



# **Déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale**

**Thèse**

**Anne Lafay**

**Doctorat en médecine expérimentale**  
Philosophiæ doctor (Ph.D.)

Québec, Canada

© Anne Lafay, 2016



# Résumé

**INTRODUCTION :** La dyscalculie est un déficit spécifique d'apprentissage des mathématiques dont la prévalence s'étend de 1 à 10 %. La dyscalculie a des répercussions sur la scolarité et sur la vie quotidienne pouvant persister jusqu'à l'âge adulte et ainsi nuire à l'insertion professionnelle. Il existe actuellement deux grandes hypothèses cognitives pour expliquer la dyscalculie développementale : l'hypothèse d'un trouble cognitif général tel qu'un trouble de la mémoire de travail et l'hypothèse d'un trouble cognitif spécifiquement numérique.

**OBJECTIFS :** L'objectif général de cette thèse doctorale est d'évaluer les déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale chez des enfants franco-québécois âgés entre huit et neuf ans, scolarisés en 3<sup>e</sup> année du primaire (1<sup>ère</sup> année du 2<sup>e</sup> cycle). Dans un premier temps, la thèse vise à recenser les écrits (étude 1) portant sur les déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie. Ensuite, elle a pour objectifs spécifiques l'étude des capacités de traitement des quantités non symboliques (étude 2) et symboliques arabe et orale (étude 3), ainsi que de l'intégrité des représentations numériques sous forme de ligne numérique (étude 4).

**MÉTHODE :** Des études comparatives d'un groupe d'enfants en difficulté mathématique (groupe dyscalculique) et d'un groupe d'enfants sans difficulté mathématique ont été réalisées. Des tâches faisant intervenir le code analogique (i.e. ensemble de points), le code arabe, le code oral, et la ligne numérique des nombres ont été administrées dans le but de mesurer les capacités de traitement, de production, et de reconnaissance des nombres.

**RÉSULTATS :** La recension de la littérature permet d'établir qu'il n'existe aucun consensus quant aux déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie (étude 1). Les résultats des études expérimentales montrent que les enfants dyscalculiques présentent des difficultés à traiter avec précision les petites quantités analogiques (étude 2) mais des habiletés préservées pour traiter approximativement les grandes quantités (étude 4). Ils présentent aussi des difficultés à traiter les nombres symboliques (arabe, oral) qui se manifestent par des atteintes de reconnaissance, de traitement et de production des nombres (études 3 et 4). Leur acuité numérique est également plus faible lorsqu'ils doivent traiter cognitivement les nombres symboliques sur une ligne numérique (étude 4).

**CONCLUSION :** Les enfants dyscalculiques présentent un déficit du sens du nombre au niveau du traitement des petites quantités par le Système Numérique Précis, ainsi qu'un déficit de traitement des nombres symboliques. Ce déficit se manifeste à la fois par un déficit de reconnaissance, un déficit d'accès au sens du

nombre via les codes symboliques et une acuité plus faible de la ligne numérique lorsqu'elle implique les nombres symboliques.

# Table des matières

Résumé.....	iii
Table des matières.....	v
Liste des tableaux.....	vii
Liste des figures.....	ix
Liste des abréviations.....	xi
Remerciements.....	xv
Avant-propos.....	xvii
Chapitre 1. Introduction générale.....	1
1.1. Problématique.....	1
1.2. Objectifs.....	3
Chapitre 2. Recension des écrits : troubles cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale.....	5
Étude 1. Revue narrative de littérature relative aux troubles cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale : déficit du sens du nombre ou déficit de l'accès aux représentations numériques mentales?.....	5
Chapitre 3. Méthodologie générale.....	33
3.1. Participants.....	33
3.2. Protocole expérimental.....	34
3.3. Plan statistique.....	37
Chapitre 4. Déficiences de traitement numérique non symbolique dans la dyscalculie développementale.....	39
Étude 2. Impairment of non-symbolic number processing in developmental dyscalculia.....	39
Chapitre 5. Déficiences des traitements numériques symboliques dans la dyscalculie développementale.....	63
Étude 3. Impairment of Arabic- and spoken- number processing in children with developmental dyscalculia .....	63
Chapitre 6. Déficiences d'accès à la ligne numérique mentale via les nombres symboliques dans la dyscalculie développementale.....	89
Étude 4. The mental number line in dyscalculia: Impaired number sense or access from symbolic numbers? .....	89
Chapitre 7. Discussion générale.....	111
7.1. Synthèse des résultats principaux.....	111
7.2. Forces.....	117
7.3. Limites.....	118
7.4. Retombées.....	121

7.4.1. Retombées théoriques.....	122
7.4.2. Retombées cliniques .....	124
7.5. Perspectives futures.....	126
7.5.1. Perspectives fondamentales.....	126
7.5.2. Perspectives cliniques .....	130
7.6. Conclusion .....	130
Bibliographie.....	133

## Liste des tableaux

Tableau 1. Résumé des études portant sur le Système Numérique Précis dans la dyscalculie développementale .....	12
Tableau 2. Résumé des études portant sur le Système Numérique Approximatif dans la dyscalculie développementale .....	14
Tableau 3. Résumé des études portant sur la précision du Système Numérique Approximatif dans la dyscalculie développementale .....	16
Tableau 4. Résumé des études portant sur les corrélats neuronaux de la dyscalculie développementale.....	22
Tableau 5. Résumé des études portant sur l'accès au Système Numérique Approximatif dans la dyscalculie développementale .....	26
Tableau 6. Récapitulatif des tâches expérimentales .....	35
Tableau 7. Listes d'ordre randomisé des tâches expérimentales .....	37
Table 8. Participants' details: TD and MD .....	45
Table 9. Mean number of correct responses (SD) on three non-symbolic numerical tasks for TD and MD .....	52
Table 10. Participants' general cognitive abilities: TD and DD (mean (SD) and statistics) .....	69
Table 11. Participants' general cognitive abilities: TD and DD (mean (SD) and statistics) .....	96
Table 12. Fit of linear and logarithmic or exponential models to the median estimates of children on experimental tasks for TD and DD. ....	101
Table 13. Mean PAE (SD) in each experimental task for TD and DD .....	101
Tableau 14. Récapitulatif des tâches expérimentales réussies et échouées par les enfants dyscalculiques .	114



## Liste des figures

Figure 1. Méthode utilisée .....	8
Figure 2. Sélection des participants et constitution des groupes .....	34
Figure 3. Illustration of the dot set selection task .....	50
Figure 4. Illustration of the Arabic-to-analogic number transcoding task (a) and the spoken-to-analogic number transcoding task (b).....	75
Figure 5. TD and DD performances on Symbolic-to-Analogic number transcoding tasks.....	78
Figure 6. Illustration of the position-to-analogic number transcoding task.....	98
Figure 7. Profil cognitif numérique des enfants dyscalculiques .....	116



## Liste des abréviations

ADR	Absolute Distance Ratio
ANCOVA	ANalysis Of COVAriance
ANOVA	ANalysis Of VAriance
ANS	Approximate Numerical System
BALE	Batterie Analytique du Langage Écrit
CPM	Coloured Progressive Matrix
DC	Dyscalculique
DD	Developmental Dyscalculia
ELO	Évaluation du Langage Oral
ENS	Exact Numerical System
IRM	Imagerie par Résonance Magnétique
IRMf	Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle
MANOVA	Multivariate ANalysis Of VAriance
MD	Mathematic Difficulties
MNL	Mental Number Line
SD	Standard Deviation
SNA	Système Numérique Approximatif
SNP	Système Numérique Précis
T	Tâche
TD	Typical Development
WISC-IV	Wechsler Intelligence Scale for Children



*A tous les Mathis...*



# Remerciements

Orthophoniste, *mon* bureau, *mes* patients, *ma* vie... Puis, sur un quasi coup de tête, au détour d'un repas familial : « je pars faire un doctorat au Québec ». Les bouches s'ouvrent bien rondes, les yeux s'écarquillent, les bouches bredouillent, les yeux clignent, la surprise est là. C'est là que toute l'aventure commence. Faire comprendre aux personnes qui m'entourent que le doctorat ne m'apportera pas plus d'argent ni de meilleurs horaires de travail, mais que j'ai envie de vivre l'expérience. Tout simplement. Les doutes s'immiscent tranquillement. Et puis, une amie (elle se reconnaîtra...) me dit : « Rappelle-toi, il vaut mieux des remords que des regrets ». Alors c'est le *grand saut*, les visas, l'avion. Et je débarque au blanc pays un 31 décembre, tuque sur la tête et mitaines aux mains.

