

REVUE DE LA LITTÉRATURE

Mieux préparer les élèves du préscolaire à l'apprentissage de l'arithmétique : une recension des études proposant des programmes d'intervention s'appuyant sur les neurosciencesIsabelle Deshaies^{1*}, Jean-Marie Miron¹, Colette Picard² et Steve Masson³

RÉSUMÉ

La littérature scientifique en didactique de l'arithmétique suggère qu'au moins trois prérequis sont essentiels à l'apprentissage de l'arithmétique au préscolaire : le développement du sens des nombres, l'établissement de liens entre ce sens des nombres et les nombres symboliques, ainsi que le développement de l'inhibition. Dans cet article, les études portant sur des programmes d'intervention ayant pour objectif de développer un ou plusieurs de ces prérequis chez les élèves du préscolaire sont présentées et discutées. Parmi plus de 22 programmes d'intervention en arithmétique recensés, seulement 5 s'appuient explicitement sur la recherche en neurosciences en ciblant au moins un des prérequis identifiés et aucun des programmes identifiés ne vise le développement de l'inhibition. L'analyse de ces programmes suggère qu'il pourrait être bénéfique d'élaborer et de tester une intervention intégrant des activités visant les trois prérequis mentionnés.

¹ Département des sciences de l'éducation, Université du Québec à Trois-Rivières, Trois-Rivières, QC, Canada

² Unité d'enseignement et de recherche en sciences de l'éducation, Université du Québec en Abitibi-Témiscamingue, Val-d'Or, QC Canada

³ Département de didactique, Université du Québec à Montréal, Montréal, QC, Canada

* Correspondance avec l'auteure : isabelle.deshaies2@uqtr.ca

Pour citer cet article : Deshaies, I., Miron, J.-M., Picard, C. et Masson, S. (2020). Mieux préparer les élèves du préscolaire à l'apprentissage de l'arithmétique : une recension des études proposant des programmes d'intervention s'appuyant sur les neurosciences. *Neuroéducation*, 6(1), 37-48.

DOI: <https://doi.org/10.24046/neuroed.20200601.64>

1. Introduction

Le préscolaire est une étape importante dans la vie de l'élève. Par des activités ludiques, ce programme a notamment le mandat de « jeter les bases de la scolarisation » (MELS, 2003, p. 52), nécessaires aux futurs apprentissages (Jordan, Kaplan, Locuniak et Ramineni, 2007). Parmi ces premières bases inculquées au préscolaire, notons que celles liées aux mathématiques seraient un facteur de l'éventuelle réussite scolaire des élèves (Duncan et al., 2007). Aunola, Leskinen, Lerkkanen et Nurmi (2004) ont notamment démontré que, de l'entrée au préscolaire à la deuxième année du primaire, la croissance des compétences en mathématiques est plus rapide chez les élèves qui ont débuté leur parcours scolaire avec un niveau plus élevé de compétences en mathématiques.

Tout comme les recherches en didactique des mathématiques, celles en neurosciences mentionnent que le développement du sens des nombres (Dehaene, 2011) et l'établissement de liens entre le sens du nombre et le nombre symbolique (Dehaene et Cohen, 2007; Piazza, Pinel, Le Bihan et Dehaene, 2007) seraient particulièrement importants à l'apprentissage des mathématiques. Toutefois, les recherches en neurosciences soulignent l'importance d'une troisième habileté dans cet apprentissage, soit le développement du contrôle cognitif, qui représente notre capacité à avoir un comportement adapté aux circonstances, et plus précisément dans ce cas-ci à l'inhibition (Houdé et al., 2011). Cette capacité serait nécessaire pour contrer les stratégies inefficaces des élèves, par exemple celle admettant que la longueur d'une distribution d'objets corresponde à sa quantité. Cela laisse penser qu'au moins trois prérequis puissent favoriser l'apprentissage des mathématiques et, plus spécifiquement, de l'arithmétique (Deshaies, Miron et Masson, 2015). Il s'agit du développement du sens des nombres, de l'établissement de liens entre le sens des nombres et les nombres symboliques, et du développement de l'inhibition.

1.1 Le développement du sens des nombres

Selon Dehaene (2011), le sens des nombres serait la base de la construction des compétences mathématiques, s'imposant immédiatement, automatiquement et sans contrôle conscient; il permet de faire la distinction entre deux quantités non symboliques et de déterminer laquelle est supérieure ou inférieure à l'autre (Fuhs et McNeil, 2013). La recherche de Dehaene, Piazza, Pinel et Cohen (2003) a permis de déterminer que, lors d'activités en relation avec le sens des nombres, les neurones des sillons intrapariétaux droit et gauche sont activés.

Afin de démontrer l'existence de ce sens des nombres dès les premiers mois de vie du nourrisson, Izard, Dehaene-Lambertz et Dehaene (2008) ont placé des nourrissons de trois mois devant des images d'objets et ont procédé à des enregistrements de potentiels évoqués au moyen d'un électroencéphalogramme. Tout comme chez les adultes et les enfants, un nombre différent d'objets a activé le réseau pariétofrontal impliquant notamment les sillons intrapariétaux. Des expériences comportementales confirment également que, dès l'âge de quatre 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 et Spelke, 2004; Xu et Spelke, 2000).

En somme, le cerveau des enfants est sensible aux variations de quantités, et ce, dès les premiers mois de vie. Il s'agit en fait d'une caractéristique nécessaire au développement du sens des nombres qui leur permet de se représenter la grandeur des nombres sous leur forme non symbolique. Cependant, à ce moment, le nombre sous sa forme non symbolique ne serait pas associé à une valeur quantitative précise.

Étant donné le caractère inné ou très précoce du sens des nombres, tout porte à croire que cette capacité constitue une base sur laquelle s'appuient les habiletés numériques. Le développement du sens des nombres peut donc être considéré comme un prérequis à l'apprentissage de l'arithmétique (Dehaene, 2011).

1.2 Le développement de liens entre le sens des nombres et les nombres symboliques

Lorsqu'il atteint 3-4 ans, au cours de l'acquisition du langage oral, l'enfant apprend progressivement la relation entre des quantités et des nombres arabes; ce qui lui permet d'acquérir progressivement les nombres sous leur forme symbolique. Autrement dit, il apprend à établir des liens entre la capacité à discriminer des quantités et leur représentation symbolique.

Sur le plan neuroscientifique, cette nouvelle acquisition peut s'expliquer grâce au concept de recyclage neuronal, soit la capacité du cerveau à modifier la structure de certaines régions cérébrales afin de changer leurs fonctions initiales (Dehaene et Cohen, 2007). En effet, comme l'interprétation des nombres symboliques s'effectue, comme le sens des nombres, grâce aux sillons intrapariétaux, cela porte à croire que cette zone cérébrale associée au sens des nombres (sillons intrapariétaux droit et gauche) se « recyclerait » pour traiter les nombres sous leur forme symbolique (Piazza et al., 2007). D'ailleurs, plusieurs études montrent que les sillons intrapariétaux s'activent non seulement lors de la comparaison de deux nombres non symboliques, mais également lors de la comparaison de deux nombres symboliques (p. ex. Thioux et al., 2005). En somme, nous sommes aptes à accueillir le nombre sous sa forme symbolique puisque, de prime abord, nous détenons le sens des nombres. Il semble donc important que, pour favoriser le recyclage des sillons intrapariétaux, les élèves établissent des liens entre le sens des nombres et la représentation non symbolique des nombres.

