

Comprendre le cerveau des élèves pour mieux les préparer aux apprentissages en arithmétique dès le préscolaire

I. DESHAIES*, J.-M. MIRON**, S. MASSON***

* Doctorante, Université du Québec à Trois-Rivières, Département des sciences de l'éducation, 3351, boul. des Forges, C.P. 500, Trois-Rivières (Québec), Canada, G9A 5H7. Téléphone : 819 376-5011. Fax : 819 376-5127.

Email : isabelle.deshaies2@uqtr.ca

** Professeur, Université du Québec à Trois-Rivières, Département des sciences de l'éducation, 3351, boul. des Forges, C.P. 500, Trois-Rivières (Québec), Canada, G9A 5H7. Email : jean-marie.miron@uqtr.ca

*** Professeur, Laboratoire de recherche en neuroéducation, Département de didactique, Université du Québec à Montréal, Case postale 8888, succursale Centre-ville, Montréal, Québec, Canada, H3C 3P8.

Email : masson.steve@uqam.ca

RÉSUMÉ : *Comprendre le cerveau des élèves pour mieux les préparer aux apprentissages en arithmétique dès le préscolaire*

Certains prérequis s'avèrent essentiels à la réussite des élèves en mathématiques. En s'appuyant sur des études neuroscientifiques et cognitives portant sur les nombres et le calcul, cet article propose trois prérequis susceptibles de préparer le cerveau de l'élève du préscolaire à l'arithmétique : le développement du sens des nombres, l'établissement du lien entre le sens des nombres et le système numérique symbolique, et le développement de l'inhibition.

Mots clés : *Apprentissage de l'arithmétique – Sens du nombre – Nombre non symbolique et symbolique – Recyclage neuronal – Inhibition.*

SUMMARY: *Understanding how the brain of pupils works to better prepare them for learning in mathematics starting at preschool*

Some prerequisites are essential to succeed in mathematics. Based on neuroscience and cognitive studies about numbers and arithmetic, this paper proposes three prerequisites that may prepare the brain of the preschool student to learn arithmetic: the development of number sense, establishing a link between number sense and symbolic number system, and the development of inhibition.

Key words: *Learning arithmetic – Number sense – Non-symbolic and symbolic number – Neuronal recycling – Inhibition.*

RESUMEN: *Comprender el cerebro de los alumnos para prepararles mejor para el aprendizaje de aritmética desde preescolar*

Existen algunos requisitos esenciales para que los alumnos triunfen en matemáticas. Basándose en estudios neurocientíficos y cognitivos realizados sobre los números y el cálculo, este artículo propone tres requisitos que pueden preparar el cerebro del alumno preescolar para la aritmética: el desarrollo del sentido de los números, el establecimiento de una relación entre el sentido de los números y el sistema numérico simbólico, y el desarrollo de la inhibición.

Palabras clave: *Aprendizaje de la aritmética – Sentido del número – Número no simbólico y simbólico – Reciclaje neuronal – Inhibición.*

INTRODUCTION

L'école a pour mission de munir les enfants du bagage nécessaire pour comprendre le monde, s'intégrer à la société et participer à son évolution. Les mathématiques constituent une part essentielle à cette préparation : ils apportent une riche panoplie d'outils (organisation, rigueur, stratégies de résolution de problème, etc.) et de modèles pour décrire, mettre en évidence des phénomènes, expliquer des situations et prévoir leur évolution (Dionne, 2007). Elles permettent aussi d'expliquer et de justifier des solutions à des problèmes de la vie quotidienne. De plus, les mathématiques sont présentes tout au long du cursus scolaire de l'enfant, et ce, dès le préscolaire. Selon Chevillard (1989), l'enseignement général assurerait les « connaissances de base » en mathématiques, sur lesquelles s'élèveraient ensuite les compétences professionnelles. Deblois (2006) soutient également que, tant dans les tâches quotidiennes que dans les activités professionnelles, les connaissances mathématiques sont constamment mobilisées.

Malgré l'importance de cette discipline, tant pour l'individu que pour la société, plusieurs élèves éprouvent des difficultés à s'appropriier et à utiliser les concepts mathématiques. Plus précisément, depuis 1980, les recherches montrent que de 6 à 7 % des élèves d'âge scolaire éprouvent de grandes difficultés en mathématiques (Charron, Duquesne, Marchand & Meljac, 2001 ; De Vriendt & Van Nieuwenhoven, 2010 ; Fuchs & Fuchs, 2005). Des études indiquent également que ce sont les élèves ayant des difficultés avec l'arithmétique élémentaire et les procédures de calcul chez qui les bases des mathématiques manquent le plus (Geary, Hoard & Bailey, 2012 ; Gersten, Jordan & Flojo, 2005). Ce sont également ceux qui sont plus lents dans les tâches élémentaires nécessitant des procédures mathématiques comme la lecture des nombres, la comparaison des nombres, la récitation d'une séquence de nombres et le dénombrement (Landerl, Bevan & Butterworth, 2004), de même que dans les tâches qui requièrent la manipulation de quantité de nombres (Rousselle & Noel, 2007) et la substitution de petites quantités numériques (Koontz & Berch, 1996). De plus, ces difficultés sont parfois en lien avec le contrôle de la mémoire de travail (Andersson & Lyxell, 2007 ; Bull, Johnston & Roy, 1999 ; Bull & Scerif, 2001 ; Inglis, Attridge, Batchelor & Gilmore, 2011 ; McLean & Hitch, 1999 ; Swanson & Jerman, 2006) et de la mémoire visuo-spatiale (Kyttaala, 2008 ; McLean & Hitch, 1999 ; Van der Sluis, Van der Leij & De Jong, 2005). On peut constater que les notions en jeu sont souvent celles qui sont enseignées dès les premières années de scolarisation des élèves et qui concernent même parfois des prérequis mathématiques.

