

La dyscalculie développementale : déficits cognitifs sous-jacents et bases neurofonctionnelles.

Chapitre à paraître dans « Calcul et dyscalculies : des modèles à la rééducation ». Sous la

direction de M. Habib, M-P. Noel, F. George et V. Brun

M-P Noel

DEFINITION ET PREVALENCE

Dans la section « trouble de l'apprentissage » du manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux (DSM IV, [2]), trois critères diagnostiques sont proposés pour la dyscalculie développementale: (1) les aptitudes arithmétiques, évaluées par des tests standardisés, sont nettement en dessous du niveau escompté compte tenu de l'âge du sujet, de son niveau intellectuel et d'un enseignement approprié à son âge, (2) cette perturbation interfère de manière significative avec la réussite scolaire de l'enfant ou les activités de la vie courante et (3) les difficultés en mathématique ne sont pas la résultante d'un déficit sensoriel. La dyscalculie développementale désigne donc une difficulté d'apprentissage des mathématiques qui ne s'explique pas de manière aisee puisqu'elle ne résulte ni d'un retard intellectuel, ni d'un enseignement inapproprié, ni d'un déficit sensoriel.

Plusieurs études ont cherché à évaluer la prévalence de ce trouble de l'apprentissage. Parmi celles-ci, nous en épingleront trois. La première est menée en Angleterre. Lewis et col. [44] examinent la performance de 1056 enfants âgés de 9-10 ans. Dans cet échantillon, 1,3 % des enfants présentent des difficultés d'apprentissage uniquement en mathématique (définies comme une note standard inférieure à 85 (moyenne moins un écart-type) à un test de mathématique et un QI au test de Raven supérieur à 90) et 2,3% d'autres enfants présentent des difficultés d'apprentissage en mathématique et en lecture. Ainsi, la dyscalculie peut apparaître comme seul trouble d'apprentissage chez un enfant mais est également souvent associée à des difficultés d'apprentissage en lecture.

En Israël, Gross-Tsur, Manor et Shalev [30] testent 3029 enfants de 4^{ème} année. Ils utilisent deux critères diagnostique : (1) un score en mathématique inférieur au score moyen obtenu par des enfants fréquentant des classes scolaires deux années en dessous et (2) un QI au-dessus de 80. Ces deux critères conduisent à détecter une dyscalculie dans 6,5% des cas. Notons qu'il y a autant de filles que de garçons parmi les enfants dyscalculiques (ratio 11 :10) et que pour un

nombre important d'entre eux (25,7%), des symptômes d'hyperactivité ou d'inattention sont rapportés par les parents. Enfin, le QI moyen des enfants dyscalculiques est tout à fait dans la norme, avec cependant une légère (mais significative) supériorité du QI de performance (moyenne de 102,4) par rapport au QI verbal (moyenne de 94,8 quand le sous-test d'arithmétique n'est pas pris en compte).

Enfin, Barbareis, Katusic, Colligan, Weaver et Jacobsen [3] adoptent une stratégie diagnostique basée sur la différence entre d'une part la performance à un test de mathématique et d'autre part, celle à un test d'intelligence. Ils examinent les profils de 5718 enfants âgés de 6 à 19 ans en utilisant trois formules de calcul pour établir un diagnostic. La prévalence ainsi établie est de 5,9 % (quand le critère est une note standard au test de mathématique inférieure à [17,4 plus 0,62 fois le score de QI total], critère utilisé dans le Minnesota) à 13,8% (quand le critère est un QI supérieur à 80 et note standard en math inférieure à 90). Il est également intéressant de noter que l'incidence est faible à 7 ans (1,3 à 2,1% selon les formules utilisées) mais qu'elle augmente progressivement jusqu'à 13 ans (5,3 à 11%).

Ces difficultés sont malheureusement persistantes. En effet, un suivi longitudinal des enfants étudiés par Shalev, Manor and Gross-Tsur [67] montre que 6 ans plus tard, 95 % des enfants qui répondaient aux critères de dyscalculie obtiennent une note à un test de mathématique inférieur au percentile 25, et 40% d'entre eux, une note inférieure au percentile 5.

CARACTÉRISTIQUES

Les difficultés rencontrées par les personnes dyscalculiques sont multiples. Quelques classifications de ces troubles ont été proposées. Ainsi, Temple [73] se base sur l'architecture du calcul et du traitement des nombres proposée par McCloskey, Caramazza et Basili [47] en

neuropsychologie de l'adulte et distingue trois types de dyscalculie. Premièrement, la dyscalculie du traitement numérique renvoie à des difficultés du traitement des numéraux arabes ou verbaux dans la lecture, l'écriture ou la répétition de nombres. Deuxièmement, la dyscalculie des faits arithmétiques correspond à une difficulté dans la maîtrise des faits arithmétiques (soit les tables de multiplications, additions simples, soustractions simples ...). Troisièmement, la dyscalculie procédurale renvoie aux difficultés de planification et de conduite de la séquence ordonnée des opérations nécessaires à la réalisation des calculs complexes. Chacun de ces types de problème a été illustré par une étude de cas. Ainsi, Paul présente une dyscalculie du traitement numérique [71], HM, une dyscalculie des faits arithmétiques et SW, une dyscalculie procédurale [72].

Cette classification des troubles nous paraît toutefois peu convaincante. D'abord, les profils rencontrés en clinique sont moins contrastés que ne le suppose cette classification. Même le cas Paul, 10 ans [71], décrit pour ses difficultés de lecture et d'écriture des nombres, présente également d'autres difficultés puisque l'auteur elle-même indique que "*no arithmetical concepts and operations had been mastered; only simple addition of numbers less than ten was sometimes possible by counting with fingers*" (p. 99). D'autre part, il n'existe pas de recherches contrastant ces différents sous-types de dyscalculies sur le plan des facteurs cognitifs associés ou des causes sous-jacentes. Enfin, le profil de difficulté des enfants change au cours du temps. Par conséquent, ces typologies nous paraissent d'un intérêt très limité.

Notons que ce sont les difficultés dans les calculs simples qui ont été les plus étudiées. Ainsi, dans la résolution d'opérations simples impliquant des nombres à un chiffre (par exemple, $5+4$, 8×3), les enfants dyscalculiques produisent plus d'erreurs, sont plus lents et utilisent des stratégies de résolution moins matures que leurs pairs ([19], [26], [2], [27]). Un suivi longitudinal de ces enfants montre que progressivement, ils mettent en œuvre des stratégies de calcul de plus en plus matures, qu'ils diminuent leur taux d'erreurs et augmentent l'efficacité

de leurs stratégies de comptage mais qu'en revanche, leur taux de récupération de la réponse en mémoire à long terme reste invariablement bas ([27]).