1.3 Le développement de l'inhibition

Tel qu'évoqué précédemment, plusieurs chercheurs ont fait ressortir l'importance de deux prérequis à l'apprentissage des mathématiques : le développement du sens des nombres ainsi que l'établissement de liens entre le nombre sous sa forme non symbolique et sous sa forme symbolique (De Smedt, Noël, Gilmore et Ansari, 2013; Dehaene, 2011; Dehaene et al., 2003;

Deshaies et al., 2015; Nosworthy et al., 2013; Piazza et al., 2014; Vogel, Goffin et Ansari, 2015). En plus de ces deux prérequis, des études suggèrent qu'il faille parfois développer l'inhibition, c'est à dire la capacité à résister à certains automatismes de la pensée pour apprendre (Houdé, 2014). Plus précisément, cette capacité se définit comme étant une forme de contrôle cognitif et comportemental permettant aux sujets de résister aux habitudes, aux automatismes, aux tentations, aux distractions ou aux inférences, et de s'adapter aux situations complexes en faisant preuve de flexibilité (Houdé, 2000). Plusieurs études ont déjà fait ressortir l'importance de l'inhibition dans certains apprentissages scolaires (Lubin, Lanoë, Pineau et Rossi, 2012; Moutier, Angeard et Houdé, 2002; Moutier et Houdé, 2003; Rossi et al., 2015).

Au préscolaire, les élèves auraient besoin de la capacité d'inhibition du cerveau dans certaines tâches numériques afin de bloquer leurs réponses perceptuelles intuitives erronées pour acquérir, par exemple, le principe de conservation du nombre (Piaget, 1952, Houdé et al., 2011). L'inhibition permettrait notamment aux élèves d'âge préscolaire de ne pas se laisser bernier par un « piège » visuospatial tel que la longueur de la distribution d'un ensemble d'objets par rapport à son nombre réel. Selon cet exemple, les élèves du préscolaire pourraient avoir tendance à penser que plus les objets occupent d'espace, plus leur nombre est élevé. Il s'avère donc possiblement bénéfique d'offrir à ces élèves une intervention en mathématiques qui tiendrait compte de ce besoin d'inhibition.

Une étude d'Houdé et al. (2011) illustre bien l'importance de l'inhibition dans l'apprentissage des nombres. Elle montre que l'acquisition de la conservation du nombre provoque chez les élèves non seulement une augmentation de l'activité cérébrale dans les sillons intrapariétaux, mais également une augmentation de l'activité du cortex préfrontal ventrolatéral, une région reconnue pour son rôle clé dans le contrôle inhibiteur (Lubin et al., 2013; Houdé et al., 2011). En fait, dans ce cas-ci, il semblerait que, en plus de développer les aptitudes numériques impliquant les sillons intrapariétaux, il soit nécessaire de développer chez les élèves la capacité à inhiber ou à contrer leur intuition visuospatiale spontanée (mais inefficace dans le contexte d'une tâche liée à la conservation du nombre) voulant que la longueur de la distribution d'un ensemble d'objets soit représentative de sa quantité.

En résumé, en plus de développer chez les élèves le sens des nombres et les liens entre les nombres sous leurs formes non symbolique et symbolique, il s'avère probablement bénéfique d'enseigner des stratégies d'inhibition aux élèves afin de mieux les préparer à l'apprentissage de l'arithmétique, et ce, dès le préscolaire (Deshaies et al., 2015; Houdé et al., 2011; Lubin et al., 2012).

Dans le but d'identifier les pistes d'intervention pouvant contribuer, chez les élèves du préscolaire, au développement de ces trois prérequis¹, cet article présente une recension des écrits neuroscientifiques portant sur les programmes

d'intervention au préscolaire visant explicitement à travailler l'un ou plusieurs de ces prérequis.

2. Méthodologie

Étant donné que le concept d'inhibition évoqué précédemment découle essentiellement d'études menées dans une perspective neuroscientifique, cette recension a été limitée aux interventions conçues en fonction d'hypothèses neuroscientifiques afin de maximiser les chances de trouver des interventions incluant la prise en compte de l'importance du développement de l'inhibition.

En tout, trois principaux critères ont guidé la recherche bibliographique : (a) les étapes du programme ont-elles été explicitement conçues en fonction d'hypothèses neuroscientifiques? (b) le programme vise-t-il au moins l'un des trois prérequis identifiés? et (c) le programme est-il destiné à des élèves du préscolaire régulier?

Dans un premier temps, notre recherche s'est concentrée sur les programmes d'intervention répondant de façon affirmative aux trois critères, ainsi qu'à une clientèle préscolaire régulière. Une recherche au moyen des bases de données PsycINFO, ERIC et Pubmed, en utilisant notamment les mots clés suivants : *préscolaire, arithmétique, intervention mathématique, sens des nombres, nombre non symbolique ET symbolique ET (inhibition OU contrôle cognitif)* et leur équivalent en anglais (*preschool, arithmetic, mathematical intervention, number sense, nonsymbolic AND symbolic number AND inhibition OR cognitive control*), n'a pas permis d'identifier d'article qui répondait de façon affirmative aux trois critères. Nous avons donc été contraints de modifier ceux-ci.

Dans un second temps, la recherche bibliographique a été modifiée afin d'exclure les termes *contrôle cognitif* et *inhibition*. La recherche ciblait donc seulement les articles portant sur des programmes d'intervention visant à développer le sens des nombres et/ou l'établissement de liens entre ce sens des nombres et les nombres symboliques. Les mots clés suivants ont été utilisés : *intervention mathématique, arithmétique, préscolaire, sens des nombres, nombre non symbolique ET symbolique* et leur équivalent en anglais (*preschool, arithmetic, mathematical intervention, number sense, nonsymbolic AND symbolic number*).

Bien que 22 programmes et outils aient été analysés, seulement 5 pouvaient être retenus puisqu'ils portaient sur des interventions applicables au préscolaire dont les étapes du programme ont été explicitement conçus en fonction d'hypothèses neuroscientifiques, et qu'ils visaient le développement du sens des nombres et/ou l'établissement de liens entre ce sens des nombres et les nombres symboliques. Tel que mentionné précédemment, aucun programme d'intervention ne visait explicitement le développement de l'inhibition pour une clientèle préscolaire régulière.

¹ Pour plus de détails sur ces prérequis, se référer à la revue de littérature de Deshaies, Miron et Masson (2015).

Chaque programme a été analysé en fonction de son apport concernant les prérequis mentionnés précédemment. Ainsi, les programmes d'intervention *Number Race*, *Graphogame*

Maths, *Number Worlds*, *Fostering At-Risk Preschoolers Number Sense* et *FASTT Math* feront l'objet d'une analyse dans cet article.