En fait, les études montrent non seulement que les premiers apprentissages en mathématiques jouent un rôle important dans le fait d'éprouver ou non des difficultés en mathématiques, mais aussi que les habiletés précoces en mathématiques sont un important prédicteur de la réussite éducative (Clark, Pritchard & Woodward, 2010 ; García Coll *et al.*, 2007 ; Rourke & Conway, 1997). La recherche de García Coll *et al.* (2007) montre, par exemple, que la réussite

en mathématiques au préscolaire prédit les résultats dans cette discipline tout au long de la scolarité. D'autres études indiquent également que les enfants qui commencent la première année avec une faible connaissance du système de numération sont à risque accru d'une faible réussite en numération fonctionnelle (connaissances et compétences requises pour gérer efficacement les exigences relatives aux notions de calcul dans diverses situations) et ce, même rendus en première année de l'école secondaire (Geary, Hoard, Nugent, Bailey & Krueger, 2013).

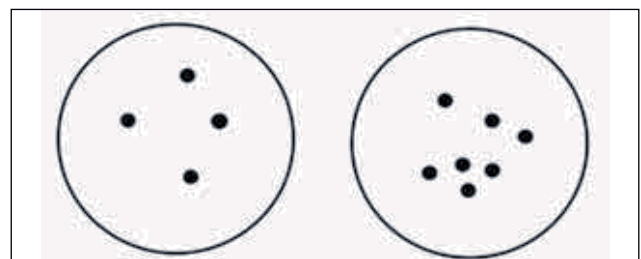
Étant donné l'importance des premières habiletés liées aux nombres, il apparaît pertinent de mieux comprendre comment elles se développent et comment elles servent de points d'appui au développement des compétences en mathématiques et, plus particulièrement, en arithmétique. Les études portant sur le fonctionnement du cerveau sont éclairantes à ce sujet.

En effet, au cours des dernières années, les connaissances sur le fonctionnement du cerveau ont beaucoup progressé. Nous connaissons de mieux en mieux les mécanismes cérébraux liés au traitement des nombres et à l'apprentissage de l'arithmétique. Cet article propose de prendre appui sur ces recherches afin d'identifier et de discuter de trois prérequis sur lesquels l'apprentissage de l'arithmétique s'appuie et dont le développement pourrait aider les élèves à apprendre les mathématiques et l'arithmétique plus efficacement. Ces prérequis sont le développement du sens des nombres, l'établissement de liens entre le sens initial des nombres et la représentation symbolique des nombres qui se développe au cours de l'enfance et, finalement, le développement de l'inhibition nécessaire au contrôle de certaines intuitions pouvant nuire à l'acquisition d'une représentation adéquate des nombres symboliques.

LE DÉVELOPPEMENT DU SENS DU NOMBRE

Selon Dehaene (2011), le sens du nombre est l'un des principaux domaines de compétence partagée par les humains et les animaux. Il s'impose en général immédiatement, automatiquement et sans contrôle conscient (Dehaene, 2011) et permet de faire la distinction entre deux quantités non symboliques et de déterminer laquelle est supérieure ou inférieure à l'autre (voir *figure 1*) (Fuhs & McNeil, 2013). Selon Dehaene (2011), le sens de l'approximation des nombres serait la base de la construction des compétences en mathématiques.

Figure 1. Deux quantités non symboliques pouvant être distinguées par le sens des nombres.



L'idée du sens des nombres est notamment issue d'analyses de l'activité cérébrale. La recherche de Piazza, Izard, Pinel, Le Bihan et Dehaene (2004), par exemple, a permis d'observer l'activité cérébrale de douze participants exposés à des ensembles de points présentés pendant seulement 150 ms. Lors de cette tâche, les participants regardaient passivement les ensembles de points. La plupart du temps, les ensembles présentés contenaient 16 points, mais parfois ils en contenaient un peu moins (8, 10 ou 13) ou un peu plus (20, 24 et 32). Lorsque le nombre de points changeait, l'activité cérébrale des participants changeait également. Ainsi, grâce à l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf), il a été possible d'identifier les régions cérébrales associées au sens des nombres : ce sont les sillons intrapariétaux gauche et droit situés dans la partie supérieure postérieure du cerveau, dans le lobe pariétal. D'autres études similaires ont également permis de détecter l'activation des sillons intrapariétaux lors de tâche nécessitant des habiletés mathématiques issues du sens des nombres (Pinel, Dehaene, Rivière & LeBihan, 2001 ; Pinel, Piazza, Le Bihan & Dehaene, 2004).

