222194040370050201
KUCIAN, K., LOENNEKER, T., DIETRICH, T., DOSCH, M. & MARTIN, E. (2006). Impaired neural networks for approximate calculation in dyscalculic children: a functional MRI study. *Behavioral and Brain Functions*, 17.
KUCIAN, K., LOENNEKER, T., MARTIN, E. & VON ASTER, M. (2011). Non-symbolic numerical distance effect in children with and without developmental dyscalculia: A parametric fMRI study. *Developmental Neuropsychology*, *36*(6), 741‑762. https://doi.org/10.1080/87565641.2010.549867
LANDERL, K. (2013). Development of numerical processing in children with typical and dyscalculic arithmetic skills—a longitudinal study. *Frontiers in Psychology*, *4*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00459

LANDERL, K., BEVAN, A. & BUTTERWORTH, B. (2004). Developmental dyscalculia and basic numerical capacities: a study of 8–9-year-old students. *Cognition*, *93*(2), 99‑125. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2003.11.004

LANDERL, K., FUSSENEGGER, B., MOLL, K. & WILLBURGER, E. (2009). Dyslexia and dyscalculia: Two learning disorders with different cognitive profiles. *Journal of Experimental Child Psychology*, *103*(3), 309‑324. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.03.006

LANDERL, K. & KÖLLE, C. (2009). Typical and atypical development of basic numerical skills in elementary school. *Journal of Experimental Child Psychology*, *103*(4), 546‑565. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.12.006

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. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *35*(2), 283‑292. https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.1994.tb01162.x

LIBERTUS, M. E., FEIGENSON, L. & HALBERDA, J. (2011). Preschool acuity of the approximate number system correlates with school math ability: Approximate number system and math abilities. *Developmental Science*, *14*(6), 1292‑1300. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2011.01080.x

LIPTON, J. S. & SPELKE, E. S. (2003). Origins of number sense: Large-number discrimination in human infants. *Psychological Science*, *14*(5), 396‑401. https://doi.org/10.1111/1467-9280.01453

LOURENCO, S. F., BONNY, J. W., FERNANDEZ, E. P. & RAO, S. (2012). Nonsymbolic number and cumulative area representations contribute shared and unique variance to symbolic math competence. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(46), 18737‑18742. https://doi.org/10.1073/pnas.1207212109

LYONS, I. M., PRICE, G. R., VAESSEN, A., BLOMERT, L. & ANSARI, D. (2014). Numerical predictors of arithmetic success in grades 1-6. *Developmental Science*, *17*(5), 714‑726. https://doi.org/10.1111/desc.12152

MAZZOCCO, M. M. M. & DEVLIN, K. T. (2008). Parts and 'holes': gaps in rational number sense among children with vs. without mathematical learning disabilities. *Developmental Science*, *11*(5), 681‑691. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00717.x

MAZZOCCO, M. M. M., FEIGENSON, L. & HALBERDA, J. (2011). Impaired acuity of the approximate number system underlies mathematical learning disability (Dyscalculia): Impaired numerical acuity contributes to MLD. *Child Development*, *82*(4), 1224‑1237. https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2011.01608.x

MAZZOCCO, M. M. M. & MYERS, G. F. (2003). Complexities in identifying and defining mathematics learning disability in the primary school-age years. *Annals of Dyslexia*, *53*(1), 218‑253. https://doi.org/10.1007/s11881-003-0011-7

MAZZOCCO, M. M. M. & RÄSÄNEN, P. (2013). Contributions of longitudinal studies to evolving definitions and knowledge of developmental dyscalculia. *Trends in Neuroscience and Education*, *2*(2), 65‑73. https://doi.org/10.1016/j.tine.2013.05.001

MCCRINK, K. & WYNN, K. (2004). Large-number addition and subtraction by 9-Month-old infants. *Psychological Science*, *15*(11), 776‑781. https://doi.org/10.1111/j.0956-7976.2004.00755.x

MEJIAS, S., MUSSOLIN, C., ROUSSELLE, L., GREGOIRE, J. & NOËL, M.-P. (2012). Numerical and nonnumerical estimation in children with and without mathematical learning disabilities. *Child Neuropsychology*, *18*(6), 550‑575. https://doi.org/10.1080/09297049.2011.625355

MOELLER, K., NEUBURGER, S., KAUFMANN, L., LANDERL, K. & NUERK, H.-C. (2009). Basic number processing deficits in developmental dyscalculia: Evidence from eye tracking. *Cognitive Development*, *24*(4), 371‑386. https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2009.09.007

MUSSOLIN, C., MEJIAS, S. & NOËL, M.-P. (2010). Symbolic and nonsymbolic number comparison in children with and without dyscalculia. *Cognition*, *115*(1), 10‑25. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.10.006

NIEDER, A. & MILLER, E. K. (2004). A parieto-frontal network for visual numerical information in the monkey. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *101*(19), 7457‑7462. https://doi.org/10.1073/pnas.0402239101

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*. https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00165

OSTAD, S. A. (1998). Comorbidity between mathematics and spelling difficulties, *23*, 145‑154.