Tableau 1. Programmes ou outils d'intervention en mathématiques destinés à une clientèle préscolaire

Programmes ou outils d'intervention en mathématiques au préscolaire	Référence à des recherches en neurosciences	Vise le sens des nombres	Vise le lien entre le sens des nombres et le nombre symbolique	Liens Web
<i>Academy of Math Autoskill</i>		X	X	https://eps.schoolspecialty.com/rti/rti-programs
<i>AMP Math System</i>		X	X	http://www.pearsonschool.com/index.cfm?locator=PSZ16d&PM_DbProgramId=55845
<i>Anywhere Learning System</i>		X	X	https://www.fueeducation.com/curriculum/curriculum-focus/intervention-remediation/anywhere-learning-system.html
<i>Accelerated Math</i>		X	X	http://www.renaissance.com/products/accelerated-math
<i>Breakaway Math Intervention package</i>		X	X	http://www.triumphlearning.com/what-we-offer/mathematics/breakaway-math-15-student-intervention-kit.html
<i>Corrective Mathematics</i>		X	X	http://www.nifdi.org/programs/mathematics/corrective-math
<i>Destination Math</i>		X	X	http://www.hkgie.com/lms/l.htm
<i>FASTT Math</i>	X	X	X	http://www.scholastic.com/fastt-math/
<i>Fostering at-risk preschoolers number sense</i>	X	X	X	http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/10409280802206619?journalCode=heed20#_VX3dsthRH4g
<i>Get Ahead Math</i>		X	X	https://oup.com.pk/school-textbooks/mathematics/get-ahead-mathematics.html
<i>Graphogame Math</i>	X	X	X	http://www.lukimat.fi/etusivu
<i>I Can Learn</i>			X	http://www.icanlearn.com/
<i>iSucceed Math</i>		X	X	http://higher.ed.mheducation.com/sites/0070973385/student_view0/succeed_in_math.html
<i>Math Intervention Curriculum</i>		X	X	http://www.camelotlearning.com/math-curriculum
<i>Math Navigator</i>		X	X	http://www.pearsonschool.com/index.cfm?locator=PSImNe
<i>Math Steps</i>		X	X	http://eduplace.com/math/mathsteps/7/
<i>Math Triumphs</i>		X	X	http://www.mhschool.com/math/mathtriumphs/index.html
<i>Number Power</i>		X	X	https://www.collaborativeclassroom.org/number-power
<i>Number Worlds</i>	X	X	X	http://www.sranumberworlds.com/
<i>Side Streets Math</i>		X	X	http://www.internetatschools.com/Articles/News/Breaking-News/The-Princeton-Review-Launches-Assessment-Center-59135.aspx
<i>The Number Race</i>	X	X	X	http://thenumberrace.com/nr/home.php
<i>V math</i>		X	X	http://www.voyagersopris.com/curriculum/subject/math/vmath-third-edition

3. Programmes d'intervention en mathématiques visant le développement d'un ou plusieurs des trois prérequis identifiés

Dans cette section, les études portant sur les cinq programmes d'intervention sont présentées et analysées.

3.1 Number Race

Le programme *Number Race* est un logiciel gratuit conçu pour les élèves dyscalculiques et basé sur l'idée que la dyscalculie serait associée à un déficit de base quant au sens des nombres ou à l'accès au nombre sous sa forme symbolique (Wilson et al., 2006). Le logiciel permet d'entraîner les élèves dans des tâches de comparaisons numériques divertissantes, en présentant des problèmes adaptés au niveau de compétence de chacun. Il permet un espace d'apprentissage multidimensionnel composé de trois types de difficultés : la distance numérique entre les objets présents à l'écran, le délai de réponse et la complexité conceptuelle (nombre non symbolique en lien avec le traitement des opérations symboliques plus complexes). Le logiciel offre également la possibilité de maintenir la difficulté d'une tâche dans la zone proximale de développement de l'élève, tout en minimisant l'échec, en maintenant un niveau de difficulté adéquat (déterminé selon la réussite de l'élève) et en fournissant ainsi un double niveau de stimulation cognitive nécessaire pour un progrès optimal (apprentissage multidimensionnel et dans la zone proximale de développement de l'élève).

Le logiciel vise à développer deux des prérequis mentionnés précédemment, soit le sens des nombres et les liens entre le sens des nombres et les nombres symboliques. En plus de travailler les deux premiers prérequis, ce logiciel permet la conceptualisation et l'automatisation des faits numériques de base. Lors du jeu, deux écrans sont proposés à l'élève; une lui appartenant et l'autre appartenant à son adversaire. Une quantité de jetons apparaît sur les deux écrans et l'élève doit déterminer rapidement qui en a le plus grand nombre (lui ou son adversaire). Une fois la réponse trouvée, une rétroaction est offerte à l'élève et la quantité de jetons est placée sur une bande de nombres. Par le jeu, l'élève est amené à utiliser ses connaissances sur le sens des nombres (déterminer quel ensemble a la plus grande quantité), puis à établir le lien entre ce sens des nombres et le nombre symbolique lorsque les jetons sont remis sur la bande de nombres.

Deux recherches permettent de mieux comprendre l'impact du programme *Number Race* chez les élèves participants. Wilson et al. (2006) ont utilisé le logiciel dans le cadre d'une formation adaptative portant sur la comparaison numérique. Cette recherche a été menée auprès de neuf élèves âgés entre sept et neuf ans ayant des difficultés en mathématique (élèves dyscalculiques). L'intervention réalisée auprès des élèves était de 30 minutes par jour, quatre fois par semaine, sur une période de cinq semaines. Les élèves ont été évalués avant et après l'intervention sur leur performance dans des tâches numériques fondamentales : comptage, transcodage (passage du nombre oral au nombre symbolique/arabe), compréhension de la base

dix, énumération, addition, soustraction et comparaison numérique symbolique et non symbolique. Le TEDI-MATH (Van Nieuwenhoven, Grégoire et Noël, 2005) ainsi que des tâches de type maison sur le comptage, le transcodage et la compréhension de la base dix ont été utilisés pour évaluer le niveau de performance des élèves.

Suite à l'utilisation du logiciel *Number Race*, les élèves ont vu leur performance s'améliorer lors de tâches en lien avec le sens des nombres. Les délais de subitisation et de comparaison numérique ont diminué de plusieurs centaines de millisecondes. La performance à une tâche de soustraction a augmenté de 23 % après l'utilisation du logiciel. Par contre, bien que cela ne fasse pas partie des trois prérequis essentiels, cette recherche a permis de faire ressortir que la performance sur les tâches de compréhension de l'addition et de la base dix ne se s'est pas améliorée au cours de la période à l'étude.

Bien que ces résultats aient démontré des effets positifs en lien avec les deux premiers prérequis, il est intéressant de se demander si cette amélioration persiste dans le temps, ce qu'un suivi longitudinal plus approfondi des résultats aurait pu révéler. De plus, la présence d'un groupe contrôle aurait permis de comparer l'amélioration des élèves ayant suivi l'intervention par rapport à ceux qui ne l'ont pas suivi.

Une autre étude impliquant cette fois 53 élèves du préscolaire issus de familles socioéconomiquement faibles, c'est-à-dire provenant des régions codées « zone prioritaire d'éducation » (zone associée à un taux élevé d'échec scolaire), a été menée par Wilson, Dehaene, Dubois et Fayol (2009) auprès d'élèves issus de familles d'immigrants et dont la langue maternelle n'est pas le français. La recherche a eu lieu à l'école, durant les heures de classe, sur une période de 14 semaines. Le temps d'intervention était séparé en deux parties : mathématiques et lecture. Les séances d'instruction s'effectuaient en groupe de trois élèves pour les mathématiques et de deux élèves pour la lecture, le tout encadré par un des chercheurs. Lors de l'intervention, chaque élève avait un total de six séances avec le logiciel de mathématiques et quatre avec le logiciel de français. Les sessions duraient 20 minutes chacune.