Puisque l'activation du sillon intrapariétal semble être une zone cérébrale importante lors de tâches nécessitant des habiletés mathématiques liées au sens des nombres, il est intéressant de savoir si cette zone joue le même rôle dès les premiers mois de vie de l'élève. Une étude menée par Izard, Dehaene et Dehaene-Lambertz (2008) a abordé cette question. Ces chercheurs ont placé des nourrissons de 3 mois devant des images d'objets et ont procédé à des enregistrements de potentiels évoqués à l'aide de l'électroencéphalographie. Lors de l'expérience, la plupart des stimuli (images) représentaient les mêmes objets et le même nombre d'objets, mais au cours de la séance, il arrivait que le nombre ou le type d'objets diffère. Comme indiqué par l'électroencéphalographie, les cerveaux des nourrissons ont réagi soit à l'identification de l'objet, soit au changement du nombre d'objets. Un modèle tridimensionnel de la tête du bébé a permis d'identifier que les zones du cerveau répondant au changement d'objet ou au changement de nombre d'objets étaient différentes. Comme chez les adultes et les enfants, le nombre différent d'objets a activé un réseau pariétofrontal impliquant notamment le sillon intrapariétal. Des expériences comportementales confirment également que, dès l'âge de 4 mois et demi, les nourrissons possèdent un « sens des nombres » précoce et que, par exemple, ils peuvent détecter des changements dans le nombre approximatif d'objets dans un ensemble (Feigenson, Dehaene & Spelke, 2004 ; Xu & Spelke, 2000). En somme, le sens des nombres serait présent dès les premiers mois de vie dans le cerveau des enfants et leur permettrait d'avoir une idée de la grandeur des nombres, ainsi qu'une compréhension du nombre sous sa forme non symbolique. Cependant, à ce moment, le nombre sous sa forme non symbolique ne serait pas associé à une valeur quantitative précise.

L'ÉTABLISSEMENT DE LIENS ENTRE LE SENS DES NOMBRES ET LE SYSTÈME SYMBOLIQUE DES NOMBRES

Comme discuté dans la section précédente, avant l'apprentissage formel des mathématiques et avant d'apprendre les nombres sous leur forme symbolique, les élèves possèdent un sens intuitif des nombres. Ce sens des nombres implique des neurones des sillons intrapariétaux gauche et droit. Puis, au cours de son apprentissage du langage oral, l'élève acquiert progressivement les nombres sous leur forme symbolique. Cette nouvelle acquisition serait possible grâce au mécanisme de recyclage neuronal.

Proposé par Dehaene (2007), ce mécanisme cérébral permet d'expliquer pourquoi il est possible d'apprendre certaines notions issues de la culture et de l'éducation, comme les lettres et les nombres, alors que le cerveau ne possède pas de façon intrinsèque la capacité de lire ou de compter. En effet, comme les systèmes d'écriture et de comptage ont été inventés trop récemment au cours de l'histoire de l'humanité, le cerveau n'a pas pu évoluer pour avoir des régions cérébrales prédéterminées à la lecture et au calcul. Apprendre les nombres symboliques et le calcul implique donc un recyclage, c'est-à-dire une reconversion de certaines régions cérébrales qui ne sont pas, au départ, liées aux nombres symboliques et au calcul, mais qui ont tout de même une certaine parenté par rapport aux habiletés à développer. Ainsi, selon la théorie du recyclage neuronal, l'apprentissage des nombres arabes nécessiterait le recyclage des régions cérébrales associées au sens des nombres, c'est-à-dire un recyclage des réseaux neuronaux des sillons intrapariétaux (Dehaene & Cohen, 2007). Autrement dit, le système symbolique des nombres (un prérequis essentiel au calcul exact) se développerait donc à partir des neurones associés au sens des nombres situés dans les sillons intrapariétaux, probablement par un processus de recyclage neuronal (Piazza, Pinel, Le Bihan & Dehaene, 2007).

Des études appuient d'ailleurs cette idée que le système symbolique des nombres se développerait en prenant appui sur le système non symbolique déjà existant. Par exemple, la recherche de Piazza *et al.* (2007) a permis de mesurer l'activité cérébrale de 14 sujets. Lors de cette étude, les sujets étaient placés devant des tâches utilisant à la fois le nombre sous sa forme non symbolique (nuage de points) et sous sa forme symbolique (nombres arabes). L'analyse des données d'IRMf a permis de démontrer qu'il y avait activation du sillon intrapariétal lors de ces deux types de tâches. Le traitement des nombres arabes impliquerait donc les régions cérébrales liées au sens des nombres. Dans un même ordre d'idée, il est intéressant de citer la recherche de Thioux, Pesenti, Costes, De Volder et Seron (2005) qui a analysé l'activité cérébrale des participants lors d'une tâche portant sur la comparaison et la classification de nombres symboliques et d'animaux. Le but de cette

recherche était de déterminer si le même type de tâche (comparaison et classification) activait les mêmes zones cérébrales lorsqu'il s'agissait de nombres ou d'animaux. Les résultats de cette étude montrent que le sillon intrapariétal serait impliqué dans les tâches nécessitant un traitement numérique symbolique indépendamment du type de tâche accomplie par le sujet (comparaison ou classification) et que cette zone cérébrale ne serait pas mobilisée lors de la tâche sur les noms des animaux et ce, même s'il s'agissait du même type de tâche (comparaison et classification).