OSTAD, S. A. (1998). Developmental differences in solving simple arithmetic word problems and simple number-fact problems: A comparison of mathematically normal and mathematically disabled children. *Mathematical Cognition*, *4*(1), 1‑19. https://doi.org/10.1080/135467998387389

PASSOLUNGHI, M. C. & SIEGEL, L. S. (2004). Working memory and access to numerical information in children with disability in mathematics. *Journal of Experimental Child Psychology*, *88*(4), 348‑367. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2004.04.002

PIAZZA, M., FACOETTI, A., TRUSSARDI, A. N., BERTELETTI, I., CONTE, S., LUCANGELI, D. & ZORZI, M. (2010). Developmental trajectory of number acuity reveals a severe impairment in developmental dyscalculia. *Cognition*, *116*(1), 33‑41. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.03.012

PIAZZA, M., IZARD, V., PINEL, P., LE BIHAN, D. & DEHAENE, S. (2004). Tuning curves for approximate numerosity in the human intraparietal sulcus. *Neuron*, *44*(3), 547‑555. https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.10.014

PIAZZA, M., PICA, P., IZARD, V., SPELKE, E. S. & DEHAENE, S. (2013). Education enhances the acuity of the nonverbal approximate number system. *Psychological Science*, *24*(6), 1037‑1043. https://doi.org/10.1177/0956797612464057

PICA, P., LEMER, C., IZARD, V. & DEHAENE, S. (2004). Exact and approximate arithmetic in an Amazonian indigene group. *Science*, *306*(5695), 499‑503. https://doi.org/10.1126/science.1102085

PINEL, P., DEHAENE, S., RIVIÈRE, D. & LEBIHAN, D. (2001). Modulation of parietal activation by semantic distance in a number comparison task. *NeuroImage*, *14*(5), 1013‑1026. https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0913

PRICE, G. R., HOLLOWAY, I., RÄSÄNEN, P., VESTERINEN, M. & ANSARI, D. (2007). Impaired parietal magnitude processing in developmental dyscalculia. *Current Biology*, *17*(24), R1042‑R1043. https://doi.org/10.1016/j.cub.2007.10.013

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. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.08.045

ROURKE, B. P. (1993). Arithmetic disabilities, specific and otherwise: A neuropsychological perspective. *Journal of Learning Disabilities*, *26*(4), 214‑226. https://doi.org/10.1177/002221949302600402

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

RUBINSTEN, O. & HENIK, A. (2005). Automatic activation of internal magnitudes: A study of developmental dyscalculia. *Neuropsychology*, *19*(5), 641‑648. https://doi.org/10.1037/0894-4105.19.5.641

RUBINSTEN, O., HENIK, A., BERGER, A. & SHAHAR-SHALEV, S. (2002). The development of internal representations of magnitude and their association with arabic numerals. *Journal of Experimental Child Psychology*, *81*(1), 74‑92. https://doi.org/10.1006/jecp.2001.2645

RUSSELL, R. L. & GINSBURG, H. P. (1984). Cognitive analysis of children's mathematics difficulties. *Cognition and Instruction*, *1*(2), 217‑244. https://doi.org/10.1207/s1532690xci0102_3

SCHLEIFER, P. & LANDERL, K. (2011). Subitizing and counting in typical and atypical development: Subitizing and counting. *Developmental Science*, *14*(2), 280‑291. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.00976.x

SERON, X., & FAYOL, M. (1994). Number transcoding in children: A functional analysis. *British Journal of Developmental Psychology*, *12*(3), 281‑300. https://doi.org/10.1111/j.2044-835X.1994.tb00635.x

SIEGLER, R. S. (1996). *Emerging minds: The process of change in children's thinking*. New York: Oxford University Press.

SZUCS, D., DEVINE, A., SOLTESZ, F., NOBES, A. & GABRIEL, F. (2013). Developmental dyscalculia is related to visuo-spatial memory and inhibition impairment. *Cortex*, *49*(10), 2674‑2688. https://doi.org/10.1016/j.cortex.2013.06.007

VAN OEFFELEN, M. P. & VOS, P. G. (1982). A probabilistic model for the discrimination of visual number. *Perception & Psychophysics*, *32*(2), 163‑170. https://doi.org/10.3758/BF03204275

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

WILSON, A. J. & DEHAENE, S. (2007). Number sense and developmental dyscalculia. In Coch D., Dawson G., Fischer K. W. (Eds.) (pp. 212-238). *Human behavior, learning, and the developing brain: Atypical development*. New York, NY: Guilford Press.

WYNN, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, *358*(6389), 749‑750. https://doi.org/10.1038/358749a0

XU, F. & SPELKE, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, *74*(1), B1-B11. https://doi.org/10.1016/S0010-0277(99)00066-9

YANG, T., CHEN, C., ZHOU, X., XU, J., DONG, Q. & CHEN, C. (2014). Development of spatial representation of numbers: A study of the SNARC effect in Chinese children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *117*, 1‑11. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.08.011

ZORZI, M., PRIFTIS, K. & UMILTÀ, C. (2002). Brain damage: Neglect disrupts the mental number line. *Nature*, *417*(6885), 138‑139. https://doi.org/10.1038/417138a