Préalablement à la tenue de l'intervention, les élèves ont d'abord répondu à un prétest. Pour la première moitié de celle-ci, un groupe a utilisé *Number Race* et l'autre groupe, un logiciel en français pour la lecture. Les élèves ont ensuite été évalués à mi-étude. Suite à cette évaluation, pour la deuxième moitié de l'intervention, les logiciels ont été échangés entre les deux groupes. Finalement, un posttest, identique au prétest, a été effectué. L'ensemble des tests de cette recherche est constitué de tests papier de 30 minutes ayant pour contenu : écriture et compréhension verbale des nombres symboliques, comparaison des nombres non symboliques, association de nombres d'un à neuf sous les formats donnés, comptage verbal et addition.

Les résultats démontrent que les élèves se sont améliorés au niveau des tâches traditionnelles donnant accès au sens des nombres, soit à la comparaison numérique des nombres. Les

résultats des tâches suggèrent que l'amélioration réside dans l'accès au sens des nombres et non dans le sens des nombres en soi. Ainsi, le lien entre le sens des nombres et les nombres symboliques s'améliorerait grâce à *Number Race*, mais pas nécessairement le sens des nombres lui-même.

En résumé, bien que le programme *Number Race* ait permis une amélioration du lien entre le sens des nombres et les nombres symboliques et qu'il travaille le sens des nombres, ce logiciel ne vise pas un apprentissage explicite par inhibition.

3.2 *Graphogame Maths*

Graphogame Maths est un programme d'intervention informatisé sous forme de jeu qui vise les ensembles de nombres exacts par la correspondance orale des motifs visuels et symboliques. Ce programme développe le sens des nombres ainsi que le lien entre le sens des nombres et les nombres symboliques (Räsänen et al., 2009). L'idée principale de celui-ci est de permettre aux élèves de créer des relations entre les nombres (par exemple, trois et quatre font sept, deux et cinq font sept également) en leur demandant d'associer des petits ensembles d'objets avec le nombre correspondant. Ce programme est basé sur l'idée que la maîtrise de l'arithmétique constitue un obstacle commun chez les enfants avec des difficultés au niveau de la langue (Zhang et al., 2014). *Graphogame Maths* favorise l'apprentissage des nombres, notamment le lien entre le nombre arabe d'un à neuf et le nombre dit oralement. Ce jeu offre également une rétroaction et contient des fonctions d'adaptation.

Le jeu *Graphogame Maths* fournit toujours une information auditive du nombre. La tâche de l'élève est de sélectionner une figure correspondant au nombre dit oralement, parmi deux à cinq options visuelles. Le nombre dit oralement est toujours un mot nombre (par exemple : cinq), tandis que les options visuelles à choisir sont représentées comme des ensembles de motifs de points ou de symboles numériques ou d'additions et de soustractions. Les cibles visuelles tombent du haut de l'écran et la vitesse de chute varie en fonction de la réussite de l'élève face aux nombres précédents.

La différence au niveau du contenu mathématique entre les deux interventions est que *Number Race* souligne l'importance du processus de comparaison approximatif des nombres alors que *Graphogame Maths* se concentre uniquement sur les nombres exacts et les symboles numériques (Räsänen et al., 2009). La différence au niveau de l'organisation du jeu réside dans la manière dont ils abordent l'apprentissage numérique. *Number Race* commence par une comparaison des motifs de points aléatoires avec une grande différence numérique et la solution ne nécessite pas de médiation verbale. *Graphogame Maths* commence à partir de petits ensembles de motifs organisés qui sont numériquement proches les uns des autres. Pour réussir l'activité, l'élève doit associer la quantité présentée et sa correspondance avec le nombre dit oralement.

La recherche de Räsänen et al. (2009) présente les résultats d'une intervention assistée par ordinateur sur les

compétences numériques des élèves du préscolaire. Cette recherche fut menée auprès de 30 élèves du préscolaire, provenant de 12 écoles différentes, identifiés comme étant en difficulté d'apprentissage par leur enseignant. Ces élèves furent distribués aléatoirement dans deux groupes d'intervention, soit *Number Race* et *Graphogame Maths*. Afin d'effectuer des comparaisons, un groupe contrôle équivalent a été créé en jumelant chaque élève désigné du groupe d'intervention à un élève de la même classe, ayant une date d'anniversaire similaire à la sienne.

Le premier groupe a joué au jeu *Number Race*, tandis que le second groupe a joué au jeu *Graphogame Maths*. Les deux groupes ont participé à une intervention quotidienne pour une durée de trois semaines à raison de 10 à 15 minutes par jour. La performance des élèves au niveau de la capacité à compter verbalement, de la comparaison de nombre, du dénombrement, de l'arithmétique et de la dénomination rapide d'un nombre de points a été mesurée avant et après l'intervention. Les résultats des deux interventions montrent une amélioration similaire des compétences des élèves pour ce qui est de la comparaison des nombres, par rapport à un groupe témoin ($n = 30$).

Cette étude démontre l'importance d'une intervention quotidienne en lien avec le sens des nombres et travaillant le lien entre le sens des nombres et les nombres symboliques. Celle-ci permet de constater que des activités lors desquelles la comparaison de nombres est présentée sous sa forme non symbolique et/ou la comparaison de nombres présentés sous leurs formes symbolique et orale, permettent une meilleure comparaison des nombres. Cependant, ce résultat positif est issu d'une recherche menée auprès d'élèves ayant des difficultés d'apprentissage et non auprès d'élèves du régulier.

Bien que le programme *Graphogame Maths* ait permis une amélioration du lien entre le sens des nombres et les nombres symboliques (surtout l'association avec le nombre sous la forme verbale) et qu'il travaille le sens des nombres, ce logiciel ne vise pas un apprentissage explicite par inhibition.

3.3 *Number Worlds*

Selon Griffin (2004b), les sciences cognitives offrent un aperçu de la façon dont les jeunes élèves peuvent mieux apprendre les mathématiques. Ainsi, dans le programme *Number Worlds* (Griffin, 2004a), le sens des nombres est défini en termes de connaissances primaires, et prend assise auprès des recherches en neurosciences (Griffin, 2002; Griffin et Case, 1997). Ce programme met fortement l'accent sur l'aide aux élèves afin que ceux-ci intègrent les connaissances implicites et explicites. Les activités proposées (des jeux qui exposent les enfants à différentes représentations du nombre) encouragent les élèves à construire différentes représentations du nombre en les exposant à des représentations explicites du nombre et impliquent également une forte composante verbale lors de la relation entre le nombre symbolique et sa quantité. Ainsi, les élèves sont encouragés à raisonner à partir de la récupération des faits numériques et du sens des nombres.

De plus, ce programme met l'accent sur l'anticipation des réponses attendues pour chaque problème (Griffin, 2004a), ce qui va au-delà des trois prérequis.

Cinq principes pédagogiques sont au cœur de ce programme. Le premier est que l'élève doit construire ces nouveaux apprentissages à partir de ce qu'il connaît déjà : le programme évalue les connaissances actuelles de l'élève par l'entremise d'un prétest conçu par les auteurs. Ensuite, l'ensemble des activités mises à la disposition de l'élève cible plusieurs niveaux d'apprentissage, ce qui permet à l'ensemble des élèves de vivre un défi à sa mesure. De plus, toutes les activités sont séquencées et conviennent à plusieurs niveaux de développement afin que tous y participent. Le deuxième principe est de suivre la progression naturelle de développement lors de la sélection de nouvelles connaissances à enseigner (par exemple, un élève de quatre ans peut être placé devant des tâches nécessitant le comptage et la cardinalité des nombres). Le troisième principe est d'enseigner l'aisance en calcul ainsi que la compréhension conceptuelle. Le quatrième principe est de fournir de nombreuses opportunités de manipulation concrète, de résolutions de problèmes et de communication aux élèves. Enfin, le dernier principe est d'exposer les élèves au plus grand nombre de façons différentes de représenter les nombres et de discuter de leurs utilités dans la société. En somme, ce programme permet de travailler le sens des nombres ainsi que le lien entre le sens des nombres et les nombres symboliques, et permet également à l'élève d'acquérir d'autres habiletés et connaissances.