En résumé, ces recherches mettent donc en évidence une zone cérébrale qui serait attribuée aux nombres. De plus, puisque le système symbolique était absent de l'organisation corticale du cerveau de l'enfant à sa naissance, il a dû se développer à partir de neurones associés au sens des nombres situés dans le sillon intrapariétal, probablement par un processus de recyclage neuronal. Conséquemment, il apparaît plausible que l'établissement de liens entre les nombres non symboliques (associés au sens des nombres) et les nombres symboliques puissent faciliter le mécanisme de recyclage neuronal et l'acquisition du concept de nombre. Ces liens pourraient être établis de différentes façons, notamment à l'aide d'activités associant systématiquement des nuages de points et des nombres symboliques.

Des recherches appuient l'existence de ce lien entre le sens des nombres et les nombres symboliques. Grâce à Mussolin, Mejias et Noël (2010) et à Piazza *et al.* (2010), on sait que l'acquisition des nombres symboliques peut améliorer le sens de l'approximation des nombres. Dehaene (2011) soutient également que, pendant les années préscolaires, l'établissement d'un dialogue bidirectionnel entre notre sens du nombre et notre système de comptage conduit à un système où chaque symbole numérique est automatiquement attaché à un sens précis. L'établissement de liens entre le sens des nombres et les nombres symboliques serait donc une étape charnière dans l'apprentissage des mathématiques et aussi un prérequis pour un passage réussi vers le 1^{er} cycle du primaire. Les recherches de Mazzocco, Feigenson et Halberda (2011) viennent appuyer cette idée et suggèrent que la compréhension de la grandeur des collections d'objets peut également contribuer à la réussite en mathématiques.

LE DÉVELOPPEMENT DE L'INHIBITION

Apprendre à l'école n'implique pas seulement d'acquérir de nouvelles connaissances comme l'ont démontré Houdé *et al.* (2000), mais aussi d'apprendre à bloquer certaines stratégies inefficaces (Lubin, Lanoë, Pineau & Rossi, 2012). Ainsi, en plus de développer le sens des nombres et l'établissement de liens entre les représentations symboliques et non symboliques du nombre, il semblerait que le développement du contrôle cognitif et de l'inhibition soit également un préalable au développement de la notion de nombre et de l'arithmétique.

En effet, quelquefois, la structure initiale du cerveau peut être un obstacle à l'apprentissage d'une nouvelle notion, puisqu'elle peut biaiser le raisonnement des élèves et peut même amener ceux-ci à produire des réponses inappropriées qui, dans certains cas, peuvent même être difficiles à corriger. Dans un tel cas, l'apprentissage nécessite l'inhibition de l'activation spontanée de certains réseaux neuronaux qui sont inappropriés pour la tâche. L'inhibition se définit comme étant une forme de contrôle cognitif et comportemental qui permet aux sujets de résister aux habitudes, aux automatismes, aux tentations, aux distractions ou aux interférences, et de s'adapter à des situations complexes par la flexibilité (Houdé *et al.*, 2000). Plusieurs recherches ont démontré l'importance du contrôle inhibiteur lors de l'apprentissage des nombres et du raisonnement (Houdé, 2007 ; Houdé *et al.*, 2011 ; Houdé *et al.*, 2000 ; Moutier, Angeard & Houdé, 2002).

Examinons plus en détail l'une de ces études, celle de Houdé *et al.* (2011). L'objectif de cette recherche était de découvrir les réseaux neurologiques qui permettent à des élèves d'effectuer la tâche de conservation du nombre de Piaget (1952) avec succès. Dans cette tâche, on demande aux élèves de dire s'il y a (ou non) autant de jetons dans la ligne de jetons du haut que dans celle du bas. Lorsque l'espace entre les jetons de la ligne du haut et de celle du bas est similaire, la tâche est plutôt facile. Par contre, lorsque l'espace entre les jetons est plus grande sur une ligne que sur l'autre (ex. oooooo vs o o o o o o o), les élèves ont tendance à dire que la ligne la plus longue (celle dont les jetons sont plus espacés) contient plus de jetons. En se basant sur les études de Joliot *et al.* (2009), Leroux *et al.* (2006) et Leroux *et al.* (2009) réalisées avec des adultes, Houdé *et al.* (2011) ont fait l'hypothèse que la compréhension du principe de conservation du nombre chez les enfants pourrait être lié au développement d'un réseau neuronal au niveau des fonctions exécutives du cerveau, c'est-à-dire à l'inhibition (Bull, Espy, Wiebe, Sheffield & Nelson, 2011). Selon cette hypothèse, il y aurait davantage d'activation des régions cérébrales liées à l'inhibition chez les enfants qui réussissent la tâche que chez les élèves qui ne la réussissent pas. Ceci viendrait appuyer l'idée qu'il est important d'inhiber la stratégie « longueur est égale à nombre » pour arriver à une réponse correcte.