Les autres typologies proposées sont basées sur la présence ou non de troubles associés à la dyscalculie et qui pourraient être directement à l'origine de la dyscalculie ou avoir une origine partagée. Ainsi, Rourke et ses collègues ([61], [62], [63]) suggèrent l'existence de deux profils distincts suivant que la dyscalculie est associée ou non à une dyslexie. Suite à l'administration d'un bilan neuropsychologique auprès d'enfants de ces deux catégories, ils observent que les enfants présentant une dyscalculie isolée obtiennent des performances faibles dans les tâches psychomotrices complexes et perceptivo-tactiles (surtout en ce qui concerne celles impliquant la main gauche) et dans des tâches d'organisation visuo-spatiale. Pour les auteurs, ce profil est le signe d'une déficience de l'hémisphère droit et les problèmes d'apprentissage en mathématique de ces enfants résultent de difficultés dans le raisonnement non-verbal et les traitements visuo-spatiaux. Le groupe dyscalculie-dyslexie, en revanche, réalise correctement ces tâches mais éprouve des difficultés dans les traitements verbaux : mémoire verbale, perception auditive, associations verbales. Ce profil est interprété en termes d'un dysfonctionnement de l'hémisphère gauche. Les difficultés en mathématiques seraient alors la conséquence d'un trouble verbal plus général. Selon Rourke et Conway [63], les enfants du groupe dyscalculie-dyslexie montreraient davantage de signes d'agraphie-alexie des nombres ou encore des difficultés au niveau des faits arithmétiques. Les enfants du groupe dyscalculie, par contre, relèveraient plus du sous-type de la dyscalculie spatiale ou montreraient des lacunes dans la résolution de problèmes, le raisonnement et la formation de concepts (pour une perspective similaire, [69]). Néanmoins, ces résultats n'ont pu être répliqués [68]. Dans les cas de dyscalculie-dyslexie, Share et col. retrouvent bien des difficultés verbales chez les garçons mais chez les filles, des difficultés sont observées à la fois dans des tâches verbales et non verbales. Dans les cas de dyscalculie isolée,

les garçons montrent des difficultés dans des tâches verbales et non verbales et les filles ne se montrent pas différentes des sujets contrôles.

Plus récemment, Robinson, Menchetti et Torgesen [59] ont également distingué les dyscalculies suivant qu'elles sont ou non associées à des dyslexies. Pour eux, les premières seraient dues à une difficulté numérique primaire qui toucherait le sens du nombre, les secondes, en revanche, seraient liées à des difficultés de traitement phonologiques. Pourtant, une comparaison des profils cognitifs d'enfants dyscalculiques, dyslexiques, dyscalculiques et dyslexiques ou contrôle ne confirme pas cette hypothèse [40]. En effet, les problèmes phonologiques sont rencontrés chez les enfants dyslexiques qu'ils présentent ou non des difficultés associées en mathématiques et les problèmes du sens du nombre sont observées dans les deux groupes d'enfants dyscalculiques, qu'ils présentent ou non une difficulté de lecture concomitante. Les déficits observés dans le groupe dyscalculie-dyslexie sont donc additifs.

Rubinsten et Henik [65] font également l'hypothèse que la dyscalculie isolée proviendrait d'un déficit numérique de base qui concernerait le traitement de la magnitude numérique. En revanche, les difficultés d'apprentissage en mathématiques pourraient être secondaires à un problème cognitif général tel qu'une pauvreté de la mémoire de travail, de l'attention ou des traitements visuo-spatiaux. Dans ce cas, ces auteurs ne parlent plus de dyscalculie mais de difficultés d'apprentissage en mathématiques. Ils indiquent néanmoins, que le même profil de performance numérique pourrait être observé pour les enfants dyscalculiques ou présentant des difficultés d'apprentissage en mathématiques.

Ces deux dernières perspectives nous amènent directement à envisager les causes des difficultés d'apprentissage en mathématique en distinguant des facteurs cognitifs généraux qui

conduiraient à une dyscalculie secondaire, ou des facteurs spécifiquement numériques, qui causeraient une dyscalculie primaire. Dans la section qui suit, nous présenterons une synthèse des travaux qui se sont intéressés à ces facteurs.

FACTEURS COGNITIFS GÉNÉRAUX ET DYSCALCULIE SECONDAIRE

En ce qui concerne les facteurs cognitifs généraux, plusieurs propositions ont été émises pour rendre compte essentiellement des difficultés présentées par les enfants dyscalculiques dans la résolution de petits calculs (comme 3×6 ou $5 + 4$). Très souvent, en effet, ces enfants calculent des réponses au lieu de les récupérer en mémoire et lorsqu'ils tentent de les récupérer, ils commettent souvent des erreurs ([23]). En rapport avec ces observations, plusieurs hypothèses ont été proposées. (1) Établir une association en mémoire à long terme entre les termes d'un calcul et la réponse nécessite la co-activation en mémoire de travail de la représentation du problème et de la solution. Ceci serait particulièrement difficile pour les personnes dyscalculiques parce qu'elles auraient des capacités de mémoire à court terme réduites ([23]). (2) Les personnes dyscalculiques auraient des difficultés générales à mémoriser ou à récupérer une information en mémoire à long terme ([24], [23]). (3) Les associations problème-réponse sont souvent apprises par cœur sous forme de routines verbales [15]. Les personnes dyscalculiques auraient une difficulté spécifique à mémoriser ou à récupérer de telles routines verbales, voire, à traiter les aspects phonologiques de la langue. (4) Les personnes dyscalculiques auraient des difficultés d'inhibition et ne pourraient donc gérer l'interférence créée par d'autres faits arithmétiques activés lors de la présentation du problème. Chacune de ces hypothèses sera abordée dans les paragraphes suivants.

(1) La mémoire à court terme

Chez l'adulte, la mémoire à court terme (surtout la composante d'administrateur central) est impliquée dans la résolution de calculs complexes mais aussi dans la récupération en mémoire à long terme de la réponse à des calculs simples (pour une revue, voir [16]). Chez l'enfant, le développement de la chaîne numérique est contraint par les capacités de la mémoire de travail, dans les composants de boucle phonologique et d'administrateur central ([53]). La réussite des opérations arithmétiques est également contrainte par les capacités mnésiques des enfants ([37]; [1]). A l'entrée en école primaire, les compétences en mémoire à court terme (boucle phonologique et administrateur central) permettent de prédire le degré de maturité des stratégies de calcul utilisées, quatre mois plus tard, par l'enfant ([54]). Enfin, une étude longitudinale montre que la mesure des capacités des différents systèmes de la mémoire de travail, en début de 1^{ère} année primaire, prévit la performance ultérieure des enfants en mathématique. Plus précisément, c'est la mesure des capacités de l'administrateur central qui est le meilleur prédicteur de la performance des enfants en mathématique 4 mois plus tard et même un an plus tard [12]. En revanche, les mesures des systèmes de stockage sont de moins bons prédicteurs : les mesures de calepin visuo-spatial contribuent à expliquer les différences en math en première année mais pas en deuxième et celles de la boucle phonologique en 2^{ème} année seulement.

Etant donné ces observations dans des populations tout venant, l'hypothèse d'un déficit des capacités de mémoire à court terme chez des enfants dyscalculiques a tout naturellement été proposée [34]. Une méta-analyse ([70]) réalisée sur cette question montre une différence modérée entre enfants dyscalculiques et enfants contrôles, en défaveur des premiers, au niveau des mesures de la boucle phonologique et du calepin visuo-spatial. En revanche, les problèmes au niveau de l'administrateur central semblent plus marqués (voir par exemple, [55]).

Pour illustrer ces propos, nous décrirons l'étude menée par Geary, Hoard, Byrd-Craven, Nugent et Numtee [25]. Ces auteurs comparent des enfants dyscalculiques (QI entre 80 et 130 et

score standard à un test de math inférieur au percentile 15 en fin de maternelle et en première année), des enfants avec des faiblesses en mathématique (QI entre 80 et 130, score en math en fin de maternelle ou en première année entre percentile 23 et 39) et des enfants sans aucune difficulté en mathématique à une batterie testant les différents composants de la mémoire à court terme : boucle phonologique (4 épreuves), calepin visuo-spatial (2 épreuves) et administrateur central (3 épreuves). Des différences significatives en défaveur des enfants dyscalculiques sont observées pour la boucle phonologique et l'administrateur central et, de manière plus modérée, pour le calepin visuo-spatial, quand on les compare soit aux enfants avec difficulté modérée en math ou sans aucune difficulté. En outre, la différence observée entre enfants dyscalculiques et contrôles dans les tâches numériques (calcul, positionnement de nombres sur une ligne analogique, ...) est globalement expliquée par la différence de leurs capacités mnésiques, surtout, en ce qui concerne l'administrateur central.