Le programme *Number Worlds*, élaboré par l'équipe de Griffin (2004a), s'appelait à l'origine *RightStart*. Lors d'une étude menée sur plusieurs années, les populations à risque d'élèves qui ont reçu le programme *Number Worlds* au préscolaire ont réalisé des gains importants sur la connaissance des nombres et une augmentation de la moyenne de la performance en mathématiques, lors d'une étude de suivi lors de la 1^{re} année (Case et al., 1996; Griffin, Case et Siegler, 1994). Par contre, les groupes contrôles des élèves à risque qui ont été suivis lors de cette étude, et qui ont participé à une variété d'autres programmes en mathématiques, ont continué à moins bien performer. Bien qu'ils aient fait des progrès lors du préscolaire et de leur 1^{re} année, le retard de développement qui était présent au début du préscolaire l'était encore face aux mesures d'apprentissage et de réussite en mathématiques à la fin de la 1^{re} année.

En résumé, le programme *Number Worlds* a lui aussi permis des gains positifs sur les plans du sens des nombres et du lien entre le sens des nombres et les nombres symboliques. Par contre, bien qu'incluant une partie liée à l'anticipation des réponses attendues, ce qui correspond à du contrôle cognitif, ce programme n'inclut pas un enseignement explicite de stratégies liées à l'inhibition, et la clientèle cible est celle des élèves à risque.

3.4 Fostering At-Risk Preschoolers Number Sense

Fostering At-Risk Preschoolers Number Sense est un programme d'intervention au préscolaire développé et évalué

à partir des recherches sur le sens des nombres (Baroody, 1985; Baroody, Lai et Mix, 2006; Baroody et Rosu, 2006; Howell et Kemp, 2004; Jordan et al., 2007). Ce programme est orchestré selon le fait qu'habituellement les enfants progressent à travers trois phases durant l'apprentissage de la compréhension des nombres (Kilpatrick, Swafford et Findell, 2001) :

- a) dénombrer à partir de stratégies utilisant des objets ou le comptage verbal pour déterminer la réponse;
- b) utiliser des stratégies de raisonnement au moyen de faits numériques connus et de leurs relations pour déduire une solution à des combinaisons d'inconnus;
- c) récupérer en mémoire des faits numériques pour répondre à une question.

Dans cette perspective, les phases un et deux servent de fondement aux élèves afin qu'ils développent plus tard des stratégies de récupération en mémoire des faits numériques (Baroody et al., 2006). Afin de permettre aux élèves l'association entre l'expression numérique et sa réponse, cette intervention est renforcée par la pratique répétée, une stratégie souvent soutenue par les recherches en neurosciences (Dehaene, 1997; Perlmutter, 1986). Ce programme travaille le sens des nombres ainsi que le lien entre le sens des nombres et les nombres symboliques, mais il va aussi au-delà de l'apprentissage des prérequis.

L'intervention consiste en grande partie à vivre des jeux ludiques permettant d'appliquer plusieurs concepts ou compétences mathématiques. Par exemple, les élèves doivent lancer un ou deux dés et dénombrer le nombre de points. Ensuite, ils doivent enlever autant de taches présentes sur les animaux que le nombre de points. Le premier qui enlève toutes les taches des animaux gagne. Ainsi, par différents jeux, l'intervention permet de travailler la reconnaissance verbale, le nombre sous sa forme symbolique et non symbolique en associant les points sur les dés à des nombres (par exemple : ●● 3). Par le jeu, cette intervention permet également le travail sur les processus d'addition et de soustraction, encore une fois avec l'utilisation des dés.

Celui-ci a été testé auprès de 80 élèves fréquentant deux écoles maternelles publiques accueillant des élèves à risque. Au début de l'étude, les participants étaient âgés de 4 à 5,25 ans. Afin de déterminer le niveau de compétence initial des élèves, l'équipe de Baroody, Eiland et Thompson (2009) a utilisé le TEMA-3 (Ginsburg et Baroody, 2003), un test diagnostique conçu pour les élèves âgés de 3 ans et 0 mois jusqu'à 8 ans et 11 mois. Ce test a été utilisé pour mesurer la réussite initiale des élèves et évaluer leur progrès. Il a aussi été utilisé pour déterminer les forces et les faiblesses des élèves ainsi que pour guider l'intervention spécifique. Le TEMA-3 mesure les compétences numériques des élèves, la comparaison de nombre, le nombre sous sa forme orale, la maîtrise des faits numériques, les compétences de calcul et la compréhension de concepts.

L'intervention a eu lieu tout au long de l'année scolaire, à des dates différentes selon les différentes phases de l'étude. Sur

une période de quatre semaines (septembre et octobre), chaque participant a été prétesté individuellement pour le sens des nombres en utilisant une version basée sur le jeu de la TEMA-3 (Ginsburg et Baroody, 2003). Suite à ce prétest, dix semaines d'intervention ont suivi, portant sur le sens des nombres (octobre à janvier). Puis, un second prétest a été administré individuellement sur une période de deux semaines (janvier et février), mais cette fois-ci à l'aide d'un support informatique et traitant du répertoire mémorisé. Suite à celui-ci, les participants ont été affectés au hasard à l'une des quatre conditions de formation du répertoire mémorisé. Il est à noter qu'aucun groupe contrôle n'a été utilisé. Après 10 semaines de formation sur le calcul mental (février à avril), un posttest était administré à chaque participant sur la maîtrise des faits numériques (addition et soustraction) et l'aisance avec les nombres en général par le biais du TEMA-3 en mai. Les résultats montrent une amélioration significative au TEMA-3 des participants par rapport aux résultats entre le prétest et le post-test ($z = 6,222$; $p < 0,001$). De plus, la moyenne des élèves au prétest a plus que doublé lors du post-test.

En somme, le programme *Fostering At-Risk Preschoolers Number Sense* créé par Baroody, Eiland et Thompson (2009) vise une clientèle préscolaire d'élèves en difficulté d'apprentissage. Ce programme a su démontrer des gains positifs chez ce type d'élèves. En plus de viser le sens des nombres et le lien entre le sens des nombres et les nombres symboliques, ce programme vise également l'apprentissage des faits numériques de base. Cependant, celui-ci ne vise pas un enseignement explicite de l'inhibition et n'a pas une clientèle préscolaire régulière.