Les résultats obtenus confirment que les élèves qui réussissent la tâche activent davantage (que des élèves ne la réussissant pas) des zones cérébrales associées à l'inhibition, dont le cortex ventrolatéral droit. Un autre résultat est particulièrement intéressant dans cette étude : l'activation plus grande des sillons intrapariétaux chez les élèves qui réussissent la tâche. Comme nous l'avons vu, cette région est associée au sens des nombres et au traitement symbolique des nombres. Ainsi, il semblerait que la réussite de la tâche classique de conservation du nombre de Piaget repose à la fois sur le développement de la compréhension des nombres (d'où l'activation dans les sillons intrapariétaux), mais aussi sur le développement de l'inhibition (d'où

l'activation du cortex préfrontal ventrolatéral). Ces résultats corroborent donc les thèses néo-piagétienne voulant que les élèves aient besoin d'améliorer leur capacité à inhiber leurs réponses perceptuelles, intuitives et erronées pour acquérir le principe de conservation du nombre (Bjorklund & Harnishfeger, 1990 ; Dempster & Brainerd, 1995 ; Houdé, 2000).

D'autres études en lien avec le contrôle inhibiteur ont été réalisées. Entres autres, l'étude de Fuhs et McNeil (2013) a démontré que la performance des élèves dans les tâches conçues pour mesurer l'acuité du système d'approximation des nombres représente non seulement la capacité des élèves à discriminer les numérosités, mais aussi leur capacité à reconnaître l'information numérique et à filtrer les informations inutiles. En d'autres mots, le sens de l'approximation des nombres chez les élèves pourrait être révélateur à la fois de la capacité de faire une approximation, mais également, de leur contrôle inhibiteur (Fuhs & McNeil, 2013). Cette même recherche a démontré que, pour certains élèves, il y a un écart d'acquisition entre le système de l'approximation des nombres et l'apprentissage symbolique des mathématiques au préscolaire, et qu'il est possible de remédier à cet écart par le contrôle inhibiteur. La recherche de Wagner et Johnson (2011) a également démontré que le contrôle inhibiteur joue un rôle clef dans la relation entre le sens de l'approximation des nombres et les habiletés mathématiques des élèves. Ainsi, en l'absence d'un enseignement mathématique symbolique important, le contrôle inhibiteur peut stimuler la performance du sens de l'approximation des nombres chez les jeunes élèves.

Puisque l'inhibition semble être essentielle à l'apprentissage de certains savoirs scolaires, il s'avère pertinent de s'intéresser aux études portant sur le développement de cette capacité chez les jeunes enfants. À titre d'exemple, Lubin *et al.* (2012) se sont intéressés aux

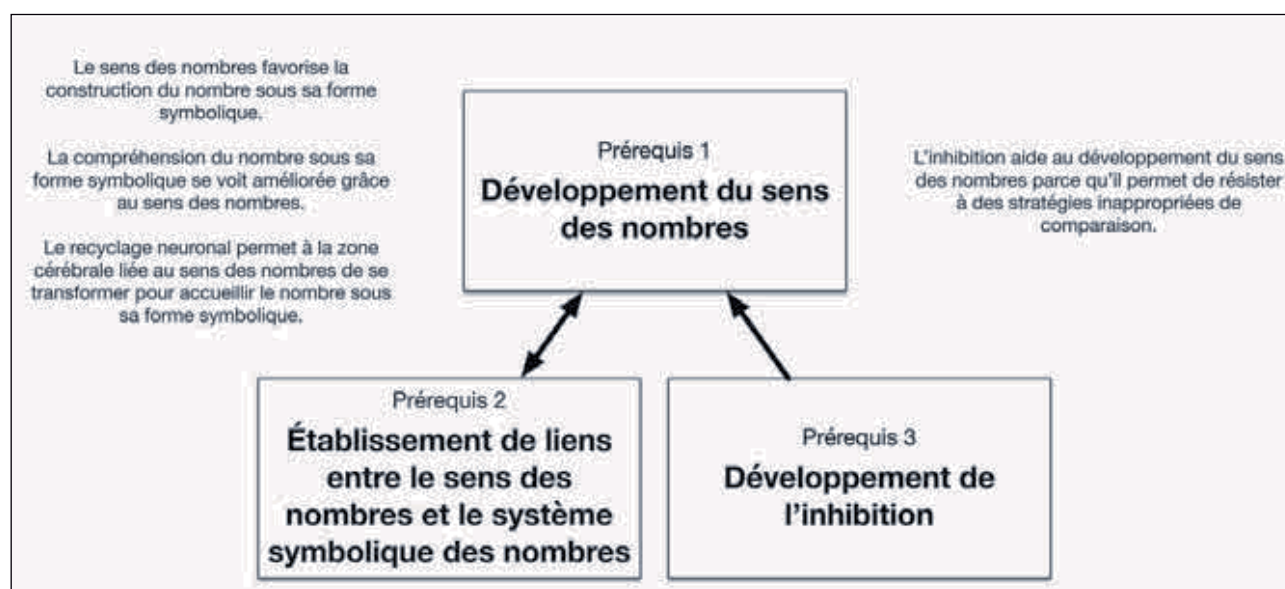
outils visant le développement de l'inhibition pour les mathématiques et l'orthographe chez des élèves de 6 à 11 ans. L'objectif de cette recherche était d'enseigner aux élèves une méthodologie de travail centrée sur le contrôle cognitif des erreurs récurrentes observées chez les élèves en lien avec une notion particulière (mathématique et orthographe). Les résultats de la recherche de Lubin *et al.* (2012) ont permis de faire ressortir l'avantage d'un apprentissage avec inhibition plutôt qu'un apprentissage classique. Un apprentissage par inhibition permettrait de surmonter les erreurs récurrentes en apprenant aux élèves à éviter de tomber dans certains pièges et à résister à certaines stratégies ou réponses (Lubin *et al.*, 2012).