Nous avons vu que des capacités mnésiques réduites sont associées à un retard dans le développement de la chaîne numérique ([53]) et à l'utilisation d'algorithmes de résolution de calcul peu matures ([54]). Selon Geary [23], la constitution d'un fait arithmétique ne peut avoir lieu que si les représentations des termes du problème et de la réponse sont activées de manière simultanée en mémoire de travail. Par conséquent, un individu présentant de faibles capacités de mémoire de travail et/ou qui résout les calculs par l'application de stratégies immatures (impliquant un temps de résolution plus long et l'activation interférente de nombres intermédiaires avant l'obtention de la réponse) aura moins de chance de garder active la trace des termes du problème lorsqu'il accède à la solution. Il est donc dans de mauvaises conditions pour créer, en mémoire à long terme, une association entre un problème et la réponse, soit, un fait arithmétique (voir [74]).

Ainsi, la faiblesse de mémoire de travail observée chez les enfants dyscalculiques contribue à l'apparition de leurs problèmes d'apprentissage en mathématique, qu'il s'agisse du développement de la chaîne numérique verbale, du développement de stratégie de calcul par comptage ou de la constitution d'un réseau de faits arithmétiques en mémoire à long terme.

(2) La mémoire à long terme verbale

Deux autres hypothèses concernant des facteurs mnésiques ont été proposées. D'une part, Geary [23] suggère que les personnes dyscalculiques auraient des difficultés générales à mémoriser ou à récupérer une information en mémoire à long terme. D'autre part, Dehaene et Cohen [19] proposent que les associations problème-réponse sont apprises par cœur sous forme de routines verbales et on pourrait dès lors faire l'hypothèse que les personnes dyscalculiques auraient une difficulté spécifique à mémoriser ou à récupérer de telles routines verbales.

Pour tester ces deux hypothèses, Mussolin et Noël [48] ont comparé des enfants dyscalculiques et des enfants contrôles à différentes tâches de récupération d'informations en mémoire à long terme : choisir parmi deux, le mot sémantiquement associé à un mot cible (marteau : vis ou clou ?), le pays correspondant à la capitale (Paris : France ou Suisse ?), le mot terminant une séquence verbale automatique (avoir la chair de : poule ou canard ?) ou le produit de deux nombres (2×3 : 6 ou 8 ?). Si la difficulté des enfants dyscalculiques provient d'une difficulté globale à récupérer les informations en mémoire à long terme, alors, ils devraient présenter un ralentissement par rapport aux enfants contrôles dans toutes ces tâches. Si par contre, leur difficulté concerne les apprentissages de routines verbales, sous-tendant l'apprentissage des multiplications, alors un ralentissement devrait s'observer non seulement lorsqu'il s'agit de choisir le nombre correspondant au produit de deux nombres, mais aussi lorsqu'il s'agit de repérer le mot complétant une séquence verbale. Si, au contraire, la

difficulté des enfants dyscalculiques provient d'une difficulté spécifique à récupérer les faits arithmétiques en mémoire à long terme, alors seule la tâche de sélection du produit de deux nombres, devrait conduire à un ralentissement chez les enfants dyscalculiques. Les résultats obtenus soutiennent cette dernière hypothèse. En effet, les enfants présentant de faibles capacités en calcul sont plus lents dans la tâche de sélection du produit correct des deux nombres, mais pas dans les autres tâches. Ceci montre bien la spécificité des problèmes de ces enfants.

(3) Traitement phonologique

D'autres auteurs ont émis l'hypothèse que la mémorisation des faits arithmétiques appris par cœur sous forme de routines verbales, pourrait être liée aux capacités phonologiques des enfants. Cette hypothèse avait été introduite par Robinson et coll. (2002) dans le cas particulier des dyscalculies associées à des dyslexies.

Hecht, Torjesen, Wagner et Rashotte [33] font l'hypothèse que la performance dans des tâches de conscience phonologique est un bon prédicteur du développement numérique parce que les tâches de conscience phonologique, comme celles d'arithmétique, supposent le maintien en mémoire d'une information phonologique (l'item à traiter ou les termes du calcul) tout en opérant un traitement sur cette information. Pour tester cette hypothèse, les auteurs suivent de manière longitudinale plusieurs centaines d'enfants de la 2^{ème} à la 5^{ème} année. Ils montrent que la performance des enfants dans des tâches de conscience phonologique (élision de phonème, segmentation phonémique, catégorisation de sons, assemblage de phonèmes) prédit de manière importante leur développement arithmétique, lui-même lié aux capacités de résolution de calculs simples. Ces capacités contribuent à expliquer non seulement les différences individuelles en mathématique, mais aussi en lecture. Cela pourrait donc expliquer l'association forte qui existe entre dyscalculie et dyslexie.

Plus récemment, De Smedt, Taylor, Archibald et Ansari [14] ont montré que la capacité de conscience phonologique (mesurée par une tâche d'élision du phonème initial) d'enfants de 4^{ième} et de 5^{ième} année était corrélée avec la vitesse et l'exactitude dans la vérification de petits calculs (par exemples, $6+3$ ou 5×2) dont la réponse est souvent récupérée en mémoire, mais pas de celle de grands calculs (7×8) qui sont plus souvent résolus par calcul. Ce résultat se maintient même si on considère la performance en mémoire des enfants (mesurée par une tâche de répétition de mots).

On peut néanmoins se demander dans quelle mesure les tâches de conscience phonologique ne sont pas confondues avec des mesures de l'administrateur central puisqu'il s'agit d'opérer une manipulation ou un traitement sur une information stockée en mémoire à court terme. A cela, De Smedt et al. [14] répondent que si la performance dans la tâche de conscience phonologique reflétait uniquement l'efficacité de la mémoire de travail, alors la corrélation serait surtout attendue avec les calculs les plus grands qui demandent à être résolus par stratégie de comptage et qui exigent donc plus de ressources, ce qui n'est pas le cas ici.

(4). Inhibition

La dernière hypothèse envisagée est celle d'un problème d'inhibition. L'inhibition est un concept global qui recouvre différentes fonctions. Dans ce qu'il appelle l'inhibition exécutive, Nigg [51] distingue: (1) le contrôle de l'interférence des distracteurs externes ou internes, (2) l'inhibition cognitive qui correspond à la suppression d'informations qui ne sont plus pertinentes en mémoire de travail, (3) l'inhibition comportementale pour supprimer les réponses automatiques dominantes et (4) l'inhibition oculomotrice. Dans le cadre de la dyscalculie, certaines de ces fonctions ont été considérées comme source possible des difficultés.

Ainsi, Passolunghi, Cornoldi et De Liberto [56] font l'hypothèse que les enfants dyscalculiques auraient du mal à inhiber l'information qui n'est plus pertinente. Ils comparent les performances dans des tâches de mémoire à court terme, d'enfants de 4^{ème} et 5^{ème} année primaires qui sont bons ou mauvais en résolution de problèmes. Dans la tâche d'empan de phrases, par exemple, il s'agit de juger si des phrases présentées sont vraies ou fausses et puis de rappeler les derniers mots de chaque phrase. Globalement, les enfants qui sont mauvais en résolution de problèmes ont un empan réduit par rapport aux enfants contrôles et tendent à rappeler des mots qui ne font pas partie des phrases à rappeler (par exemple, des mots de la phrase mais qui n'étaient pas en dernière position). Ce défaut de mise à jour entraînerait un encombrement de la mémoire de travail et pourrait, en partie, expliquer les plus faibles capacités observées à ce niveau chez les enfants dyscalculiques.