3.5 FASTT Math

FASTT Math est un programme, sous forme de jeu informatisé, qui vise l'apprentissage des faits numériques de l'addition, la soustraction, la multiplication et la division. Le programme commence par une évaluation informatisée de la connaissance de l'élève par rapport aux faits numériques de base, afin d'identifier les faits non maîtrisés par un enregistrement à la fois de la précision, mais également la demande d'une réponse selon un temps déterminé. Les problèmes auxquels l'élève doit répondre sont présentés visuellement et l'élève doit saisir à la fois le fait numérique et la solution (par exemple, pour faire avancer une voiture de course rapidement et gagner la course, l'élève doit résoudre des problèmes d'addition; une bonne réponse fait avancer la voiture). Le programme utilise la réponse contrôlée de temps (1,25 s), ce qui oblige les élèves à abandonner des stratégies inefficaces et à récupérer rapidement des réponses à partir du réseau de connaissances déclaratives; ce qui fait référence à la flexibilité mentale (*shifting*). En fait, cette fonction exécutive consiste à percevoir les éléments de la situation sous un nouvel éclairage et conduit dans certains cas, à découvrir la solution (Clément, 2001). FASTT Math est un programme qui prend appui sur la recherche en neurosciences, en ce qui concerne les changements dans les modèles d'activation du cerveau après l'apprentissage de faits mathématiques (Kaufmann et al., 2005)

et le passage de la transformation des régions quantitatives du cerveau à celles liées à l'automatisation de la récupération des faits numériques et la pratique (Butterworth, 1999; Chochon, Cohen, van de Moortele et Dehaene, 1999; Dehaene et al., 2003). L'accent mis sur l'automatisation est conforme avec le modèle triple-code tel que présenté par Dehaene (Cohen et Dehaene, 1995; Dehaene, 2011; Dehaene et al., 2003). De plus, FASTT Math insiste sur la relation entre les symboles numériques et leurs représentations verbales associées; ce programme engage donc le système verbal. Celui-ci se base sur l'apprentissage du sens des nombres et du lien entre le nombre non symbolique et symbolique afin d'amener les élèves vers l'acquisition des faits numériques. Cependant, bien que deux des prérequis soient pris en compte, la visée première de ce programme n'est pas l'apprentissage de ceux-ci, mais bien l'apprentissage des faits numériques.

Une recherche a été menée par Hasselbring, Goin et Bransford (1988) auprès de plus de 400 élèves utilisant le programme FASTT Math pour développer la maîtrise des faits numériques de base. Un prétest et un posttest ont été utilisés pour mesurer le niveau de maîtrise des faits numériques d'un échantillon de 160 élèves (7-14 ans). Les chercheurs ont réparti les élèves en difficulté d'apprentissage dans le groupe d'intervention ou dans le groupe contrôle. Le groupe expérimental a reçu une intervention quotidienne informatisée sur l'apprentissage des faits numériques, alors que le groupe contrôle a seulement reçu l'enseignement mathématique prévu dans ses activités typiques en classe. Un groupe de comparaison d'élèves dits réguliers était aussi inclus dans cette recherche. Hasselbring et al. (1988) ont rapporté des données descriptives indiquant que le groupe expérimental ayant des difficultés d'apprentissage a augmenté la maîtrise du nombre de faits numériques de 45 à 73 % par rapport au prétest. Durant la même période, le groupe contrôle d'élèves en difficulté d'apprentissage n'a montré aucun changement sur la maîtrise de faits numériques, et les élèves dits réguliers ont augmenté en moyenne la maîtrise de seulement huit faits numériques supplémentaires. Ainsi, les élèves en difficulté d'apprentissage ont acquis le double de celui de leurs pairs qui n'étaient pas en difficulté d'apprentissage. Bien que cette recherche n'indique que des résultats positifs pour FASTT Math, certaines limites sont présentes, entre autres le manque d'informations concernant le type spécifique de trouble(s) d'apprentissage ou les caractéristiques de base des groupes.

En somme, le programme FASTT Math vise l'apprentissage des faits numériques de base. Bien que celui-ci prenne appui sur les recherches en neurosciences et qu'il amène les élèves à faire le lien entre le sens des nombres et les nombres symboliques, l'intention première de ce programme est la maîtrise des faits numériques de base. Toutefois, nous avons pu constater que le programme permet à l'élève d'abandonner ses stratégies inefficaces (flexibilité mentale). Toutefois, il n'y a pas d'enseignement explicite des stratégies à utiliser lors des situations problématiques. C'est pour cette raison que nous mentionnons que ce dernier ne travaille pas de façon explicite l'inhibition.

4. Discussion

À la lumière de notre recension d'écrits, l'analyse détaillée des divers programmes et outils d'intervention disponibles en mathématiques se basant sur les recherches en neurosciences montre qu'aucun ne traite les trois prérequis essentiels en mathématiques, soit le sens des nombres, le lien entre le sens des nombres et les nombres symboliques et l'inhibition, tout en étant destiné à une clientèle préscolaire régulière. En effet, bien que plusieurs programmes d'intervention en mathématiques au préscolaire touchent le sens des nombres (Clements, DiBiase et Sarama, 2004; Griffin, 2004a; Piazza et al., 2004; Wilson et al., 2006) ou le lien entre le sens initial des nombres et la représentation symbolique des nombres (Baroody et al., 2009; Baroody, Eiland, Purpura et Reid, 2012; Clements et Sarama, 2008; Clements, Sarama, Wolfe et Spitler, 2013; Griffin, 2004a), aucun ne cible, en même temps que les deux autres, le développement explicite de l'inhibition. Bien qu'une composante du programme FASTT Math travaille la flexibilité mentale, nous considérons qu'il s'agit de processus différents de ceux associés à l'inhibition, puisque le jeu ne dit pas à l'élève pourquoi il n'a pas obtenu une bonne réponse et quelle devrait être la stratégie efficace à utiliser.

Considérant qu'aucun des programmes examinés ne cible les trois prérequis essentiels, que l'éducation préscolaire doit fournir une base solide pour les futurs apprentissages des élèves (Jordan et al., 2007) et que le niveau de compétences en mathématiques lors de l'entrée à l'école primaire prédit l'éventuelle réussite scolaire des élèves (Duncan et al., 2007), une proposition de création d'une intervention au préscolaire visant non seulement le développement du sens des nombres et du lien entre le sens des nombres et les nombres symboliques, mais également le développement de l'inhibition pourrait s'avérer pertinente. En fait, il ne s'agirait pas seulement d'ajouter une composante « inhibition » à l'intérieur des programmes existants, mais bien de réfléchir l'intervention en termes d'enseignement par inhibition pour amener les élèves à détecter et à contrer les pièges mathématiques (par exemple : croire que plus une rangée de jetons est longue, plus ce nombre est élevé) tout en travaillant le sens des nombres et le lien entre ce sens des nombres et le nombre symbolique. Une intervention permettant cet ajout pourrait représenter un avantage considérable pour l'enseignement des mathématiques au préscolaire.

5. Conclusion

Tel que discuté, en étudiant les changements qui se déroulent dans le cerveau lors de l'acquisition des compétences arithmétiques, il est possible de mettre de l'avant qu'au moins trois prérequis seraient importants pour bien préparer les élèves à l'apprentissage de l'arithmétique : le développement du sens des nombres, l'établissement de liens explicites entre le sens des nombres et les nombres symboliques et le développement de la capacité d'inhiber certains automatismes de la pensée qui peuvent biaiser les raisonnements numériques des élèves.

Afin d'identifier les interventions permettant de consolider ces trois prérequis chez les élèves du préscolaire, cet article identifie et discute des études ayant porté sur des programmes d'intervention visant le développement de l'un ou l'autre des prérequis. Parmi 22 programmes d'intervention identifiés, seulement 5 s'appuient sur les neurosciences et visent le développement du sens nombre et/ou du lien entre le sens du nombre et les nombres symboliques.