Je tiens à remercier toutes les personnes qui m'ont apporté leur aide et leur soutien et qui m'ont insufflé toute la motivation, la force, et l'énergie nécessaires pour mener à bien mon projet.

Tout d'abord, mes premiers remerciements vont à Joël. Tu as été tout simplement un directeur de thèse exceptionnel. Tant ton expertise scientifique et clinique que tes qualités humaines ont rendu cette collaboration agréable et rassurante. Tu as cette grande qualité de savoir te rendre disponible pour tes étudiants, les écouter et les rassurer. Tu es sans conteste le directeur que tout étudiant peut espérer.

Un immense merci également à ma co-directrice Marie-Catherine. Tu as tout le long de mon projet été présente, apporté ton expertise, de précieux conseils, et ta bonne humeur. Tu as toujours été disponible, même à l'autre bout du globe. Vous avez été, Joël et toi, une parfaite équipe pour superviser mon doctorat. Je vous remercie pour toute la confiance que vous m'avez accordée pour gérer mon projet de doctorat mais aussi tous mes projets à côté.

Je remercie évidemment Dre Chantal Desmarais, Dre Phaedra Royle et Dre Marie-Pascale Noël qui avez accepté de lire ma thèse et d'y apporter vos précieux commentaires.

Merci à Marie-Christine Veilleux, un temps assistante de recherche dans l'équipe, pour avoir prêté ta voix pour l'enregistrement de mes stimuli, pour m'avoir aidé à évaluer les enfants et à corriger leurs productions : une aide précieuse sans qui je serai encore à compter des points... Merci également à Frédérique Charest pour avoir été ma précieuse correctrice linguistique des derniers instants.

Un merci reconnaissant à tous les directeurs de m'avoir accueillie dans leur école, à tous les enseignants de m'avoir permis de travailler avec les enfants pendant les heures de classe, à tous les orthophonistes et orthopédagogues d'avoir été de formidables intermédiaires. Mais surtout un merci chaleureux à tous les

enfants d'avoir participé à mon projet ; vous m'avez fait rire et tant questionnée sur mon accent... « un peu étrange, souvent bizarre, parfois français, et parfois même chinois »...

Mon doctorat n'aurait été le même sans les « collègues de labo » : Sonia évidemment pour ton accueil chaleureux en 2012, toute ton énergie, ton dynamisme et ta bonne humeur ; Monica pour tout ton soutien de la dernière année ; aussi Catherine, Vincent, Christina, Noémie, Ariane, les uns présents au tout début au moment de se *lancer*... les autres présents lors de la *dernière ligne droite*... Les partages, les découragements, les crises de rire, les idées farfelues. Certains sont déjà loin du lab', mais j'espère vous croiser tous très vite.

Merci à tous les amis de Québec, de France ou d'ailleurs : Aline, Andrée-Anne, Claire, Julie, Fanny, Claire-Lise, Auré, Pauline, Anne-Laure, Toutoune, Malik... pour votre confiance sans faille. Merci aux amis virtuels rencontrés au détour d'un post Facebook ® pour votre soutien tout au long de mon parcours.

Un merci immense à ma famille, mes parents et ma sœur. Malgré les quelques larmes régulières à l'aéroport, vous m'avez soutenu de votre confiance inébranlable dans ce projet. Merci à mes deux nièces d'amour Ella et Jade qui m'ont soutenu à leur manière avec leurs gazouillis, leurs risettes, et leur « ça va Tatie N'Anne » de la *dernière ligne droite*.

Quatre ans plus tard, à l'université, présenter ma thèse... Matinée stressante, excitante, angoissante, enthousiasmante, fatigante, énergisante, larmoyante... un mélange d'émotions oscillant entre une *zénitude* suspecte et une intense angoisse d'une minute à l'autre. Et ce fût finalement une belle matinée, pleine d'échanges. Le doctorat, c'est pour moi une expérience extraordinaire, une expérience aux mille opportunités, une expérience sans regret ni même remord, une expérience qui donne des projets plein la tête...

# Avant-propos

Les résultats de la présente thèse sont constitués de quatre études : une revue de littérature et trois articles expérimentaux.

- 1) Lafay, A., St-Pierre, M.-C., Macoir, J. (2015). Revue narrative de littérature relative aux troubles cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale : déficit du sens du nombre ou déficit de l'accès aux représentations numériques mentales?, *Canadian Psychology/Psychologie canadienne*, 56 (1). 96-107. <http://dx.doi.org/10.1037/a0037264>
- 2) Lafay, A., St-Pierre, M.-C., Macoir, J. (*submitted*). Impairment of non-symbolic number processing in developmental dyscalculia, *Learning and Individual Differences*.
- 3) Lafay, A., Macoir, J., St-Pierre, M.-C. (*submitted*). Impairment in Arabic and spoken numbers processing in developmental dyscalculia. *Journal of Learning Disabilities*.
- 4) Lafay, A., St-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (2016). The mental number line in dyscalculia: Impaired number sense or access from symbolic numbers? *Journal of Learning Disabilities*.

Le premier article est inséré au chapitre 2 de cette thèse. L'article est présenté tel que publié, en 2015, dans la revue de *Psychologie canadienne*, excepté le paragraphe 3 de la partie « Les Systèmes numériques » qui a été ajouté pour la présente thèse. L'article a été rédigé par Anne Lafay. Les co-auteurs Marie-Catherine St-Pierre et Joël Macoir, co-directrice et directeur de ce projet de thèse, ont révisé, corrigé et bonifié les différentes versions du manuscrit.

Le deuxième article est inséré au chapitre 4 de cette thèse. L'article a été soumis à la revue *Learning and Individual Differences*. L'article a été rédigé dans son intégralité par Anne Lafay. Les co-auteurs Marie-Catherine St-Pierre et Joël Macoir, co-directrice et directeur de ce projet de thèse, ont révisé, corrigé et bonifié les différentes versions du manuscrit. Ils ont aussi participé activement à l'élaboration de cette étude. Marie-Christine Veilleux, assistante de recherche, a aussi été impliquée lors de la mise en place de l'évaluation des enfants de l'étude.

Le troisième article est inséré au chapitre 5 de cette thèse. L'article est inséré tel que soumis à la revue *Journal of Learning Disabilities*. L'article a été rédigé dans son intégralité par Anne Lafay. Les co-auteurs Marie-Catherine St-Pierre et Joël Macoir, co-directrice et directeur de ce projet de thèse, ont révisé, corrigé et bonifié les différentes versions du manuscrit. Ils ont aussi participé activement à l'élaboration de cette étude.

Marie-Christine Veilleux, assistante de recherche, a aussi été impliquée lors de la mise en place de l'évaluation des enfants de cette étude.

Le quatrième article est inséré au chapitre 6 de cette thèse. L'article est présenté tel que publié dans la revue *Journal of Learning Disabilities*. L'article a été rédigé dans son intégralité par Anne Lafay. Les co-auteurs Marie-Catherine St-Pierre et Joël Macoir, co-directrice et directeur de ce projet de thèse, ont révisé, corrigé et bonifié les différentes versions du manuscrit. Ils ont aussi participé activement à l'élaboration de cette étude. Marie-Christine Veilleux, assistante de recherche, a aussi été impliquée lors de la mise en place de l'évaluation des enfants de cette étude.