La difficulté d'inhibition pourrait également être comprise comme une difficulté à gérer l'interférence dans les réseaux associatifs en mémoire à long terme. Comme le réseau de faits arithmétiques est un réseau à forte association, les personnes dyscalculiques auraient des difficultés à gérer l'interférence créée par d'autres faits arithmétiques activés lors de la présentation du problème (voir [4]). On sait, en effet, que la présentation d'un problème évoque la réponse correcte qui y est associée mais également d'autres réponses qui sont associées à l'un ou l'autre des termes du calcul (par exemple, 6×4 et 18), ou même encore, des réponses associées aux termes du calcul mais dans une autre opération (par exemple, $5 + 3$ et 15, [8]).

Bull et Scerif [5] ont ainsi mesuré les corrélations entre les performances mathématiques d'enfants de 7 ans et leurs capacités d'inhibition (et d'autres fonctions exécutives). Plus spécifiquement, 3 tâches étaient utilisées: deux mesures d'inhibition (Stroop couleur et Stroop numérique) et une mesure de flexibilité (le tri des cartes du Wisconsin). Il apparaît que de faibles performances en mathématique sont corrélées à un degré d'interférence au Stroop numérique

plus important et une difficulté, dans le tri des cartes, à abandonner un critère de classification précédemment récompensé pour passer à un nouveau critère. On ne peut toutefois manquer de remarquer que ces tâches impliquent un traitement numérique : dénombrer les chiffres dans le Stroop numérique et trier les cartes, notamment suivant leur cardinal dans le Wisconsin. Il se pourrait dès lors que ce soit l'habileté dans le processus de dénombrement lui-même qui soit crucial. En faveur de cette hypothèse, les auteurs rapportent que la vitesse à une simple tâche de dénombrement de croix (condition neutre du Stroop numérique) corrèle de manière significative (et négative) avec la performance dans le test de mathématique. En outre, le Stroop couleur, qui n'implique pas de dénombrement, ne montre aucune corrélation significative avec le test de mathématique.

Avec Censabella [40], nous avons montré que les enfants qui présentent une difficulté d'apprentissage limitée aux mathématiques ne montrent aucun déficit d'inhibition, qu'il s'agisse de l'inhibition d'une réponse dominante (mesurée par le Stroop couleur), de l'inhibition de distracteurs externes (mesurée par une tâche de Flankers) ou encore de la suppression d'informations qui ne sont plus pertinentes en mémoire de travail (mesurée par les intrusions observées dans un empan de phrases).

Une conclusion similaire est tirée par van der Sluis, Jong et van der Leij [75] qui n'observent aucune différence significative entre les performances d'enfants dyscalculiques, dyscalculiques-dyslexiques et contrôles dans des tâches d'inhibition : un Stroop chiffre et une tâche dans laquelle il s'agit de dénommer une petite forme géométrique incluse dans une autre plus grande (exemple, un petit carré dans un grand cercle).

L'hypothèse d'un déficit d'inhibition semble donc peu convaincante actuellement.

Enfin, parmi les facteurs cognitifs non numériques, certains auteurs se sont intéressés aux gnosies digitales. En effet, au cours de son développement, l'enfant utilise spontanément ses doigts pour montrer une certaine numérosité, pointer les objets lors d'un dénombrement ou encore tenir le compte de ses pas de comptage dans la résolution de petites opérations arithmétiques [20]. En outre, dans certains cas, une lésion pariétale de l'hémisphère dominant entraîne à la fois une acalculie et une agnosie digitale (une difficulté de reconnaissance des doigts sans la vue) dans le cadre plus global d'un syndrome dit de Gerstmann [28]. Selon Butterworth [6], le lien fonctionnel qu'on observe au cours du développement entre les doigts et les activités numériques, pourrait même expliquer la proximité anatomique des zones cérébrales dédiées à la représentation des doigts et des nombres: *"without the ability to attach number representation to the neural representation of fingers and hands in their normal locations, the numbers themselves will never have a normal representation in the brain (...) it explains why the representation of numbers is in the parietal lobe: it's where fingers and shapes are represented"* (p. 249).

Les doigts pourraient donc constituer un outil précieux, pour l'enfant, pour construire un concept de nombre naturel mais aussi pour développer une représentation en base 10 du nombre. Un défaut dans la représentation différenciée des doigts de la main (agnosie digitale) pourrait donc entraver l'utilisation de cet outil dans le développement numérique.

Chez l'enfant, le lien entre gnosies digitales et capacités numériques a été mis en évidence par Fayol, Barrouillet et Marinthe [17]. Ils ont montré que la performance d'enfants de 5 ans à une batterie neuropsychologique incluant, entre autres, des tâches de reconnaissance des doigts et de discrimination digitale prédisait de manière significative leurs capacités arithmétiques un an plus tard, et même, trois ans plus tard ([46]).

Nous ([52]) avons montré qu'un simple test de gnosie digitale administré à des enfants en début de première année primaire (CP) constituait un bon prédicteur des performances

numériques mesurées un an plus tard mais pas de celles en lecture, ce qui montre son caractère spécifique.

Plus récemment, Gracia-Bafalluy et Noël [29] ont tenté de mettre à l'épreuve l'hypothèse d'un lien de causalité entre gnosies digitales et capacités numériques. À cet effet, nous avons soumis des enfants de première année primaire présentant de faibles gnosies digitales à deux types d'intervention : l'une visant à augmenter les capacités de différenciation des doigts (intervention expérimentale), l'autre visant à travailler la compréhension d'histoires présentées oralement (intervention contrôle). Après les séances d'intervention, seuls les enfants du premier groupe ont montré une amélioration de leurs gnosies digitales ainsi que de leurs performances dans certaines tâches numériques. Ceci indique que les gnosies digitales de l'enfant peuvent être améliorées suite à un programme d'entraînement et que cela pourrait contribuer au développement des compétences numériques, soulignant par là un lien de causalité possible entre ces deux facteurs.

Ainsi, une série de facteurs cognitifs non numériques pourraient participer à l'explication des difficultés d'apprentissage en mathématique. En particulier, de faibles capacités de mémoire de travail, de conscience phonologique et de gnosies digitales pourraient contribuer à expliquer ces difficultés d'apprentissage. En revanche, un problème de récupération de l'information en mémoire à long terme ou d'inhibition, ne semblent pas être de bons candidats pour expliquer les difficultés d'apprentissage en mathématique.

UN TROUBLE NUMÉRIQUE DE BASE

Outre ces propositions en termes de facteurs cognitifs généraux, un nombre croissant d'auteurs font l'hypothèse qu'un déficit purement numérique serait à la base de la dyscalculie.

Par exemple, Butterworth [6, 7] suggère que ce trouble serait la conséquence d'un

dysfonctionnement de base affectant la représentation de la magnitude numérique. Ainsi, les enfants dyscalculiques seraient privés du « *number sense* », c'est-à-dire du sens du nombre ou encore de la représentation de la quantité [42]. Par conséquent, toute activité numérique serait problématique.

Avant de rapporter les études ayant mis à l'épreuve cette hypothèse, prenons le temps de voir ce qu'on entend par *number sense*. Quelles sont les bases sur lesquelles les apprentissages mathématiques s'appuient ? La littérature sur le développement numérique indique que, dès les premiers mois de vie, l'enfant aurait à sa disposition deux systèmes qui lui permettrait de différencier des collections de taille numérique différente [18]. Un premier système permettrait de représenter de manière exacte des petites collections de moins de 4 éléments. Il ne s'agirait pas, à proprement parler, d'une représentation du cardinal de la collection mais plutôt de l'utilisation d'un système de maintien de la trace des objets qui permettrait de construire la représentation de petits ensembles (par exemple, une représentation du type [objet], [objet], [objet] devant trois objets) et de vérifier, par correspondance terme à terme, si une autre collection contient ou non, le même nombre d'éléments. Il est également possible que ce mécanisme soit celui qui permette à l'enfant plus tard ou à l'adulte, de dénommer de manière très rapide et exacte le nombre d'éléments présents dans des très petites collections, ce qu'on appelle, le subitizing [45].