CONCLUSION

L'objectif de cet article était de mieux comprendre le développement du cerveau des élèves afin de mieux les préparer aux apprentissages en arithmétique. Grâce aux études menées sur une meilleure compréhension du cerveau des élèves, cette recension a permis de faire ressortir trois prérequis (voir *figure 2*) qui semblent essentiels pour un apprentissage des mathématiques réussi (le développement du sens des nombres, l'établissement de liens entre le sens des nombres et le système symbolique des nombres et le développement de l'inhibition). Ces prérequis devraient faire partie de l'enseignement au préscolaire et, comme mentionnés plus haut, ceux-ci permettraient probablement un meilleur passage au 1^{er} cycle du primaire.

Dans de futures recherches, il serait pertinent de vérifier si les programmes pédagogiques actuels proposent des interventions au niveau de ces prérequis et, plus spécifiquement, au niveau de l'inhibition. Plus précisément, il serait utile de tracer un portrait des programmes actuels en enseignement des mathématiques au préscolaire afin

Figure 2. Trois prérequis susceptibles de préparer le cerveau de l'élève du préscolaire à l'arithmétique.



de vérifier si ceux-ci travaillent l'ensemble des prérequis discutés, ou seulement quelques-uns. Il serait également pertinent d'étudier les pratiques enseignantes actuelles au préscolaire et d'examiner les liens entre ces pratiques et les prérequis identifiés. Cette recension des écrits, combinée à de futures études, pourrait donc mener à des recommandations pédagogiques sur le type de programme ou de pratiques d'enseignement à privilégier ou à concevoir, dans le cas où aucun ne travaillerait les trois prérequis identifiés de façon simultanée.