# Chapitre 1. Introduction générale

## 1.1. Problématique

Les nombres et leur manipulation font partie intégrante de la vie d'un enfant. Pourtant, le développement des habiletés mathématiques et les troubles qui peuvent l'affecter sont, à l'heure actuelle, encore en questionnement. Il existe effectivement en sciences cognitives un débat relatif à la cognition numérique quant à la possibilité que les compétences mathématiques et leur développement puissent être dépendantes de facteurs innés d'une part, mais aussi de facteurs culturels (i.e., langue, éducation) d'autre part (voir Everett (2013) pour une revue). Certains auteurs proposent que les habiletés numériques (i.e., la capacité à traiter les nombres) qui sous-tendent le développement mathématique sont innées et disponibles à tous – chez les adultes sans culture et langage mathématique (Butterworth, Reeve, Reynolds, & Lloyd, 2008; Frank, Everett, Fedorenko, & Gibson, 2008; Gordon, 2004), chez les bébés (Antell & Keating, 1980; Starkey & Cooper, 1980; Wynn, 1992) et même chez les animaux (Brannon, 2005) (voir Blanc & Camos (2006) pour une revue). D'autres auteurs proposent plutôt que les habiletés mathématiques se développent grâce à un système numérique exact et lié spécifiquement au langage humain. D'ailleurs, plusieurs études mettent en évidence des difficultés mathématiques observées chez les enfants sourds (voir Roux, 2014 pour une revue) ou chez les enfants ayant des Troubles Spécifiques de Langage (Donlan, Cowan, Newton, & Lloyd, 2007; Durkin, Mok, & Conti-Ramsden, 2013). Carey (2001, 2004) attribue par exemple une importance primordiale au langage dans le développement du concept de nombre : en effet, si les enfants perçoivent presque instantanément et de manière quasi innée les toute petites quantités (i.e., subitizing), ce n'est que grâce à l'acquisition des mots-nombres qu'ils deviennent capables d'associer une quantité précise à un mot-nombre précis. Noël, Rousselle, et De Visscher (2013) et Noël et Rousselle (2011) attribuent aussi une place toute particulière à l'apprentissage des nombres arabes dans le développement des habiletés mathématiques. En effet, ces auteurs stipulent que l'apprentissage d'un système symbolique numérique permet l'émergence d'une valeur numérique exacte pour chaque symbole (oral ou arabe). Par exemple, Kolkman, Kroesbergen, et Leseman (2013) ont étudié la contribution des capacités de traitements numériques non symbolique et symbolique au développement de l'association entre quantités et symboles. Ces chercheurs ont montré que, contrairement aux capacités de traitement non symbolique, les habiletés symboliques (connaissance des nombres arabes et de la comptine numérique orale) prédisaient les capacités d'association entre quantités et symboles. La présente thèse s'inscrit aussi dans ce débat dans la mesure où elle interroge les habiletés / déficits numériques non symbolique et symbolique impliqués dans la dyscalculie développementale.

Deux modèles explicatifs sont mis de l'avant à l'heure actuelle pour décrire le traitement cognitif des nombres. Ils intègrent tous deux les aspects innés et les aspects langagiers de la cognition numérique. D'après le

modèle du Triple Code (Dehaene, 1992), trois codes différents – analogique, arabe ou verbal – sont utilisés par l'adulte pour représenter les nombres. Les codes arabe et verbal sont tous deux symboliques et asémantiques et permettent respectivement d'effectuer des calculs exacts et d'appliquer des procédures de résolution de calcul par exemple. Le code analogique est non symbolique et sémantique, en ce sens qu'il représente la magnitude (i.e., le sens) des quantités sous forme d'une ligne numérique mentale compressible de gauche à droite. Bien qu'il s'agisse d'un modèle des processus numériques chez l'adulte, il est une référence actuelle en matière de cognition numérique pour comprendre l'origine des troubles numériques chez l'enfant. Selon le modèle développemental de Von Aster (Von Aster & Shalev, 2007), quatre étapes sont nécessaires à un bon développement numérique. La première étape, quasi-innée, consiste en un système de représentation numérique non symbolique utile pour le traitement des quantités d'objets (voir Lafay, St-Pierre, & Macoir (2013) pour une revue). La seconde étape concerne l'acquisition du code verbal (i.e. les mots-nombres) et l'association entre les quantités d'objets perçues et les mots-nombres. A la troisième étape, l'enfant apprend les symboles numériques arabes et les associe aux quantités perçues et aux étiquettes mots-nombres. Enfin, la quatrième étape est le développement de représentations numériques matures sous forme de ligne numérique. Le cadre théorique adopté dans la présente thèse s'inscrit dans ces deux modèles du traitement cognitif numérique.

Les difficultés mathématiques chez les enfants sont fréquemment observées et objectivées par les enseignants et les professionnels (par exemple : orthopédagogues, orthophonistes, neuropsychologues). D'ailleurs, les études mettent en évidence une prévalence de la dyscalculie, déficit spécifique d'apprentissage de l'arithmétique et du raisonnement mathématique (Diagnostic and statistical manual of mental disorders: DSM-V, 2013), de 1 à 10 % des enfants d'âge scolaire (Badian, 1999 ; Barbaresi, Katusic, Colligan, Weaver, & Jacobsen, 2005 ; Devine, Soltész, Nobes, Goswami, & Szűcs, 2013 ; Dirks, Spyer, van Lieshout, & De Sonneville, 2008 ; Gross-Tsur, Manor, & Shalev, 1996 ; Lewis, Hitch, & Walker, 1994 ; Share, Moffitt, & Silva, 1988). La dyscalculie n'est pas expliquée par un retard de développement de l'intelligence, un déficit sensoriel, moteur, neurologique ou psychiatrique. Elle se manifeste par un large spectre de difficultés mathématiques (par exemple, la présence de difficultés au niveau de la précision et la vitesse de calcul, de la mémorisation des faits arithmétiques, et du raisonnement mathématique). De plus, les difficultés mathématiques interfèrent non seulement dans les activités scolaires, mais aussi dans les activités de la vie quotidienne. En effet, les nombres sont omniprésents dans la vie de tous les jours, et les mathématiques sont impliquées dans beaucoup d'activités, comme dénombrer des collections d'objets, utiliser des mesures de poids, de distance ou de temps, dire, écrire, ou lire des nombres, résoudre des problèmes, etc. L'homme perçoit, utilise et manipule très facilement et quasi automatiquement les nombres dans beaucoup d'activités de la vie quotidienne. Pourtant, ces activités, même d'apparence très simple, sont parfois très compliquées pour les personnes dyscalculiques. Les difficultés mathématiques rencontrées par les enfants dyscalculiques peuvent

ainsi persister jusqu'à l'âge adulte et conduire à leur marginalisation et leur stigmatisation en plus de nuire à l'insertion sociale et professionnelle future (Badian, 1999 ; INSERM, 2007). Enfin, une forte relation est mise en évidence entre performance mathématique et anxiété : en effet, s'il est connu que l'anxiété affecte fréquemment les performances scolaires de manière générale, les enfants dyscalculiques, réciproquement, montrent très souvent un haut niveau d'anxiété spécifiquement liée aux activités mathématiques (Ashcraft & Kirk, 2001 ; Jenßen, Dunekacke, Eid, & Blömeke, 2015; Moradpour, Rostamy-malkhalifeh, Behzadi, & Shahvarani, 2015; Passolunghi, 2011). Ainsi, parce que la dyscalculie est un trouble très présent chez les enfants, parce que les difficultés mathématiques sont vectrices d'anxiété et interfèrent avec les apprentissages scolaires, l'insertion sociale et professionnelle future, il est indispensable d'en comprendre précisément l'origine fonctionnelle cognitive.

Il existe actuellement deux hypothèses cognitives principales pour expliquer la dyscalculie développementale. Selon la première, la dyscalculie résulterait d'un trouble cognitif général affectant par exemple la mémoire de travail (voir Geary, 1993, 2010 pour des revues). Un trouble de mémoire de travail engendrerait par exemple des troubles au niveau de l'acquisition des procédures de calcul (Geary et al., 2009; Geary, Hoard, Nugent, & Byrd-craven, 2008). Selon la seconde hypothèse, la dyscalculie résulterait plutôt d'un trouble cognitif spécifiquement numérique. La présente thèse s'inscrit dans ce débat et porte sur les déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale.

D'un point de vue scientifique, il n'existe actuellement pas de consensus quant à la définition, la caractérisation et les causes de la dyscalculie développementale. Ainsi, une meilleure compréhension des déficits cognitifs impliqués dans la dyscalculie développementale permettrait une meilleure compréhension des difficultés mathématiques vécues par ces jeunes, et par extension une meilleure compréhension des habiletés nécessaires à un développement mathématique harmonieux. D'un point de vue clinique, une meilleure compréhension des troubles dyscalculiques permettrait une meilleure identification des enfants qui en souffrent, et par extension une intervention plus adaptée à leurs difficultés.

## **1.2. Objectifs**

L'objectif général de cette thèse est d'évaluer les déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale chez des enfants franco-qubécois âgés entre huit et neuf ans, scolarisés en troisième année de primaire (1<sup>ère</sup> année du 2<sup>e</sup> cycle). Quatre objectifs spécifiques sont inclus et font l'objet de quatre études distinctes.

Le premier objectif (étude 1) consiste à documenter les déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie par le biais d'une recension des écrits.

Le deuxième objectif (étude 2) vise à mesurer l'intégrité des processus numériques de base chez des enfants dyscalculiques et à les comparer aux performances d'enfants sans difficulté mathématique. En particulier, cette étude vise à étudier les capacités de compréhension et de production des nombres non symboliques ainsi que le traitement précis des petites quantités et le traitement approximatif des grandes quantités.