L'autre mécanisme à disposition de l'enfant est un système de *représentation approximative de la grandeur numérique*. Ce système permet à l'enfant de distinguer des collections pourvu qu'elles diffèrent entre elles par un rapport numérique suffisant. A six mois, l'enfant peut ainsi distinguer des collections qui entretiennent un rapport de $\frac{1}{2}$ entre elles (comme 8 versus 16, par exemple) mais pas celles qui entretiennent un rapport de $\frac{2}{3}$ entre elles (comme 8 et 12, par exemple, voir par exemple, [19]). A 9 mois, l'enfant peut distinguer des collections qui diffèrent par un rapport de $\frac{2}{3}$ mais pas celle qui entre dans des

rapports de $\frac{3}{4}$ ([78]). Ce seuil de discrimination est appelé l'acuité numérique. Cette acuité se développe au cours de l'enfance [31].

Pour certains, cette représentation approximative serait la base des apprentissages numériques ultérieurs, y compris, la signification des mots nombres ([21]) et puis des apprentissages mathématiques puisqu'une mesure de l'acuité numérique prise à 14 ans corrèle avec la performance en mathématique tout au long de la scolarité, jusqu'à la maternelle [32]. Pour Carey [9], en revanche, ce système ne permettrait pas à l'enfant de comprendre la valeur des mots nombres puisqu'il est imprécis alors que l'enfant doit comprendre que « sept » veut dire exactement 7, pas 8 ni 6. Carey fait au contraire l'hypothèse que la valeur cardinale des premiers mots nombre serait construite à partir des propriétés morphologiques de la langue (ex. en français, la marque du singulier / pluriel : *un lapin, des lapins, le chat dort ; les chats dorment*) et du système de maintien de la trace des objets. Ensuite, l'enfant découvrirait l'analogie qui existe entre d'une part l'incrémentement de la suite des mots dans la chaîne numérique verbale et l'augmentation de la taille des collections comptées. Il construirait alors une représentation numérique, précise et régie par la fonction de succession $+1$ selon laquelle le cardinal d'un mot dans la liste correspond au cardinal du mot nombre précédent dans la liste, plus une unité exactement. Ce n'est qu'environ 6 mois après avoir découvert l'utilisation du comptage pour comprendre la valeur cardinale des mots nombre que l'enfant mettrait en correspondance cette nouvelle représentation précise du nombre avec sa représentation primitive et approximative de la quantité numérique ([43]). En effet, ce n'est qu'à ce moment-là que dans une tâche d'estimation du cardinal d'une collection (sans les compter), les enfants produisent des estimations qui croissent avec la taille de la collection.

À l'appui d'une hypothèse d'un déficit numérique de base comme origine de la dyscalculie, Landerl et coll. [42] ont montré un ralentissement significatif des enfants

dyscalculiques (avec dyslexie associée ou non), par comparaison à des enfants contrôles, dans une série de tâches numériques de base (lire des nombres, dénombrer des collections, calculer), y compris dans une tâche de jugement de la grandeur de deux nombres qui requiert, précisément, d'activer la grandeur numérique correspondant à un chiffre et de la comparer à celle d'un autre chiffre. Nous avons néanmoins noté que toutes les tâches utilisées par ces auteurs impliquaient la compréhension ou la production d'un nombre dans un format symbolique (numéraux arabes ou verbaux oraux). Par conséquent, une alternative existe au niveau de l'interprétation de ces résultats : soit les enfants dyscalculiques présentent un déficit affectant la représentation de la magnitude; soit leur difficulté concerne l'accès à la représentation de la magnitude à partir des nombres symboliques ou le traitement des nombres symboliques, sans déficit au niveau de la représentation de la magnitude.

Pour tester cette alternative, nous avons, en collaboration avec Laurence Rousselle [64], soumis des enfants dyscalculiques, des enfants dyscalculiques-dyslexiques et des enfants contrôles à deux types de tâches. Dans la première, il s'agissait de comparer la grandeur numérique de deux chiffres arabes. Dans la seconde, il s'agissait de comparer la grandeur numérique de deux collections de bâtons. Les résultats ont montré un profil similaire chez les enfants dyscalculiques présentant ou non une difficulté de lecture associée : dans les deux cas, ces enfants sont plus lents que les sujets contrôles lorsqu'il s'agit de traiter du matériel symbolique (chiffres arabes) mais pas lorsqu'il s'agit de matériel non symbolique (les collections). Ces résultats ne soutiennent donc pas l'hypothèse d'un déficit de la représentation approximative de la grandeur numérique mais sont en faveur d'une difficulté d'accès à cette représentation sémantique du nombre à partir de codes symboliques.

Depuis, une série d'autres données sont venues alimenter le débat. De manière consistante, toutes les études qui ont testé la capacité des enfants dyscalculiques à traiter la magnitude de chiffres arabes ont montré chez eux un profil particulier par rapport aux enfants

contrôles. Ainsi, un ralentissement est observé chez des enfants dyscalculiques (avec ou sans dyslexie) de 6 ans [11], de 8-9 ans [36] et de 10-11 ans [50]. La difficulté du traitement des nombres symboliques et de l'accès à la sémantique correspondante est donc clairement problématique chez ces enfants.

En revanche, pour ce qui concerne le traitement de la magnitude numérique de collections, les résultats sont beaucoup moins cohérents. De Smedt et Gilmore [11] chez des enfants de 6 ans, tout comme Iuculano et al. [36] chez des enfants de 8-9 ans n'observent aucune différence entre enfants dyscalculiques ou contrôles dans des tâches de comparaison ou d'arithmétique approximative, même quand de grandes collections sont utilisées. Une même observation est faite chez des enfants de 8 ans, de 9 ans et de 10 ans [41]. En revanche, lorsque des enfants plus âgés sont testés, des différences en défaveur des enfants dyscalculiques sont observées à 10-11 ans [50, 57] ou à 12 ans [58].

Si la difficulté de base se situait au niveau de la représentation approximative de la grandeur numérique, cette difficulté devrait se voir dès le départ, quel que soit l'âge auquel les enfants sont testés et dans toutes les tâches, qu'elles portent sur du matériel symbolique ou non-symbolique. Or, les jeunes enfants ne montrent pas de difficultés dans le traitement de la magnitude de collections. Par conséquent, cette hypothèse doit être rejetée. On pourrait alors envisager une autre interprétation : le déficit de base concernerait le développement d'une représentation numérique exacte telle qu'apportée par les symboles numériques (nombres arabes et nombres verbaux). Une difficulté à ce niveau est effectivement observée à tout âge et de manière constante à travers les études. Secondairement, ce problème entraînerait des difficultés dans le traitement approximatif de la magnitude des collections. En effet, dans le modèle développemental de Carey [9], les symboles numériques amènent à développer une représentation exacte du nombre qui, ensuite, se connecte à la représentation approximative

de la magnitude numérique. On pourrait dès lors, faire l'hypothèse que cette connexion conduit à un raffinement de la représentation approximative du nombre. Chez les enfants dyscalculiques qui ont du mal à développer une représentation précise du nombre à partir des symboles, ce raffinement pourrait être retardé ou moins efficace. Par conséquent, une difficulté initiale à traiter la magnitude des nombres symboliques entraînerait, par la suite, une moindre précision dans le traitement de la quantité numérique lorsque des collections sont présentées.