Toutefois, cette recherche comporte quelques limites. Sur le plan des critères de sélection des différents programmes, notre recension des écrits s'est limitée aux interventions conçues en fonction d'hypothèses neuroscientifiques. De plus, notre recherche s'est limitée aux élèves du préscolaire régulier. Il serait intéressant de refaire cette recension en excluant ces contraintes puisqu'aucune intervention ne cible explicitement l'inhibition et la clientèle visée.

Somme toute, comme mentionné précédemment, un fait saillant de cette recension des écrits scientifiques est qu'aucun des programmes identifiés ne vise, en plus des deux prérequis discutés précédemment, le développement explicite de l'inhibition, c'est-à-dire la capacité à contrôler ou à bloquer certains automatismes de la pensée pouvant nuire au raisonnement numérique. Ce constat suscite une réflexion quant à la pertinence de poursuivre la recherche visant la conception, la mise en application et l'évaluation d'un programme d'intervention visant non seulement le développement du sens des nombres et l'établissement de liens entre le sens des nombres et les nombres symboliques, mais également le développement de l'inhibition pour des élèves du préscolaire régulier. Tout comme mentionné précédemment, il ne s'agirait pas seulement d'ajouter une composante inhibition, mais bien de concevoir l'intervention afin d'amener les élèves à contrer leurs fausses intuitions (inhibition) qui peuvent nuire à leur compréhension des mathématiques. Pour répondre à cette lacune, un projet de recherche a donc été conduit afin de créer, expérimenter et valider une intervention en mathématiques au préscolaire travaillant les trois prérequis. Ce projet fait l'objet d'un deuxième article dans ce numéro thématique « Effet d'une intervention pédagogique visant l'apprentissage du contrôle inhibiteur sur le développement de prérequis liés à l'arithmétique chez les élèves du préscolaire âgés de 5 ans ».

Références

- Aunola, K., Leskinen, E., Lerkkanen, M.-K. et Nurmi, J.-E. (2004). Developmental dynamics of math performance from preschool to Grade 2. *Journal of Educational Psychology*, 96(4), 699-713.
<https://doi.org/10.1037/0022-0663.96.4.699>
- Baroody, A. J. (1985). Mastery of basic number combinations: internalization of relationships or facts? *Journal for Research in Mathematics Education*, 16(2), 83-98.
<https://doi.org/10.2307/748366>

- Baroody, A. J., Eiland, M. D., Purpura, D. J. et Reid, E. E. (2012). Fostering at-risk kindergarten children's number sense. *Cognition and Instruction*, 30(4), 435-470. <https://doi.org/10.1080/07370008.2012.720152>
- Baroody, A. J., Eiland, M. et Thompson, B. (2009). Fostering at-risk preschoolers' number sense. *Early Education & Development*, 20(1), 80-128. <https://doi.org/10.1080/10409280802206619>
- Baroody, A. J., Lai, M.-L. et Mix, K. S. (2006). The development of young children's number and operation sense and its implications for early childhood education. Dans B. Spodek et O. Saracho (dir.), *Handbook of research on the education of young children* (p. 187-221). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Baroody, A. J. et Rosu, L. (2006). Adaptive expertise with basic addition and subtraction combinations: The number sense view. Dans A. J. Baroody et J. Torbeyns (dir.), *Developing adaptive expertise in elementary school arithmetic*. Symposium conducted at the annual meeting of the American Educational Research Association, San Francisco.
- Butterworth, B. (1999). *The mathematical brain*. Londres, Royaume-Uni : Macmillan.
- Case, R., Okamoto, Y., Griffin, S., McKeough, A., Bleiker, C., Henderson, B., ... et Keating, D. P. (1996). The role of central conceptual structures in the development of children's thought. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 61(1/2), i-295. <https://doi.org/10.2307/1166077>
- Chochon, F., Cohen, L., van de Moortele, P. F. et Dehaene, S. (1999). Differential contributions of the left and right inferior parietal lobules to number processing. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 11(6), 617-630. <https://doi.org/10.1162/089892999563689>
- Clément, E. (2001). Étude des différences de flexibilité mentale dans l'activité de résolution de problèmes. Dans A. Flieller, C. Bocéréan, J.-L. Kop, E. Thébaut, A.-M. Toniolo et J. Tournois (dir.), *Questions de psychologie différentielle* (p. 317-322). Rennes, France : Presses Universitaires de Rennes.
- Clements, D. H., DiBiase, A.-M. et Sarama, J. (dir.). (2004). *Engaging young children in mathematics: Standards for early childhood mathematics education*. Mahwah, NJ : Lawrence Erlbaum Associates.
- Clements, D. H. et Sarama, J. (2008). Experimental evaluation of the effects of a research-based preschool mathematics curriculum. *American Educational Research Journal*, 45(2), 443-494. <https://doi.org/10.3102/0002831207312908>
- Clements, D. H., Sarama, J., Wolfe, C. B. et Spitler, M. E. (2013). Longitudinal evaluation of a scale-up model for teaching mathematics with trajectories and technologies. *American Educational Research Journal*, 50(4), 812-850. <https://doi.org/10.3102/0002831212469270>
- Cohen, L. et Dehaene, S. (1995). Number processing in pure alexia: The effect of hemispheric asymmetries and task demands. *Neurocase*, 1(2), 121-137. <https://doi.org/10.1080/13554799508402356>
- De Smedt, B., Noël, M.-P., Gilmore, C. et Ansari, D. (2013). How do symbolic and non-symbolic numerical magnitude processing skills relate to individual differences in children's mathematical skills? A review of evidence from brain and behavior. *Trends in Neuroscience and Education*, 2(2), 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2013.06.001>
- Dehaene, S. (1997). *The number sense*. New York, NY : Oxford University Press.
- Dehaene, S. (2011). *The number sense: How the mind creates mathematics* (édition révisée et mise à jour). New York, NY : Oxford University Press.
- Dehaene, S. et Cohen, L. (2007). Cultural recycling of cortical maps. *Neuron*, 56(2), 384-398. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.10.004>
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P. et Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20(3-6), 487-506. <https://doi.org/10.1080/02643290244000239>
- Deshaies, I., Miron, J.-M. et Masson, S. (2015). Comprendre le cerveau des élèves pour mieux les préparer aux apprentissages en arithmétique dès le préscolaire A.N.A.E., 27(134), 39-45.
- Duncan, G. J., Dowsett, C. J., Claessens, A., Magnuson, K., Huston, A. C., Klebanov, P., ... et Japel, C. (2007). School readiness and later achievement. *Developmental Psychology*, 43(6), 1428-1446. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.43.6.1428>
- Feigenson, L., Dehaene, S. et Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307-314. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.05.002>
- Fuhs, M. W. et McNeil, N. M. (2013). ANS acuity and mathematics ability in preschoolers from low-income homes: Contributions of inhibitory control. *Developmental Science*, 16(1), 136-148. <https://doi.org/10.1111/desc.12013>
- Ginsburg, H. P. et Baroody, A. J. (2003). *Test of Early Mathematics Ability-Third edition (TEMA-3)*. Austin, TX : PRO-ED.
- Griffin, S. (2002). The development of math competence in the preschool and early school years: Cognitive foundations and instructional strategies. Dans J. Royer (dir.), *Mathematical cognition* (p. 1-32). Greenwich, CT: Information Age Publishing.
- Griffin, S. (2004a). Building number sense with number worlds: A mathematics program for young children. *Early Childhood Research Quarterly*, 19(1), 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2004.01.012>