Le troisième objectif (étude 3) vise à étudier l'intégrité des processus numériques symboliques chez des enfants dyscalculiques et les enfants sans difficulté mathématique. En particulier, cette étude vise à étudier les capacités de reconnaissance, de compréhension et de production des nombres symboliques – arabes et oraux.

Le quatrième objectif (étude 4) consiste à mesurer l'intégrité de la ligne numérique mentale des enfants dyscalculiques et des enfants sans difficulté mathématique. En particulier, cette étude vise à étudier l'intégrité de la ligne numérique mentale en tant que telle et l'accès à cette ligne à partir des codes numériques symboliques arabe et oral.

Dans le prochain chapitre (chapitre 2, étude 1), une recension des écrits concernant les déficits cognitifs numériques sera présentée. Le chapitre 3 décrit la méthodologie générale appliquée dans cette thèse de doctorat. Le chapitre 4 est consacré à la méthodologie spécifique et aux résultats de l'étude portant sur le traitement numérique non symbolique dans la dyscalculie (étude 2). Le chapitre 5 est consacré à la méthodologie spécifique et aux résultats de l'étude portant sur le traitement numérique des nombres symboliques arabe et oral dans la dyscalculie (étude 3). Le chapitre 6 est consacré à la méthodologie spécifique et aux résultats de l'étude portant sur le traitement des lignes numériques dans la dyscalculie (étude 4). Le chapitre 7 présente la discussion générale et la conclusion de cette thèse.

## **Chapitre 2. Recension des écrits : troubles cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale**

Excepté le paragraphe 3 de la partie « Les Systèmes numériques », le texte de ce chapitre a fait l'objet d'un article publié en 2015 dans la *Revue canadienne de psychologie*.

### **Étude 1. Revue narrative de littérature relative aux troubles cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale : déficit du sens du nombre ou déficit de l'accès aux représentations numériques mentales?**

Lafay, A., St-Pierre, M.-C., Macoir, J. (2015). Revue narrative de littérature relative aux troubles cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale : déficit du sens du nombre ou déficit de l'accès aux représentations numériques mentales?, *Canadian Psychology/Psychologie canadienne*, 56 (1). 96-107. <http://dx.doi.org/10.1037/a0037264>

#### **Résumé**

La dyscalculie est définie comme un trouble du développement mathématique interférant avec les activités scolaires et quotidiennes. Les difficultés décrites sont diverses, tant au niveau du comptage, du dénombrement, du calcul, de la résolution de problèmes, etc. Différentes hypothèses cognitives sont alors proposées pour expliquer les processus affectés et l'origine fonctionnelle de la dyscalculie. L'hypothèse du déficit du sens du nombre suggère que la dyscalculie résulte d'un déficit du traitement des représentations non symboliques du nombre et d'une altération des représentations numériques mentales, impliquant des difficultés à comparer, identifier et estimer des quantités, des difficultés à placer des nombres sur une ligne numérique, etc. Cependant, l'hypothèse du déficit d'accès au sens du nombre suggère que la dyscalculie est caractérisée par la présence de difficultés à accéder au sens des quantités à partir des nombres arabes : les enfants dyscalculiques ont des performances équivalentes à leurs pairs contrôles pour traiter des nombres non symboliques, mais des difficultés de traitement des nombres arabes. Dans cette revue de la littérature, nous présentons brièvement et critiquons les travaux qui sous-tendent ces deux hypothèses explicatives.

#### **Abstract**

Dyscalculia is defined as a mathematics disorder that interferes with learning and daily-life activities. Dyscalculia is manifested by difficulties affecting various abilities such as counting, enumeration, calculation,

problem resolution, etc. Different cognitive hypotheses have been proposed to explain the affected processes and the functional origin of dyscalculia. According to the "number sense deficit hypothesis", dyscalculia results from a deficit in the processing of non-symbolic number representations, and from impaired mental numerical representations, leading to difficulty to compare, identify and estimate numbers, to difficulty placing numbers on a numerical mental line, etc. The hypothesis of an access deficit to numerical representations rather suggests that dyscalculia originates from difficulty in accessing the meaning of numbers presented in a symbolic Arabic code. According to this proposition, dyscalculic children perform as their control pairs with non-symbolic numbers, but they present with difficulties in processing Arabic numbers. In this literature review, we briefly present and criticize the studies related to these two explanatory hypotheses.

## INTRODUCTION

D'après la définition du Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux (DSM-IV-TR, 2003), la dyscalculie est définie comme un trouble du développement mathématique qui interfère fortement avec les activités de la scolarité et de la vie quotidienne impliquant des compétences numériques, en absence de trouble sensoriel, moteur, mental, neurologique. Le niveau de l'enfant, évalué par des tests standardisés de calcul et de raisonnement, est significativement inférieur au niveau attendu pour son âge. En 2013, une version révisée du Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux (DSM-V, 2013) ajoute que la dyscalculie est un trouble neurodéveloppemental d'origine biologique dont les difficultés se manifestent dans les premières années de scolarité et sont présentes pendant au moins six mois, de manière légère, moyenne ou sévère. Cette définition reste toutefois très imprécise et ne définit pas la ou les causes cognitives à l'origine de la dyscalculie et ne permet donc pas de différencier un enfant présentant un retard scolaire mathématique d'un enfant présentant une dyscalculie spécifique. De plus, les difficultés décrites chez les enfants dyscalculiques réfèrent le plus souvent à leurs performances dans des tâches d'évaluation (ex., comptage, dénombrement, reconnaissance des chiffres écrits, calcul, opérations écrites, résolution de problèmes présentés verbalement sous forme d'histoires) plutôt qu'aux processus et compétences de base qui sous-tendent les compétences numériques. Ainsi, les définitions, qui sont par ailleurs largement utilisées, sont vagues et les difficultés décrites demeurent très larges ; elles ne permettent donc pas de circonscrire voire d'identifier les troubles cognitifs à l'origine de la dyscalculie.

La prévalence de la dyscalculie varie entre 1 à 10 % des enfants d'âge scolaire (5.6 % à 10.3 % des enfants allemands de 8 ans (Dirks, Spyer, van Lieshout, & de Sonneville, 2008), 7.7 % des enfants néo-zélandais de 11 à 13 ans (Share, Moffitt, & Silva, 1988), 3.9 % et de 3.8 à 7.1% des enfants américains âgés respectivement de 7-8 (Badian, 1999), et 9 ans (Barbarelli, Katusic, Colligan, Weaver, & Jacobsen, 2005), 6.5 % des enfants israéliens de 11-12 ans (Gross-Tsur, Manor, & Shalev, 1996), 1.3 % des enfants anglais de 9-

10 ans (Lewis, Hitch, & Walker, 1994), et 5.3 % des enfants anglais de 7-10 ans (Devine, Soltész, Nobes, Goswami, & Szűcs, 2013)). Ces variations de prévalence peuvent être expliquées par plusieurs facteurs : l'âge des enfants, la langue et la culture de la population testée, les critères diagnostiques, et le choix des tests d'évaluation. De plus, la dyscalculie est très fréquemment associée à la dyslexie (ex., de 17 % (Gross-Tsur et al., 1996) à 43.3-65 % (Barbaresi et al., 2005) des enfants dyscalculiques selon les critères diagnostiques utilisés), et au trouble de déficit de l'attention/hyperactivité (26 % des enfants dyscalculiques (Gross-Tsur et al., 1996)). Selon Barbaresi et al. (2005) la dyscalculie affecte plus les garçons que les filles (i.e., 2 garçons pour 1 fille), d'autres études (Lewis et al., 1994; Gross-Tsur et al., 1996; Badian, 1999) suggèrent plutôt que la dyscalculie est équitablement répartie entre les sexes.

De plus, ces troubles dyscalculiques sont persistants jusqu'à l'âge adulte. Et parce qu'ils interfèrent avec les apprentissages scolaires, parce qu'ils peuvent conduire à la marginalisation et la stigmatisation de ces enfants, et parce qu'ils interfèrent avec l'insertion sociale et professionnelle future, il est indispensable de comprendre précisément quels sont les troubles cognitifs numériques à l'origine des difficultés rencontrées dans le cadre de la dyscalculie. Il existe actuellement plusieurs hypothèses cognitives pour expliquer la dyscalculie développementale, telles que l'hypothèse d'un trouble de mémoire de travail, l'hypothèse d'un trouble secondaire à des troubles visuospatiaux, ou encore l'hypothèse d'un trouble secondaire à des troubles du langage. Cependant, ces hypothèses cognitives générales concernent ce que l'on peut appeler « les dyscalculies secondaires » et ne seront pas abordées dans cette revue de la littérature. L'objectif de la présente revue narrative est de comprendre la nature des déficits numériques à l'origine de la dyscalculie primaire chez les enfants.