On pourrait dès lors remonter encore le problème et se demander pourquoi les enfants dyscalculiques éprouvent cette difficulté à construire une représentation numérique exacte des nombres symboliques. Comme nous l'avons mentionné plus tôt, une des bases de ce processus est le système de maintien de la trace des objets qui est utilisé dans le subitizing. Très récemment, certaines recherches se sont intéressées à cette capacité chez les enfants dyscalculiques. Lorsqu'une personne doit indiquer le nombre d'éléments présents dans une collection, son temps de réponse est relativement plat et court pour les petites collections de 1 à 3-4 éléments. On parle d'un processus qui permet une appréhension directe, parallèle et précise de la numérosité, qu'on appelle le subitizing [45]. Pour les ensembles plus grands, le temps de réponse augmente de manière linéaire avec la taille de la collection, ce qui indique l'utilisation d'un comptage sériel. Schleifer et Landerl [66] ont soumis des enfants contrôles et dyscalculiques (sans dyslexie, ni trouble déficitaire de l'attention) de 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} année à ce type de tâche. Ils observent que la pente des temps de réponse en fonction du cardinal de la collection est quasi deux fois plus importante chez les enfants dyscalculiques que chez les enfants contrôles pour les ensembles de 1 à 3 items, indiquant un subitizing réduit (voir aussi [38]). En revanche, pour les collections plus grandes, la pente est identique dans les deux groupes qui ne se distingueraient donc pas au niveau du comptage. Une

réplication de ces résultats est bien sûr nécessaire mais indique une voie d'exploration intéressante.

UN CERVEAU PARTICULIER POUR CEUX QUI N'ONT PAS LA BOSSE DES MATH ?

Aspects neuro-anatomiques

Chez l'adulte, le traitement numérique entraîne des activations dans des zones cérébrales variées mais de manière robuste au niveau des sillons intrapariétaux (voir le chapitre de Michel Habib dans cet ouvrage).

Le rôle du cortex pariétal semble également important dans la dyscalculie développementale. La première mise en évidence de cette base neuro-anatomique a été réalisée par Isaacs, Edmonds, Lucas et Gadian [35]. Ces auteurs ont comparé deux groupes d'adolescents anciens prématurés suivant qu'ils présentaient ou non des résultats en calcul inférieurs à ce qui était attendu sur base de leur niveau d'intelligence. Une imagerie par résonance magnétique structurale a montré qu'une seule région distinguait les deux populations. En effet, les adolescents du groupe faible en mathématique présentaient une densité de matière grise inférieure à celle des individus du groupe contrôle au niveau du sillon intrapariétal gauche uniquement.

Plus récemment, Rotzer, Kucian, Martin, Von Aster, Klaver et Loenneker [60] ont comparé la structure cérébrale d'enfants dyscalculiques sans comorbidité à celles de sujets contrôles. Ils ont observé une réduction du volume de matière grise chez les enfants dyscalculiques dans le sillon intrapariétal droit mais aussi dans les régions frontales (impliquées notamment dans les tâches de mémoire de travail), et une réduction de matière blanche dans les régions parahippocampiques (impliquées dans la mémoire).

Aspects neurofonctionnels

Au niveau fonctionnel, des différences intéressantes entre enfants présentant ou non des difficultés d'apprentissage en mathématiques apparaissent également. Les trois études que nous rapportons ici ont toutes utilisé l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle.

Kucian, Loenneker, Dietrich, Dosch, Martin, et Von Aster [39] comparent des enfants dyscalculiques et contrôles dans des tâches d'additions exactes, d'additions approximatives et de comparaisons non symboliques. Des différences apparaissent seulement pour la tâche d'additions approximatives où une activation moindre du sillon intrapariétal gauche et du gyrus frontal inférieur et médian droit est observée pour les dyscalculiques par rapport aux contrôles.

Dans des tâches de comparaison, Price et col (2007) montrent que les enfants dyscalculiques présentent une moindre modulation de l'activité du sillon intrapariétal droit en fonction de la distance numérique entre deux collections à comparer, que les enfants contrôles. De la même manière, mais cette fois avec des chiffres arabes, Mussolin, De Volder, Grandin, Schlögel, Nassogne et Noël [49] montrent une moindre modulation de l'activation des sillons intra-pariétaux gauche et droit en fonction de la distance numérique entre les deux chiffres à comparer.

Au vu de ces différences anatomiques et fonctionnelles entre le cerveau d'enfants dyscalculiques ou contrôles, il nous semble important de souligner deux points. Premièrement, ces différences sont relevées entre deux groupes de sujets. Elles n'indiquent pas des différences qualitatives qui permettraient d'envisager un diagnostic de la dyscalculie sur base de particularités cérébrales. Deuxièmement, la présence de ces particularités peut aussi bien être interprétée en terme de cause des difficultés d'apprentissage que de conséquences de ces difficultés, ou les deux. En effet, les enfants dyscalculiques s'exposent peut-être moins souvent que les autres enfants à des exercices de traitement numérique puisqu'ils n'y trouvent pas de plaisir. En conséquence de ce moindre entraînement, on pourrait s'attendre à observer un

développement plus ralenti ou une spécialisation moins efficace des zones dédiées au calcul et au traitement du nombre.

Tout récemment, Wilson et Dehaene [77] ont proposé de distinguer différents sous-types de dyscalculie en fonction d'altérations cérébrales spécifiques. Ainsi, un défaut au niveau du segment horizontal du sillon intrapariétal (bilatéral) donnerait lieu à une dyscalculie liée à un déficit du sens du nombre ou de la représentation non-symbolique des quantités. Un profil assez proche pourrait également concerner les enfants dont la problématique se situe au niveau de la connexion entre les codes symboliques et cette représentation des quantités : ils présenteraient alors des difficultés dans les tâches de magnitudes symboliques mais pas dans celles sur les magnitudes non-symboliques. Un défaut au niveau du gyrus angulaire gauche et des zones impliquées dans le langage (frontal inférieur gauche, aires temporales gauches du langage et ganglions de la base) donnerait lieu à une dyscalculie verbale caractérisée par une difficulté dans l'apprentissage de la séquence du comptage et l'acquisition des faits arithmétiques (surtout multiplications). Un défaut au niveau des zones frontales donnerait lieu à des difficultés exécutives qui seraient visibles dans l'exécution des procédures et le développement de stratégies de calculs. Enfin, un défaut au niveau des zones pariétales postérieures et supérieures entraînerait des difficultés d'attention spatiale et toucherait, notamment, le système de maintien de la trace des objets. On pourrait dès lors observer des difficultés de subitizing et de traitement des collections. Cette proposition de classification anatomo-fonctionnelle des dyscalculies ou des difficultés en mathématique doit néanmoins recevoir un soutien empirique.

CONCLUSION

La dyscalculie est un trouble d'apprentissage aussi fréquent que la dyslexie. Elle peut apparaître de manière isolée ou associée à la dyslexie ou encore à des troubles déficitaires de l'attention avec ou sans hyperactivité. Son incidence augmente progressivement au cours de

la scolarité primaire et ces difficultés sont persistantes. Certaines classifications des troubles ont été proposées mais aucune d'elle ne semble particulièrement convaincante.

Un certain nombre de facteurs cognitifs généraux ont été évoqués comme causes possibles de la dyscalculie. Certains, comme un problème d'inhibition ou de récupération de l'information en mémoire à long terme, ne sont pas soutenus par les données empiriques. D'autres, en revanche, semblent pouvoir être mis en lien avec des difficultés d'apprentissage des mathématiques. En particulier, de faibles compétences digitales, des difficultés en mémoire de travail (composante administrateur central surtout) ou dans les tâches de conscience phonologique, sont des prédicteurs significatifs de difficultés d'apprentissage en mathématique. Ces deux derniers facteurs ne sont toutefois pas des prédicteurs sélectifs puisqu'ils sont également liés à d'autres troubles d'apprentissage comme la dyslexie par exemple.