- Griffin, S. (2004b). Teaching Number Sense. *Educational Leadership*, 61(5), 39-42.
- Griffin, S. et Case, R. (1997). Re-thinking the primary school math curriculum: An approach based on cognitive science. *Issues in Education*, 3(1), 1-49.
- Griffin, S. A., Case, R. et Siegler, R. S. (1994). Rightstart: Providing the central conceptual prerequisites for first formal learning of arithmetic to students at risk for school failure. Dans K. McGilly (dir.), *Classroom lessons: Integrating cognitive theory and classroom practice* (p. 25-50). Cambridge, MA: MIT Press.
- Hasselbring, T. S., Goin, L. I. et Bransford, J. D. (1988). Developing math automaticity in learning handicapped children: The role of computerized drill and practice. *Focus on Exceptional Children*, 20(6), 1-7. <https://doi.org/10.17161/fec.v20i6.7504>
- Houdé, O. (2000). Inhibition and cognitive development: object, number, categorization, and reasoning. *Cognitive Development*, 15(1), 63-73. [https://doi.org/10.1016/s0885-2014\(00\)00015-0](https://doi.org/10.1016/s0885-2014(00)00015-0)
- Houdé, O. (2014). *Apprendre à résister*. Paris, France : Éditions Le Pommier.
- Houdé, O., Pineau, A., Leroux, G., Poirel, N., Perchey, G., Lanoë, C., ... et 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. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.04.008>
- Howell, S. et Kemp, C. (2004). The role of number sense in the identification and prevention of mathematics disability: A consideration of the phonemic awareness/number sense analogy. *Australasian Journal of Special Education*, 28(2), 65-78. <https://doi.org/10.1017/s1030011200025161>
- Izard, V., Dehaene-Lambertz, G. et Dehaene, S. (2008). Distinct cerebral pathways for object identity and number in human infants. *PLoS Biology*, 6(2), e11. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060011>
- Jordan, N. C., Kaplan, D., Locuniak, M. N. et Ramineni, C. (2007). Predicting first-grade math achievement from developmental number sense trajectories. *Learning Disabilities Research and Practice*, 22(1), 36-46. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5826.2007.00229.x>
- Kaufmann, L., Delazer, M., Pohl, R., Semenza, C. et Dowker, A. (2005). Effects of a specific numeracy educational program in kindergarten children: A pilot study. *Educational Research and Evaluation*, 11(5), 405-431. <https://doi.org/10.1080/13803610500110497>
- Kilpatrick, J., Swafford, J. et Findell, B. (dir.). (2001). *Adding it up: Helping children learn mathematics*. Washington, DC : The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/9822>
- Lubin, A., Lanoë, C., Pineau, A. et 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. <https://doi.org/10.24046/neuroed.20120101.55>
- Lubin, A., Vidal, J., Lanoë, C., Houdé, O. et Borst, G. (2013). Inhibitory control is needed for the resolution of arithmetic word problems: A developmental negative priming study. *Journal of Educational Psychology*, 105(3), 701-708. <https://doi.org/10.1037/a0032625>
- Ministère de l'éducation, du loisir et du sport (MELS). (2003). *Programme de formation à l'école québécoise. Éducation préscolaire. Enseignement primaire*. Québec, QC : Gouvernement du Québec.
- Moutier, S., Angeard, N. et Houdé, O. (2002). Deductive reasoning and matching-bias inhibition training: Evidence from a debiasing paradigm. *Thinking & Reasoning*, 8(3), 205-224. <https://doi.org/10.1080/13546780244000033>
- Moutier, S. et Houdé, O. (2003). Judgement under uncertainty and conjunction fallacy inhibition training. *Thinking & Reasoning*, 9(3), 185-201. <https://doi.org/10.1080/13546780343000213>
- Nosworthy, N., Bugden, S., Archibald, L., Evans, B. et Ansari, D. (2013). A two-minute paper-and-pencil test of symbolic and nonsymbolic numerical magnitude processing explains variability in primary school children's arithmetic competence. *PLoS ONE*, 8(7), e67918. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0067918>
- Piaget, J. (1952). Jean Piaget. Dans E. G. Boring, H. S. Langfeld, H. Werner et R. M. Yerkes (dir.), *History of psychology in autobiography* (vol. 4). Worcester, MA : Clark University Press.
- Piazza, M., Izard, V., Pinel, P., Le Bihan, D. et Dehaene, S. (2004). Tuning curves for approximate numerosity in the human intraparietal sulcus. *Neuron*, 44(3), 547-555. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.10.014>
- Piazza, M., Pica, P., Izard, V., Spelke, E. S. et Dehaene, S. (2014). Education enhances the acuity of the nonverbal approximate number system. *Psychological Science*, 24(6), 1037-1043. <https://doi.org/10.1177/0956797612464057>
- Piazza, M., Pinel, P., Le Bihan, D. et Dehaene, S. (2007). A magnitude code common to numerosities and number symbols in human intraparietal cortex. *Neuron*, 53(2), 293-305. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.11.022>

- Räsänen, P., Salminen, J., Wilson, A. J., Aunio, P. et Dehaene, S. (2009). Computer-assisted intervention for children with low numeracy skills. *Cognitive Development*, 24(4), 450-472. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2009.09.003>
- Rossi, S., Cassotti, M., Moutier, S., Delcroix, N. et Houdé, O. (2015). Helping reasoners succeed in the Wason selection task: When executive learning discourages heuristic response but does not necessarily encourage logic. *PLoS ONE*, 10(4), e0123024. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0123024>
- Perlmutter, M. (dir.). (1986). *Minnesota Symposia of Child Psychology* (vol. 19). Hove, Royaume-Uni : Psychology Press.
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2005.02.009>
- Van Nieuwenhoven, C., Grégoire, J. et Noël, M.-P. (2005). *TEDI-MATH : Test diagnostique des compétences de base en mathématiques*. Paris, France : Les éditions du centre de psychologie appliquée (ECPA).
- Vogel, S. E., Goffin, C. et Ansari, D. (2015). Developmental specialization of the left parietal cortex for the semantic representation of Arabic numerals: An fMR-adaptation study. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 12, 61-73. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2014.12.001>
- Wilson, A. J., Dehaene, S., Dubois, O. et Fayol, M. (2009). Effects of an adaptive game intervention on accessing number sense in low-socioeconomic-status kindergarten children. *Mind, Brain, and Education*, 3(4), 224-234. <https://doi.org/10.1111/j.1751-228x.2009.01075.x>
- Wilson, A. J., Revkin, S. K., Cohen, D., Cohen, L. et Dehaene, S. (2006). An open trial assessment of "The Number Race", an adaptive computer game for remediation of dyscalculia. *Behavioral and Brain Functions*, 2, 20. <https://doi.org/10.1186/1744-9081-2-20>
- Xu, F. et Spelke, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74(1), B1-B11. [https://doi.org/10.1016/s0010-0277\(99\)00066-9](https://doi.org/10.1016/s0010-0277(99)00066-9)
- Zhang, X., Koponen, T., Räsänen, P., Aunola, K., Lerkkanen, M.-K. et Nurmi, J.-E. (2014). Linguistic and spatial skills predict early arithmetic development via counting sequence knowledge. *Child Development*, 85(3), 1091-1107. <https://doi.org/10.1111/cdev.12173>