## MÉTHODE

La recherche bibliographique a été effectuée dans les banques de données PubMed, et Psychinfo consultées consécutivement à l'aide des mots clés children et developmental dyscalculia, utilisés de façon combinée. La recherche a permis d'identifier 159 articles dans Pubmed et 125 articles dans PsychInfo, dont 62 articles présents dans les deux bases de données. Cette recherche a donc mené à l'identification de 222 articles scientifiques publiés jusqu'à mai 2013. Les articles portant sur des populations particulières autres que la dyscalculie développementale spécifique ont été exclus (telles que des études à propos d'adultes, d'enfants au développement typique ou d'enfants atteints de syndromes génétiques engendrant une dyscalculie). De plus, les articles portant sur les aspects mathématiques en lien avec l'anxiété, les fonctions exécutives ou la mémoire ont été également exclus. A la lecture des résumés, seuls les articles présentant des études originales portant sur le traitement des quantités chez les enfants dyscalculiques, soit les aspects numériques de base qui sous-tendent les compétences mathématiques, ont été sélectionnés dans cette revue. Avec ces

restrictions spécifiques, 36 articles ont finalement été sélectionnés. La Figure 1 détaille la méthode utilisée pour mener à bien cette revue de littérature.

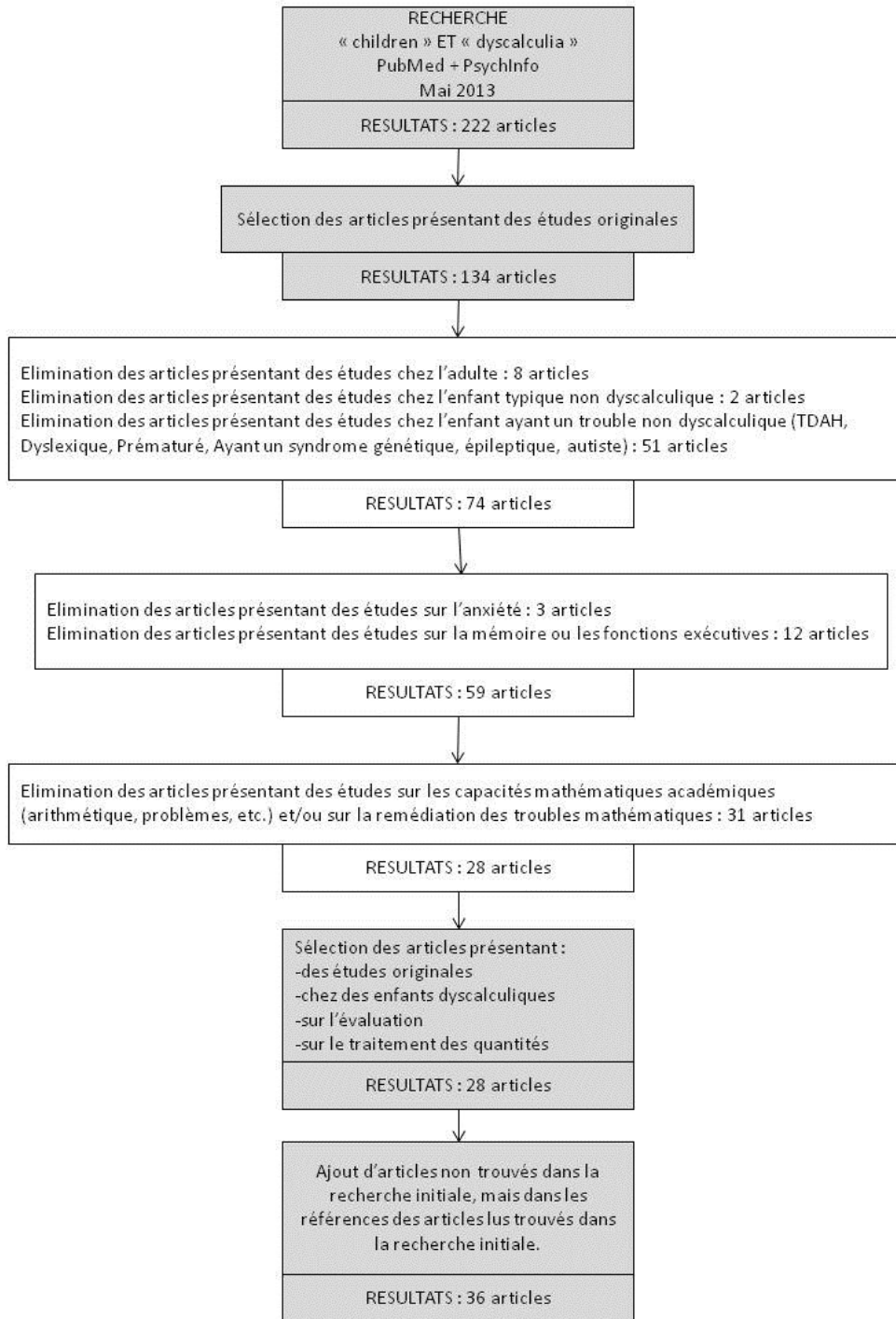


Figure 1. Méthode utilisée

Cette revue de littérature comporte d'abord une section relative aux systèmes numériques impliqués dans les traitements numériques cognitifs. La deuxième section porte sur les hypothèses cognitives numériques relatives à la dyscalculie développementale primaire. La première partie de cette section concerne l'hypothèse d'un déficit spécifique du sens du nombre, c'est-à-dire un déficit du traitement des représentations non symboliques du nombre et d'une altération des représentations numériques mentales. La seconde partie de la section porte sur l'hypothèse d'un déficit d'accès au sens du nombre via les codes symboliques, à savoir des difficultés à accéder au sens des quantités à partir des nombres présentés sous forme orale ou arabe.

## **LES SYSTÈMES NUMÉRIQUES**

Le modèle du Triple Code (Dehaene, 1992), qui vise à expliquer les traitements numériques cognitifs de l'adulte, postule que trois systèmes de représentation sont mobilisés pour le traitement du nombre. Le premier système de représentation, dit analogique, sert à effectuer des comparaisons numériques et des calculs approximatifs. Ce système inné, sous-tendu par le lobe pariétal, et plus particulièrement par le sulcus intrapariétal, permet d'appréhender le sens du nombre, autrement dit la signification des quantités. Dans le cadre de ce modèle théorique, Feigenson, Dehaene et Spelke (2004) défendent l'existence de deux systèmes numériques distincts et spécifiques dédiés au traitement des représentations numériques analogiques : le système des représentations approximatives des quantités numériques (ou Système Numérique Approximatif, dit SNA) qui renvoie au processus d'estimation (c'est-à-dire le processus rapide et intuitif permettant de percevoir approximativement de grandes quantités) ; et le système des représentations précises des petites quantités d'objets individuels (ou Système Numérique Précis, dit SNP) qui renvoie au processus de subitizing (c'est-à-dire la perception intuitive, rapide et innée des petites quantités, sans recourir au comptage). Les quantités numériques sont ainsi représentées mentalement sur une ligne numérique allant de gauche à droite et devenant de moins en moins précise. Les deux autres systèmes de représentations sont symboliques et asémantiques. La représentation auditive verbale est utilisée principalement dans l'activité de comptage et dans l'utilisation des tables. Elle permet de coder la numérosité et intervient dans les activités de calcul précis. Enfin, la représentation visuelle arabe, intervient dans les activités de calcul exact et permet de réaliser des calculs mentaux complexes ainsi que des jugements de parité. Seuls les systèmes symboliques, auditif verbal et visuel arabe, permettent donc de réaliser des calculs exacts et précis au-delà des petites quantités.

Butterworth (1999) propose une perspective développementale et postule l'existence d'un unique module de nombre, correspondant à un sens du nombre quasi-inné, permettant d'appréhender très jeune et de manière quasi instantanée des quantités.

Selon le modèle développemental de l'acquisition numérique (Von Aster & Shalev, 2007), les représentations numériques se développent très précocement pendant les premières années de vie ainsi que pendant la

scolarité et l'enseignement formel des mathématiques. Le modèle décrit alors quatre étapes clefs. La première étape consiste en un sens du nombre inné basé sur un système de représentation des quantités qui permet à l'enfant de *subitiser* les toute petites numérosités (dépendamment du Système Numérique Précis) et estimer les grandes numérosités (dépendamment du Système Numérique Approximatif). La deuxième étape correspond à l'acquisition des mots-nombres pendant la jeune enfance et à l'association de ces mots-nombres avec les numérosités perçues. A la troisième étape, l'enfant apprend à l'école les symboles arabes et à les associer aux mots-nombres et aux numérosités perçues. Ces trois étapes préalables sont des conditions nécessaires au développement d'une ligne numérique mentale mature (i.e., quatrième et dernière étape).