À côté de ces facteurs cognitifs généraux qui pourraient entraîner des dyscalculie que d'autres appellent « secondaires », un défaut numérique de base est de plus en plus souvent considéré comme source principale et spécifique de la dyscalculie. De manière régulière, on a observé des difficultés à traiter la magnitude des chiffres arabes chez les enfants dyscalculiques. En revanche, les résultats concernant le traitement de la magnitude des collections sont assez inconsistants et ne montrent des différences entre groupes contrôles et dyscalculiques que lorsque les enfants testés sont relativement âgés. Sur cette base, nous proposons l'hypothèse que le déficit premier des enfants dyscalculiques concernerait le développement d'une représentation numérique exacte (peut-être en partie liée à un défaut de subitizing). Cette difficulté se marquerait dans toutes les tâches qui impliquent un traitement de la magnitude numérique à partir de symboles. Ce déficit premier mettrait à mal le raffinement de la représentation approximative de la magnitude qui découle de la connexion entre cette représentation et la représentation numérique exacte. La différence de précision

observée chez les grands enfants dans le traitement de la magnitude des collections serait donc secondaire au trouble symbolique initial. Ce défaut numérique de base présente des corrélats neuro-fonctionnels localisés principalement au niveau des sillons intra-pariétaux.

Les recherches futures devront s'atteler à suivre de manière longitudinale des enfants dyscalculiques pour vérifier l'interprétation proposée ici. Une attention particulière devra également être accordée à l'hétérogénéité des troubles en lien sans doute avec des particularités anatomofonctionnelles spécifiques comme le suggèrent Wilson et Dehaene [77]. Enfin, une meilleure compréhension des troubles et de leur origine devrait également conduire à un affinement des outils diagnostiques et des projets de remédiation de ces troubles.

Bibliographie

1. Adams, J.W., & Hitch, G.J. (1998). Working memory and children's mental addition. *Journal of Experimental Child Psychology*, *67*, 21-38.
2. American Psychiatric Association (1994). *DSM IV: manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux*. Traduction française par J.D. Guelfi. Masson, Paris, 1996.
3. Barbaresi, W.J., Katusic, S.K., Colligan, R.C., Weaver, A.L., & Jacobson, S.J. (2005). Learning Disorders: Incidence in a Population-Based Birth Cohort, 1976-82, Rochester, Minn. *Ambulatory Pediatrics*, *5*(5), 281-289.
4. Barrouillet, P., Fayol, M., & Lathuilière, 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*, 253-275.
5. 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.
6. Butterworth, B. (1999). *The Mathematical Brain*. London: Macmillan.
7. Butterworth, B. (2005). Developmental dyscalculia. In J.I.D. Campbell (Ed.), *Handbook of Mathematical Cognition*. New York: Psychology Press.
8. Campbell, J. I. D., & Timm, J. C. (2000). Adults' strategy choices for simple addition: Effects of retrieval interference. *Psychonomic Bulletin & Review*, *7*, 692-699.
9. Carey, S. (2009). *The origin of concepts*. Oxford University Press.
10. Censabella, S. & Noël, M-P. (2008). The inhibition capacities of children with mathematical disabilities. *Child Neuropsychology*, *14*(1), 1-20.
11. De Smedt, B. & Gilmore, C. (in press). Defective number module or impaired numerical magnitude processing in first graders with mathematical difficulties. *Journal of Experimental Psychology*, doi:10.1016/j.jep.2010.09.003

12. De Smedt, B., Janssen, R., Bouwens, K., Verschaffel, L., Boets, B., & Ghesquière, P. (2009) Working memory and individual differences in mathematics achievement : A longitudinal study from first to second grade. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103, 186-201.
13. De Smedt, B., Verschaffel, L., Ghesquière, P. (2009). The predictive value of numerical magnitude comparison for individual differences in mathematics achievement. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103, 469-479.
14. De Smedt, B., Taylor, J., Archibald, L., Ansari, D. (2009). How is phonological processing related to individual differences in children's arithmetic skills ? *Developmental Science*, 12, 1-15.
15. Dehaene, S. & Cullen, L. (1997). Cerebral pathways for calculation : Double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex*, 33, 219-250.
16. DeStefano, D. & LeFevre, J.A. (2004). The role of working memory in mental arithmetic. *European Journal of Cognitive Psychology*, 16(3), 353-386.
17. Fayol, M., Barrouillet, P., & Marinthe, C. (1998). Predicting arithmetical achievement from neuropsychological performance: a longitudinal study. *Cognition*, 68, B63-B70
18. Feigenson, L., Dehaene, S. & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Science*, 8, 307-314.
19. Fleischner, F.E.; Garnett, K. & Shepard, M. (1982). Proficiency in arithmetic basic fact computation by learning disabled and nondisabled children. *Focus on Learning Problems in Mathematics*, 4(2), 47-55.
20. Fuson, K.C. (1988). *Children's counting concepts of number*. New York, USA: Springer.

21. Gallistel, C.R. & Gelman, R. (1992). Preverbal and verbal counting and computation. *Cognition*, 44, 43-74.
22. Geary, D.C. (1990). A componential analysis of an early learning deficit in mathematics. *Journal of Experimental Child Psychology*, 49, 363-383.
23. Geary, D.C. (2005). Les troubles d'apprentissage en arithmétique : rôle de la mémoire de travail et des connaissances conceptuelles. In M-P. Noël (ed.), *La dyscalculie : trouble du développement numérique de l'enfant*. Solal, Marseille, France, Pp. 169-191.
24. Geary, D.C., & Hoard, M.K. (2001). Numerical and arithmetical deficits in learning-disabled children: Relation to dyscalculia and dyslexia. *Aphasiology*, 15(7), 635-647.
25. Geary, D.C., Hoard, M.K., Byrd-Craven, J., Nugent, L., & Numtee, C. (2007). Cognitive mechanisms underlying deficits in children with mathematical learning disability. *Child Development*, 78(4), 1343-1359.
26. Geary, D.C., Widaman, K.F., Little, T.D., Cormier, P. (1987). Cognitive addition: comparison of learning disabled and academically normal elementary school children. *Cognitive Development*, 2, 249-269
27. 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.
28. Gerstmann, J. (1940). Syndrome of finger agnosia, disorientation for right and left, agraphia and acalculia. *Archives of Neurology and Psychiatry*, 44, 398-408.
29. [Gracia-Bafalluy, M.](#) & [Noël, M-P.](#) (2008). Does finger training increase young children's numerical performance? *Cortex.*, 44, 368-75.
30. Gross-Tsur, V., Manor, O. & Shalev, R.S. (1996). Developmental dyscalculia: Prevalence and demographic features. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 38, 25-33.

31. Halberda, J. & Feigenson, L. (2008) Developmental change in 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.
32. Halberda, J., Mazocco, M.M.M., & Feigenson, L. (2008). Individual differences in non-verbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature, Letters*, 455(2), 665-669, doi:10.1038/nature07246
33. Hecht, S.A., Torgesen, J.K., Wagner, R.K., & Rashotte, C.A. (2001). The relations between phonological processing abilities and emerging individual differences in mathematical computational skills: A longitudinal study from second to fifth grades. *Journal of Experimental Child Psychology*, 79, 192-227.
34. Hitch, G.J. & McAuley, E. (1991). Working memory in children with specific arithmetical learning difficulties. *British Journal of Psychology*, 82, 375-386.
35. Isaacs, E. B., Edmonds, C. J., Lucas, A., & Gadian, D. G. (2001). Calculation difficulties in children of very low birthweight - A neural correlate. *Brain*, 124, 1701-1707.
36. Iuculano, T., Tang, J., Hall, C. W. B., & Butterworth, B. (2008). Core information processing deficits in developmental dyscalculia and low numeracy. *Developmental Science*, 11, 669-680.
37. Klein, J.S. & Bisanz, J. (2000). Preschoolers doing arithmetic: the concepts are willing but the working memory is weak. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 54(2), 105-115.
38. Koontz, K. L., & Berch, D. B. (1996). Identifying simple numerical stimuli: Processing inefficiencies exhibited by arithmetic learning disabled children. *Mathematical Cognition*, 2, 1-23.