RÉFÉRENCES

- ANDERSSON, U. & LYXELL, B. (2007). Working Memory Deficit in Children with Mathematical Difficulties: A General or Specific Deficit? *Journal of Experimental Child Psychology*, 96 (3), 197-228. doi: 10.1016/j.jecp.2006.10.001
- BJORKLUND, D. F. & HARNISHFEGGER, K. K. (1990). The resources construct in cognitive development: Diverse sources of evidence and a theory of inefficient inhibition. *Developmental Review*, 10 (1), 48-71. doi: 10.1016/0273-2297(90)90004-N
- BULL, R., ESPY, K. A., WIEBE, S. A., SHEFFIELD, T. D. & NELSON, J. M. (2011). Using confirmatory factor analysis to understand executive control in preschool children: Sources of variation in emergent mathematic achievement. *Developmental Science*, 14 (4), 679-692. doi: 10.1111/j.1467-7687.2010.01012.x
- BULL, R., JOHNSTON, R. & ROY, J. (1999). Exploring the roles of the visual-spatial sketch pad and central executive in children's arithmetical skills: Views from cognition and developmental neuropsychology. *Developmental Neuropsychology*, 15 (3), 421-442. doi: 10.1080/87565649909540759
- 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. doi: 10.1207/S15326942DN1903_3
- CHARRON, C., DUQUESNE, F., MARCHAND, M. & MELJAC, C. (2001). L'Évaluation des conduites numériques des enfants en grande difficulté. *Troubles du calcul et dyscalculies chez l'enfant*, 336-346.
- CHEVALLARD, Y. (1989). *Pourquoi enseigne-t-on les mathématiques ?* Communication, Actes du colloque « Finalités des enseignements scientifiques » (Marseille, 10-12 janvier 1989).
- CLARK, C. A. C., PRITCHARD, V. E. & WOODWARD, L. J. (2010). Preschool executive functioning abilities predict early mathematics achievement. *Developmental Psychology*, 46 (5), 1176-1191. doi: 10.1037/a0019672
- DE VRIENDT, S. & VAN NIEUWENHOVEN, C. (2010). *L'Enfant en difficulté d'apprentissage en mathématiques : pistes de diagnostic et supports d'intervention*. Groupe de Boeck.
- DEBLOIS, L. (2006). Influence des interprétations des productions des élèves sur les stratégies d'intervention en classe de mathématiques. *Educational Studies in Mathematics*, 62 (3), 307-329.
- DEHAENE, S. (2011). *The number sense how the mind creates mathematics* (Rev. and updated ed. éd.). New York.
- DEHAENE, S. & COHEN, L. (2007). Cultural Recycling of Cortical Maps. *Neuron*, 56 (2), 384-398. doi: 10.1016/j.neuron.2007.10.004
- DEMPSTER, F. N. & BRAINERD, C. J. (1995). *New perspectives on interference and inhibition in cognition-12: Final comments*.
- DIONNE, J. (2007). L'Enseignement des mathématiques face aux défis de l'école au Québec : une cohérence à vivre dans une nécessaire cohésion. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*, 7 (1), 6-27. doi: 10.1080/14926150709556717
- DRAGANSKI, B., GASER, C., BUSCH, V., SCHUIERER, G., BOGDHORN, U. & MAY, A. (2004). Neuroplasticity: changes in grey matter induced by training. *Nature*, 427 (6972), 311.
- FEIGENSON, L., DEHAENE, S. & SPELKE, E. (2004). Core systems of number *TRENDS COGN. SCI.* (Vol. 8, pp. 307-314).
- FUCHS, L. S. & FUCHS, D. (2005). Enhancing mathematical problem solving for students with disabilities. *The Journal of Special Education*, 39 (1), 45-57.
- FUHS, M. W. & MCNEIL, N. M. (2013). ANS acuity and mathematics ability in preschoolers from low-income homes: contributions of inhibitory control. *Developmental Science*, 16 (1), 136. doi: 10.1111/desc.12013
- GARCÍA COLL, C., DUNCAN, G. J., DOWSETT, C. J., CLAESSENS, A., MAGNUSON, K., HUSTON, A. C. & JAPEL, C. (2007). School Readiness and Later Achievement. *Developmental Psychology*, 43 (6), 1428-1446. doi: 10.1037/0012-1649.43.6.1428
- GEARY, D. C., HOARD, M. K. & BAILEY, D. H. (2012). Fact Retrieval Deficits in Low Achieving Children and Children With Mathematical Learning Disability. *Journal of Learning Disabilities*, 45 (4), 291-307. doi: 10.1177/0022219410392046
- GEARY, D. C., HOARD, M. K., NUGENT, L., BAILEY, D. H. & KRUEGER, F. (2013). Adolescents' Functional Numeracy Is Predicted by Their School Entry Number System Knowledge. *PLoS ONE*, 8 (1). doi: 10.1371/journal.pone.0054651
- GERSTEN, R., JORDAN, N. C. & FLOJO, J. R. (2005). Early identification and interventions for students with mathematics difficulties. *Journal of Learning Disabilities*, 38 (4), 293-304.
- HOUDÉ, O. (2000). Inhibition and cognitive development: object, number, categorization, and reasoning. *Cognitive Development*, 15 (1), 63-73. doi: 10.1016/S0885-2014(00)00015-0
- HOUDÉ, O. (2007). First insights on "neuropedagogy of reasoning". *Thinking & Reasoning*, 13 (2), 81-89. doi: 10.1080/13546780500450599
- HOUDÉ, O. (2011). Imagerie cérébrale, cognition et pédagogie. *M/S-Medecine Sciences*, 27 (5), 535.
- HOUDÉ, O., PINEAU, A., LEROUX, G., POIREL, N., PERCHEY, G., LANOE, C. & MAZOYER, B. (2011). Functional Magnetic Resonance Imaging Study of Piaget's Conservation-of-Number Task in Preschool and School-Age Children: A Neo-Piagetian Approach. *Journal of Experimental Child Psychology*, 110 (3), 332-346. doi: 10.1016/j.jecp.2011.04.008
- HOUDÉ, O., ZAGO, L., MELLET, E., MOUTIER, S., PINEAU, A., MAZOYER, B. & TZOURIO-MAZOYER, N. (2000). Shifting from the Perceptual Brain to the Logical Brain: The Neural Impact of Cognitive Inhibition Training. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 12 (5), 721-728. doi: 10.1162/089892900562525
- INGLIS, M., ATTRIDGE, N., BATCHELOR, S. & GILMORE, C. (2011). Non-verbal number acuity correlates with symbolic mathematics achievement: But only in children. *Psychonomic Bulletin and Review*, 18 (6), 1222-1229. doi: 10.3758/s13423-011-0154-1
- IZARD, V., DEHAENE, S. & DEHAENE-LAMBERTZ, G. (2008). Distinct Cerebral Pathways for Object Identity and Number in Human Infants. *PLoS Biol* 6 (2): e11. doi:10.1371/journal.pbio.0060011
- JOLIOT, M., LEROUX, G., DUBAL, S., TZOURIO-MAZOYER, N., HOUDÉ, O., MAZOYER, B. & PETIT, L. (2009). Cognitive inhibition of number/length interference in a Piaget-like task: Evidence by combining ERP and MEG. *Clinical Neurophysiology*, 120 (8), 1501-1513. doi: 10.1016/j.clinph.2009.06.003
- KOONTZ, K. L. & BERCH, D. B. (1996). Identifying Simple Numerical Stimuli: Processing Inefficiencies Exhibited by Arithmetic Learning Disabled Children. *Mathematical Cognition*, 2 (1), 1-23.
- KWOK, V., NIU, Z., KAY, P., ZHOU, K., MO, L., JIN, Z. & TAN, L. H. (2011). Learning new color names produces rapid increase in gray matter in the intact adult human cortex. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 108 (16), 6686-6688. doi: 10.1073/pnas.1103217108
- KYTTALA, M. (2008). Visuospatial Working Memory in Adolescents with Poor Performance in Mathematics: Variation Depending