Dans la section suivante, nous présentons les deux hypothèses cognitives selon lesquelles la dyscalculie relèverait de troubles numériques spécifiques : un déficit du sens du nombre (Dehaene, 1992) ou du module nombre (Butterworth, 1999); ou un déficit d'accès aux représentations numériques mentales.

## **HYPOTHÈSES COGNITIVES NUMÉRIQUES RELATIVES À LA DYSCALCULIE**

### **DÉFICIT DU SENS DU NOMBRE**

L'hypothèse de déficit du sens du nombre stipule que la dyscalculie relève d'un trouble spécifique de la signification même des quantités (Wilson & Dehaene, 2007), c'est-à-dire la capacité à appréhender les quantités. Nous présentons, d'une part, les études comportementales relatives aux habiletés à traiter les nombres non symboliques et relatives aux représentations numériques mentales des enfants dyscalculiques, et, d'autre part, les études en neuroimagerie portant sur les anomalies cérébrales chez les enfants dyscalculiques.

### **Études comportementales**

Des études comportementales récentes montrent que les enfants dyscalculiques présentent des difficultés au niveau même de la représentation analogique, à savoir la représentation non symbolique et sémantique du nombre, tant au niveau du système numérique précis que du système numérique approximatif.

#### *Déficit du Système Numérique Précis*

Certaines études suggèrent que les enfants dyscalculiques ont des difficultés au niveau du Système Numérique Précis (système permettant d'appréhender de manière exacte les petites quantités). Le Tableau 1 résume l'ensemble des études s'intéressant au Système Numérique Précis des enfants dyscalculiques. Dans une étude développementale, Schleifer et Landerl (2011) observent que les enfants dyscalculiques de 7 à 10 ans ont de bonnes aptitudes de comptage et de dénombrement, mais présentent un dysfonctionnement au

niveau du subitizing se manifestant par une lenteur de traitement. De même, les enfants dyscalculiques de 10-12 ans sont aussi précis, mais plus lents que leurs pairs contrôles à une tâche de subitizing de 1 à 3 points (Andersson & Östergren, 2012 ; Moeller, Neuburger, Kaufmann, Landerl, & Nuerk, 2009). Le nombre de fixations oculaires de ces enfants est également plus élevé que celui des enfants contrôles, suggérant qu'ils adoptent une stratégie séquentielle davantage basée sur le comptage que sur le subitizing des petites collections. En revanche, Ashkenazi, Mark-Zigdon, et Henik (2012) montrent que les enfants dyscalculiques de 10-11 ans sont aussi rapides, mais moins précis que leurs pairs contrôles. Cette différence de résultats pourrait s'expliquer par le fait que les auteurs ont utilisés les quantités 1 à 4 plutôt que 1 à 3 comme dans les études précédentes. Il existe d'ailleurs une controverse quant à la "prise en charge" des quantités par le Système Numérique Précis. Selon Fayol, Perros, et Seron (2004), ce système ne permet d'appréhender que les quantités 1, 2 et 3 alors Starkey & Cooper (1995) suggèrent que ce système peut prendre en charge les quantités 1 à 5. Le rang du subitizing, c'est-à-dire la quantité maximale pour laquelle le subitizing est possible, doit donc encore être déterminé plus précisément et cette incertitude peut expliquer les résultats contradictoires rapportés par Ashkenazi, Mark-Zigdon, et Henik (2012). Enfin, une étude de Desoete et Grégoire (2006) montre que seuls 33 % des enfants dyscalculiques de 8 à 10 ans sont moins précis dans les tâches de subitizing, suggérant ainsi que ce trouble ne soit pas l'unique cause de la dyscalculie. Cependant, cette étude est la seule dans laquelle les auteurs étudient le subitizing à l'aide d'une tâche de comparaison de quantités, une méthode d'évaluation mettant en jeu des processus cognitifs différents de ceux impliqués dans les tâches habituelles d'estimation. De plus, malgré la taille des quantités comparées dans cette étude (1 à 15), les auteurs rapportent un faible pourcentage d'échec. Ce résultat étonnant pourrait résulter de la non prise en compte du temps de traitement et du recours potentiel au dénombrement par les enfants, une procédure différente de celle en œuvre dans le subitizing. Ainsi, selon la littérature publiée à ce jour, la présence d'un trouble du Système Numérique Précis chez les enfants dyscalculiques ne fait pas consensus. Alors que certains auteurs montrent que les enfants dyscalculiques sont moins précis que leurs pairs contrôles dans les tâches sollicitant le Système Numérique Précis, d'autres suggèrent plutôt qu'ils sont simplement plus lents à traiter les informations. Compte tenu de cette controverse, il devient légitime d'interroger la présence possible de profils différents de dyscalculie : certains enfants dyscalculiques présentant un déficit même du Système Numérique Précis, d'autres davantage des difficultés symboliques d'étiquetage des quantités. Des études additionnelles sont donc nécessaires pour spécifier davantage les habiletés ou déficits à traiter les petites quantités des enfants dyscalculiques, ou encore pour clarifier la nature des processus numériques en cause dans les tâches requérant spécifiquement le Système Numérique Précis mais ne requérant pas de réponse orale.

**Tableau 1. Résumé des études portant sur le Système Numérique Précis dans la dyscalculie développementale**

**Table 1. Summary of studies about the Precise Numerical System in developmental dyscalculia**

	<b>Age</b>	<b>Langue</b>	<b>Nombres d'enfants</b>	<b>Tâche</b>	<b>Taille des quantités</b>	<b>Justesse de la réponse</b>	<b>Temps de réponse</b>
Schleiffer et Landerl (2011)	7-10	Allemand	52 DC 52 Contrôles	Estimation	1 à 3	Aussi précis	Plus lents
Desoete et Gregoire (2006)	8-10	Néerlandais	30 DC	Comparaison non symbolique	1 à 15	33 % des DC moins précis	/
Moeller, Neuburger, Kaufmann, et al. (2009)	10-11	Allemand	2 DC 8 Contrôles	Estimation	1 à 3	Aussi précis	Plus lents
Ashkenazi, Marc-Zidon, Henik (2012)	10-11	Hébreu	22 DC 11 Contrôles	Estimation	1 à 4	Moins précis	Aussi rapides
Andersson et Östergen (2012)	10-12	Suédois	20 DC 43 Contrôles	Estimation	1 à 3	/	Plus lents

DC: dyscalculiques

### *Déficit du Système Numérique Approximatif*

D'autres auteurs suggèrent que les enfants dyscalculiques ont un déficit au niveau du Système Numérique Approximatif (système permettant d'appréhender approximativement les grandes quantités) qui entraîne des difficultés à traiter les grands nombres présentées analogiquement (comparaison de quantités exprimées sous la forme d'ensemble de points par exemple). Desoete, Ceulemans, De Weerd, et Pieters (2012) montrent que les enfants dyscalculiques de 5-6 ans sont moins performants (à savoir qu'ils font plus d'erreurs) que leurs pairs contrôles pour comparer des nombres présentées sous forme de points. De manière similaire, les enfants dyscalculiques de 10-11 ans se montrent également plus faibles (mais tout aussi rapides) que leurs pairs contrôles pour comparer des nombres présentés analogiquement (Ferreira et al., 2012). De plus, des adolescents dyscalculiques de 14-15 ans ont des performances plus faibles que leurs pairs non dyscalculiques dans une tâche de comparaison d'ensembles de points, de même que dans une tâche d'estimation d'ensembles de points (Mazzocco, Feigenson, & Halberda, 2011). Mejias, Mussolin, Rousselle, Grégoire, et Noël (2011) mettent aussi en évidence, chez des enfants dyscalculiques âgés de 9-10 ans, des difficultés d'estimation, c'est-à-dire à produire un nombre de points approximativement similaire à une collection modèle, ce qui suggère que les enfants dyscalculiques ont des difficultés à traiter les quantités même représentées analogiquement. En revanche, Landerl et Kölle (2009) montrent que des enfants dyscalculiques, de 7 à 10 ans, sont aussi précis mais plus lents que leurs pairs non dyscalculiques pour comparer des ensembles numériques non symboliques et symboliques. Le Tableau 2 résume l'ensemble de ces études. Il est fort probable que la variabilité observée dans les résultats de ces études soit explicable par des différences au niveau des populations étudiées (âge, langue) et de la méthodologie utilisée (nature des tâches, taille des quantités). Par exemple, on n'attendra pas les mêmes résultats de la part d'enfants de 7-10 ans à comparer des nombres de 1 à 9 que de la part d'enfants de 5-6 ans à comparer des nombres de 2 à 240. À la lumière de ces résultats, les enfants dyscalculiques semblent donc présenter un déficit à traiter des représentations numériques présentées analogiquement, mais ce déficit reste à être caractérisé plus précisément. La suite de la section s'intéresse à la précision des représentations numériques mise en évidence par plusieurs mesures dans les études.