39. Kucian, K., Loenneker, T., Dietrich, T., Dosch, M., Martin, E. & Von Aster, M. (2006). Impaired neural networks for approximate calculation in dyscalculic children: a functional MRI study. *Behavioral and Brain Functions*, 5, 2, 31, doi:10.1186/1744-9081-2-31
40. 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, 309-324.
41. Landerl, K., & Kölle, C. (2009). Typical and atypical development of basic numerical skills in elementary school. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103, 546-565.
42. Landerl, K., Bevan, A., & Butterworth, B. (2004). Developmental dyscalculia and basic numerical capacities: A study of 8-9-year-old students. *Cognition*, 93, 99-125.
43. 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, 395-438.
44. 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, 283-292.
45. Mandler, G., & Shebo, B.J. (1982). Subitizing: An analysis of its components processes. *Journal of Experimental Psychology: General*, 111 (1), 1-22.
46. Marinthe, C.; Fayol, M. & Barrouillet, P. (2001). Gnosies digitales et développement des performances arithmétiques. In, A. Van Hout & C. Meljac (eds). *Troubles du calcul et dyscalculies chez l'enfant*. pp. 239-254, Masson, Paris.
47. McCloskey, M.; Caramazza, A.; & Basili, A. (1985). Cognitive mechanisms in number processing and calculation: Evidence from dyscalculia. *Brain and Cognition*, 4, 171-196.

48. Mussolin, C. & Noël, M-P. (2008). Specific retrieval deficit from long-term memory in children with poor arithmetic facts abilities. *The Open Psychology Journal*, 1, 26-34.
49. Mussolin, C., De Volder, A, Grandin, C., Schlögel X., Nassogne M-C., Noël, M-P. (2010b). Neural Correlates of Symbolic Number Comparison in Developmental Dyscalculia. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(5), 860-874.
50. Mussolin, C., Mejias, S. & Noël, M-P. (2010). Symbolic and non symbolic number comparison in children with and without dyscalculia. *Cognition*, 115, 10-25.
51. Nigg, J., (2000). On inhibition / desinhibition in developmental psychopathology: views from cognitive and personality psychology and a working inhibition taxonomy. *Psychological Bulletin*, 126(2), 220-246.
52. Noël, M-P. (2005). Finger gnosis: a predictor of numerical abilities in children? *Child Neuropsychology*, 11, 413-430.
53. Noël, M-P. (2009). Counting on working memory when learning to count and to add : a preschool study. *Developmental Psychology*. 45(6), 1630-1643.
54. 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.
55. Passolunghi, M.C., & Siegel, L.S. (2001). Short-term memory, working memory and inhibitory control in children with difficulties in arithmetic problem solving. *Journal of Experimental Child Psychology*, 80(1), 44-57.
56. Passolunghi, M.C., Cornoldi, C., & De Liberto, S. (1999). Working memory and intrusions of irrelevant information in a group of specific poor problem solvers. *Memory and Cognition*, 27, 779-790.

57. Piazza, M., Facoetti, A., Trussardi, A. N., Berteletti, I., Conte, S., Lucangeli, D., et al. Developmental trajectory of number acuity reveals a severe impairment in developmental dyscalculia. *Cognition*, *In Press*, *Corrected Proof*.
58. Price, G., Holloway, I., Räsänen, P., Vesterinen, M., & Ansari, D. (2007). Impaired parietal magnitude processing in developmental dyscalculia. *Current Biology*, *17*, R1042–1043.
59. Robinson, C.S., Menchetti, B.M., & Torgesen, J.K. (2002). Toward a two-factor theory of one type of mathematics disabilities. *Learning Disabilities Research and Practice*, *17*, 81-89.
60. Reizer, S., Kucian, K., Martin, E., Von Aster, M., Klaver, P. & Loenneker, T. (2008). Optimized vowel-based morphonemy in children with developmental dyscalculia. *Neuroimage*, *39*, 417-422.
61. Rourke, B.P. (1989). *Nonverbal learning disabilities: the syndrome and the model*. New York: Guilford Press
62. Rourke, B.P. (1993). Arithmetic disabilities, specific and otherwise: A neuropsychological perspective. *Journal of Learning Disabilities*, *26*, 214-226.
63. Rourke, B.P., & Conway, J.A. (1997). Disabilities of arithmetic and mathematical reasoning: Perspective from neurology and neuropsychology. *Journal of Learning Disabilities*, *30*, 34-46.
64. Rousselle, L. & Noël, M-P. (2007). Basic numerical skills in children with mathematics learning disabilities: A comparison of symbolic versus non-symbolic number magnitude processing. *Cognition*, *102*, 361-395.
65. Rubinsten, O. & Henik, A. (2009). Developmental dyscalculia : heterogeneity might not mean different mechanisms. *Trends in Cognitive Science*, *13*(2), 92-99.

66. Schleifer, P. & Landerl, K. (2010). Subitizing and counting in typical and atypical development. *Developmental Science*, 1-12.
67. Shalev, R.S., Manor, O. & Gross-Tsur, V. (2005). Developmental dyscalculia: a prospective six-year follow-up. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 47(2), 121-125.
68. Share, D.L., Moffitt, T.E., Silva, P.A. (1988). Factors associated with arithmetic-and-reading disability and specific arithmetic disability. *Journal of*
69. Spiers, P.A. (1987). Acalculia revisited: Current issues. In C. Deloche & X. Seron (Eds.). *Mathematical disabilities. A cognitive Neuropsychological Perspective*. Lawrence Erlbaum Associates, Hillsdale, 281 pp.
70. Swanson, H.L. & Jerman, O ; (2006). Math disabilities : A selective meta-analysis of the literature. *Review of Educational Research*, 76(2), 249-274.
71. Temple, C.M. (1989). Digit dyslexia: A category-specific disorder in developmental dyscalculia. *Cognitive Neuropsychology*, 6(1), 93-116.
72. Temple, C.M. (1991). Procedural dyscalculia and number fact dyscalculia : Double dissociation in developmental dyscalculia. *Cognitive Neuropsychology* , 8(2), 155-176.
73. Temple, C.M. (1992). Developmental dyscalculia. in. S.J. Segalowitz, I. Rapin, F. Boller and J. Grafman (Eds.). *Handbook of Neuropsychology, Vol 7. Child Neuropsychology*, pp. 211-222.
74. Thevenot, C., Barrouillet, P. & Fayol, M. (2001). Algorithmic solution of arithmetic problems and operands-answer associations in long-term memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 54A, 599-611.
75. van der Sluis, S., de Jong, P.F., & van der Leij, A. (2004). Inhibition and shifting in children with learning deficits in arithmetic and reading. *Journal of Experimental Child Psychology*, 67, 239-266.

76. van der Sluis, S., de Jong, P.F., & van der Leij, A. (2004). Inhibition and shifting in children with learning deficits in arithmetic and reading. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87, 239-266.
77. Wilson, A. & Dehaene, S. (in press). Number Sense and Developmental Dyscalculia. To appear in: *Human Behavior, Learning, and the Developing Brain: Atypical Development*. Edited by Coch D, Dawson G, Fischer K: Guilford Press, New York.
78. Xu, F. & Ariaya, R. (2007). Number discrimination in 10-month-old infants. *British Journal of Developmental Psychology*, 25(1), 103-108.
79. Xu, F. & Spelke, E.S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74, B1-B11.