- on Reading Skills. *Educational Psychology*, 28 (3), 273-289. doi: 10.1080/01443410701532305
- 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. doi: 10.1016/j.cognition.2003.11.004
- LEROUX, G., JOLIOT, M., DUBAL, S., MAZOYER, B., TZOURIO-MAZOYER, N. & HOUDÉ, O. (2006). Cognitive inhibition of number/length interference in a Piaget-like task in young adults: Evidence from ERPs and fMRI. *Human Brain Mapping*, 27 (6), 498-509. doi: 10.1002/hbm.20194
- LEROUX, G., SPIESS, J., ZAGO, L., ROSSI, S., LUBIN, A., TURBELIN, M.-R. & JOLIOT, M. (2009). Adult Brains Don't Fully Overcome Biases that Lead to Incorrect Performance during Cognitive Development: An fMRI Study in Young Adults Completing a Piaget-Like Task. *Developmental Science*, 12 (2), 326-338. doi: 10.1111/j.1467-7687.2008.00785.x
- LUBIN, A., LANOË, C., PINEAU, A. & ROSSI, S. (2012). Apprendre à inhiber : une pédagogie innovante au service des apprentissages scolaires fondamentaux (mathématiques et orthographe) chez des élèves de 6 à 11 ans. *Neuroéducation*, 1 (1), 55-84.
- MAZZOCCO, M. M. M., FEIGENSON, L. & HALBERDA, J. (2011). Preschoolers' precision of the Approximate Number System predicts later school mathematics performance. *PLoS ONE*, 6 (9), ArtID e23749. doi: 10.1371/journal.pone.0023749
- MCLEAN, J. F. & HITCH, G. J. (1999). Working Memory Impairments in Children with Specific Arithmetic Learning Difficulties. *Journal of Experimental Child Psychology*, 74 (3), 240-260. doi: 10.1006/jecp.1999.2516
- MOUTIER, S., ANGEARD, N. & HOUDÉ, O. (2002). Deductive reasoning and matching-bias inhibition training: Evidence from a debiasing paradigm. *Thinking & Reasoning*, 8 (3), 205-224. doi: 10.1080/13546780244000033
- MUSSOLIN, C., MEJIAS, S. & NOËL, M.-P. (2010). Symbolic and nonsymbolic number comparison in children with and without dyscalculia. *Cognition*, 115 (1), 10-25. doi: 10.1016/j.cognition.2009.10.006
- PIAGET, J. (1952). *Jean Piaget*, Clark University Press.
- 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. doi: 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. doi: 10.1016/j.neuron.2004.10.014
- PIAZZA, M., PINEL, P., LE BIHAN, D. & DEHAENE, S. (2007). A Magnitude Code Common to Numerosities and Number Symbols in Human Intraparietal Cortex. *Neuron*, 53 (2), 293-305. doi: 10.1016/j.neuron.2006.11.022
- 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. doi: 10.1006/nimg.2001.0913
- PINEL, P., PIAZZA, M., LE BIHAN, D. & DEHAENE, S. (2004). Distributed and Overlapping Cerebral Representations of Number, Size, and Luminance during Comparative Judgments. *Neuron*, 41 (6), 983-993. doi: 10.1016/S0896-6273(04)00107-2
- PRAET, M. & DESOËTE, A. (2014). Enhancing young children's arithmetic skills through non-intensive, computerised kindergarten interventions: A randomised controlled study. *Teaching and Teacher Education*, 39 (0), 56-65. doi: 10.1016/j.tate.2013.12.003
- ROURKE, B. P. & CONWAY, J. A. (1997). Disabilities of arithmetic and mathematical reasoning: perspectives from neurology and neuropsychology. *Journal of Learning Disabilities*, 30 (1), 34.
- ROUSSELLE, L. & NOEL, 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. doi: 10.1016/j.cognition.2006.01.005
- SWANSON, H. L. & JERMAN, O. (2006). Math Disabilities: A Selective Meta-Analysis of the Literature. *Review of Educational Research*, 76 (2), 249-274.
- THIOUX, M., PESENTI, M., COSTES, N., DE VOLDER, A. & SERON, X. (2005). Task-independent semantic activation for numbers and animals. *Cognitive Brain Research*, 24 (2), 284-290. doi: 10.1016/j.cogbrainres.2005.02.009
- VAN DER SLUIS, S., VAN DER LEIJ, A. & DE JONG, P. F. (2005). Working memory in Dutch children with reading- and arithmetic-related LD. *Journal of Learning Disabilities*, 38 (3), 207.
- WAGNER, J. B. & JOHNSON, S. C. (2011). An association between understanding cardinality and analog magnitude representations in preschoolers. *Cognition*, 119 (1), 10-22. doi: 10.1016/j.cognition.2010.11.014
- XU, F. & SPELKE, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74 (1), B1-B11. doi: 10.1016/S0010-0277(99)00066-9