Tableau 2. Résumé des études portant sur le Système Numérique Approximatif dans la dyscalculie développementale.

Table 2. Summary of studies about the Approximate Numerical System in developmental dyscalculia.

	Age	Langue	Nombres d'enfants	Tâche	Taille des quantités	Justesse de la réponse	Temps de réponse
Desoete, Ceulemans, De Weerd, et al. (2012)	5-6	Néerlandais	16 DC 315 Contrôles	Comparaison non symbolique	2 à 240	Moins précis	/
Landerl et Kölle (2009)	7-10	Allemand	51 DC 262 Contrôles	Comparaison non symbolique	1 à 9	Aussi précis	Plus lents
Mejias, Mussolin, Rousselle, et al. (2011)	9-10	Français (Belgique)	23 DC 23 Contrôles	Comparaison non symbolique Estimation	1 à 254	Moins précis	/
Ferreira, Wood, Pinheiro-Chagas, et al. (2012)	10-11	Portugais	53 DC 89 Contrôles	Comparaison non symbolique	1 à 9	Moins précis	Aussi rapides
Mazzocco, Feigenson, Halberda (2011)	14-15	Anglais	20 DC 43 Contrôles	Comparaison non symbolique Estimation	5 à 16	Moins précis	/

DC: dyscalculiques

Tout d'abord, quelques études portent sur l'acuité numérique, une mesure qui reflète la précision des représentations numériques, autrement dit la capacité à comparer deux collections numériques plus ou moins proches. Le Tableau 3 résume l'ensemble des études traitant de l'acuité numérique chez l'enfant dyscalculique. Mazzocco et al. (2011) étudient l'acuité numérique d'adolescents dyscalculiques de 14-15 ans à l'aide d'une tâche de comparaison de deux ensembles de points dans lesquels le ratio (i.e., le rapport) entre les collections de points est manipulé : ratio  $1/2$ , ratio  $3/4$ , ratio  $5/6$ , ratio  $7/8$  (par exemple, comparer les quantités 2 et 4 correspond à un ratio  $1/2$  ; comparer les quantités 9 et 12 correspond à un ratio  $3/4$ ). Les résultats montrent que les adolescents dyscalculiques ont une acuité numérique moins précise que leurs pairs contrôles. Ces adolescents dyscalculiques parviennent à comparer uniquement des collections dont le ratio est élevé, alors que les adolescents contrôles réussissent tout aussi bien à comparer des collections dont le ratio est plus faible, ce qui suggère que l'acuité numérique est insuffisante pour les adolescents dyscalculiques. De même, Piazza et al. (2010) montrent que des enfants dyscalculiques âgés de 10 ans présentent une précision numérique comparable à celle observée chez les enfants de 5 ans. Ce dernier résultat suggère qu'il ne s'agit donc pas d'une déviance des représentations numériques, mais davantage d'un retard de développement de ces représentations. Ces mêmes auteurs (Piazza et al., 2010) réalisent également une étude transversale avec des enfants de maternelle, des enfants d'âge scolaire de 10 ans et des adultes dans le but d'étudier le développement de l'acuité numérique et montrent en effet que l'acuité numérique s'améliore avec l'âge : plus l'âge augmente, plus les enfants sont capables de comparer des collections dont le ratio est faible pour obtenir une performance la plus précise à l'âge adulte. Cela suggère bien que la précision du système des représentations numériques se perfectionne au fil des années. Il semble donc que la mise en place des représentations numériques se fasse plus lentement chez les enfants dyscalculiques.

**Tableau 3. Résumé des études portant sur la précision du Système Numérique Approximatif dans la dyscalculie développementale**

**Table 3. Summary of studies about the precision of the Approximate Numerical System in developmental dyscalculia**

	Age	Langue	Nombres d'enfants	Tâche	Taille des quantités	Justesse de la réponse	Temps de réponse
Mazzocco, Feigenson, Halberda (2011)	14-15	Anglais	20 DC 43 Contrôles	Comparaison non symbolique	5 à 16	Acuité moyenne des DC = 0.39 ; des Contrôles = 0.26	/
Piazza et al. (2010)	11-13	Italien	23 DC 23 Contrôles	Comparaison non symbolique	12 à 40	Acuité moyenne des DC = 0.34 ; des Contrôles = 0.25	/
Geary et al. (2008)	6-8	Anglais	19 DC 50 Contrôles	Ligne numérique	0 à 100	Plus grande distance à la réponse pour les DC. Représentations logarithmique pour DC, linéaire pour Contrôles.	/
Landerl, Fussenegger, Moll, & Willburger (2009)	9-10	Allemand	20 DC 42 Contrôles	Ligne numérique	0 à 100 0 à 1000	Pour 0-100, représentations linéaires pour DC et Contrôles. Pour 0-1000, représentations logarithmique pour DC, linéaire pour Contrôles.	/
Andersson et Östergren (2012)	10-12	Suédois	20 DC 43 Contrôles	Ligne numérique	0 à 1000	Représentations moins linéaires pour DC que Contrôles.	/
Mejias et al. (2011)	9-10	Français (Belgique)	23 DC 23 Contrôles	Comparaison non symbolique	1 à 254	Même effet de taille pour les DC et Contrôles.	/
Ashkenazi, Mark-Zigdon, Henik (2009)	9-10	Hébreu	13 DC 16 Contrôles	Comparaison symbolique	1 à 99	DC et Contrôles influencés par effet de taille de la même manière pour 10-99.	DC plus influencé par effet de taille que Contrôles pour 10-99.
Landerl, Fussenegger, Moll, et al. (2009)	9-10	Allemand	20 DC 42 Contrôles	Comparaison symbolique Comparaison non symbolique	1 à 98 20 à 72	/ /	Effet de taille plus marqué pour DC. /
Landerl, Fussenegger, Moll, et al. (2009)	9-10	Allemand	20 DC 42 Contrôles	Comparaison symbolique Comparaison non symbolique	1 à 98 20 à 72	/ /	Même effet de distance pour les DC et Contrôles.
Mussolin, De Volder, Grandin (2009)	10-11	Français belge	15 DC 15 Contrôles	Comparaison symbolique	1 à 9	Même effet de distance pour les DC et Contrôles.	Même effet de distance pour les DC et Contrôles.
Mussolin, Mejias & Noël (2010)	10-11	Français belge	15 DC 15 Contrôles	Comparaison symbolique	1 à 9	Effet de distance plus fort pour DC.	Effet de distance plus fort pour DC.

Ashkenazi, Mark-Zigdon, Henik (2009)	9-10	Hébreu	13 DC 16 Contrôles	Comparaison non symbolique  Comparaison symbolique	1 à 99	Effet de distance pour DC, pas pour Contrôles, pour 1-9.	Même effet de distance pour DC et Contrôles pour 1-9. DC plus influencé par effet de distance que Contrôles pour 10-99.
Price, Holloway, Räsänen, et al. (2007)	11	Anglais	8 DC 8 Contrôles	Comparaison non symbolique	1 à 9	Effet de distance plus fort pour les DC.	Même effet de distance pour DC et Contrôles.

DC: dyscalculiques

D'autres études se sont également intéressées à la précision des représentations numériques en évaluant les habiletés à placer des nombres sur une ligne numérique allant des petites quantités à gauche aux grandes quantités à droite. Comme suggéré par le modèle du Triple code (Dehaene, 1992), la ligne numérique mentale s'étend de gauche à droite de moins en moins précisément. Les représentations numériques mentales obéissent ainsi à la loi de Weber-Fechner (Feigenson et al., 2004) qui correspond à une compression logarithmique des représentations numériques mentales lorsque les quantités réelles augmentent. D'une part, celles des enfants ne sont pas identiques à celles des adultes. En effet, elles sont d'abord très imprécises : cela se traduit par des représentations s'inscrivant dans une fonction logarithmique. Ensuite, elles deviennent de plus en plus fines, ce qui se traduit par des représentations s'inscrivant davantage dans une fonction linéaire (Geary, Hoard, Nugent, & Byrd-Craven, 2008 ; Opfer & Siegler, 2007). Les études montrent effectivement que les représentations numériques se précisent avec l'âge. Chez les enfants de maternelle, les représentations de 0 à 100 s'inscrivent dans une fonction logarithmique, alors qu'à partir de 6-7 ans jusqu'à 8-9 ans, elles s'inscrivent de plus en plus dans une fonction linéaire (Booth & Siegler, 2006 ; Geary et al., 2008). Les représentations de 0 à 1000 mettent davantage de temps à se préciser : les enfants de 7-8 ans ont des représentations numériques s'inscrivant dans une fonction logarithmique, alors qu'à partir de 9-10 ans jusqu'à l'âge adulte, elles deviennent plus précises et s'inscrivent davantage dans une fonction linéaire (Booth & Siegler, 2006 ; Opfer & Siegler, 2007). D'autre part, l'intégrité de cette ligne numérique mentale a été étudiée chez les enfants dyscalculiques afin de documenter la mise en place des représentations numériques. Ainsi, plusieurs études montrent que les enfants dyscalculiques sont en difficultés pour placer des nombres sur une ligne numérique de 0 à 100 et de 0 à 1000. Les enfants dyscalculiques de 6 à 10 ans (Geary et al., 2008 ; Landerl, Fussenegger, Moll, & Willburger, 2009) ont des représentations numériques décrivant une fonction logarithmique alors que leurs pairs contrôles ont déjà des représentations numériques décrivant une fonction linéaire. De même, selon une étude de Andersson et Östergren (2012), les enfants dyscalculiques de 10-12 ans ont des représentations numériques moins linéaires que celles de leurs pairs contrôles. Les représentations numériques des enfants dyscalculiques, apparaissant moins précises, pourraient correspondre à des représentations numériques immatures, similaires à celles d'enfants plus jeunes. Il semble donc que la mise en place des représentations numériques précises soit plus lente chez les enfants dyscalculiques. Il reste à préciser quel est l'ampleur du retard de développement et si les enfants dyscalculiques rattrapent le niveau de précision des représentations numériques mentales de leurs pairs contrôles. Pour cela, une étude longitudinale semblerait très appropriée pour étudier les trajectoires de développement des représentations numériques mentales des enfants dyscalculiques et de leurs pairs contrôles.

Enfin, de cette loi de Weber-Fechner (Feigenson et al., 2004) découlent deux effets principaux : l'effet de taille selon lequel, il est plus facile de comparer des petites que des grandes quantités (ex : 4 vs 8 est plus facile

que 32 vs 36) ; et l'effet de distance, selon lequel il est plus facile de comparer des quantités éloignées que des quantités proches (ex : 2 vs 9 est plus facile que 2 vs 4). À ce jour, trois études ont étudié l'effet de taille chez les enfants dyscalculiques. Mejias et al. (2011) montrent que des enfants dyscalculiques de 9-10 ans, tout comme leurs pairs contrôles, sont influencés par la taille des collections à estimer, bien qu'ils présentent des performances inférieures aux enfants contrôles dans une tâche de comparaison de nombres présentés non symboliquement. Landerl et al. (2009) montrent cependant que l'effet de taille est plus marqué chez des enfants dyscalculiques de 9-10 ans que chez leurs pairs contrôles dans une tâche de comparaison de nombres arabes et de nombres non symboliques. De même, Ashkenazi, Mark-Zigdon, et Henik (2009) montrent que des enfants dyscalculiques de 9-10 ans sont plus influencés par l'effet de taille que leurs pairs contrôles dans une tâche de comparaison de nombres arabes à deux chiffres, un résultat qui pourrait toutefois être expliqué par une différence dans le format de présentation (symbolique vs. non symbolique) et la taille des quantités, ainsi que la variable mesurée (temps ou erreur).

Tout comme les adultes, les enfants, à 5 ans déjà, sont affectés par un effet de distance (Gilmore, McCarthy, & Spelke, 2007). Relativement à cet effet, les études sont un peu plus nombreuses, mais aucun consensus n'est établi. Certaines études avancent que les enfants dyscalculiques sont sensibles à l'effet de distance entre deux nombres à comparer : soit de façon équivalente aux enfants contrôles (Landerl et al., 2009 ; Mussolin et al., 2009 ; Price et al., 2007), soit de manière plus forte (Mussolin, Mejias, & Noël, 2010 ; Price et al., 2007), ce qui traduirait une imprécision de la ligne numérique mentale chez les enfants dyscalculiques. Une étude (Ashkenazi et al., 2009) montre que les enfants dyscalculiques de 9-10 ans et leurs pairs contrôles diffèrent bien plus pour les grandes quantités que pour les petites : en effet, la différence dans l'effet de distance entre les deux groupes est limitée au temps de réponse pour les quantités de 1 à 9, alors qu'il est à la fois observé pour le temps de réponse et le nombre d'erreurs pour les quantités de 10 à 99.

L'ensemble de ces études comportementales semblent ainsi suggérer un déficit du sens du nombre ou du module nombre chez les enfants dyscalculiques, qui se manifeste par des difficultés de subitizing des petites quantités non symboliques et des difficultés à traiter approximativement les grandes quantités non symboliques. Toutefois, des incertitudes persistent quant au traitement des quantités non symboliques et au caractère déviant des représentations numériques. Des études additionnelles portant sur les traitements non symboliques du nombre et sur les représentations numériques mentales sont ainsi nécessaires pour mieux comprendre la nature des représentations numériques des enfants dyscalculiques. En effet, tant au niveau du Système Numérique Précis qu'au niveau du Système Numérique Approximatif, les études ne font pas consensus. Les différences de résultats pourraient s'expliquer par des différences au niveau de l'âge des enfants (par exemple, 5-6 ans dans l'étude de Desoete, Ceulemans, De Weerd, & Pieters, 2012, et 14-15 ans dans l'étude de Mazzocco et al., 2011), de la taille des quantités manipulées (par exemple, quantités 2 à 240

dans l'étude de Desoete, Ceulemans, De Weerdt, & Pieters, 2012, et seulement 5 à 16 dans l'étude de Mazzocco et al., 2011), des tâches utilisées (par exemple, une tâche de comparaison dans l'étude de Landerl et Kölle, 2009, et une tâche d'estimation dans l'étude de Mejias et al., 2011). Il semble ainsi nécessaire de proposer des études prenant en compte très distinctement le Système Numérique Précis et le Système Numérique Approximatif, tout en contrôlant un ensemble de processus et de tâches distinctes tels que la reconnaissance, la production ou la comparaison de quantités.

## **Études en neuroimagerie**

L'ensemble de ces études comportementales semblent ainsi suggérer un déficit du sens du nombre ou du module nombre chez les enfants dyscalculiques. Les études en imagerie cérébrale permettent ainsi d'appréhender les corrélats neuronaux des processus cognitifs numériques. Le Tableau 4 résume l'ensemble des études d'imagerie cérébrale menées chez l'enfant dyscalculique. Les études en imagerie cérébrale portant sur le traitement numérique chez les enfants dyscalculiques montrent des anomalies cérébrales au niveau des aires communément dédiées au traitement du nombre, à savoir des anomalies structurelles et/ou fonctionnelles dans le lobe pariétal, et plus particulièrement le sulcus intrapariétal. Relativement aux anomalies structurelles, une étude en imagerie par résonance magnétique (IRM) (Rotzer et al., 2008) montre une quantité moindre de matière grise dans le sulcus intrapariétal droit chez des enfants dyscalculiques de 9 ans 3 mois. Relativement aux anomalies fonctionnelles, une étude en imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) (Price, Holloway, Räsänen, Vesterinen, & Ansari, 2007) met en évidence un déficit d'activation du sulcus intrapariétal dans des tâches numériques, et plus particulièrement dans une tâche de comparaison d'ensembles de points chez des enfants dyscalculiques de 11-12 ans, comparativement à leurs pairs contrôles : ce déficit est d'autant plus important que la distance numérique entre les deux ensembles de points à comparer est grande. D'ailleurs, Price et al. (2007) montrent dans une étude comportementale que, comparativement à leurs pairs contrôles, les enfants dyscalculiques présentent un effet de distance plus marqué que leurs pairs contrôles dans une tâche de comparaison de quantités présentées non symboliquement (i.e., ensembles de points). Dans une étude en IRMf, (Kucian et al., 2011) tentent d'objectiver l'effet d'un entraînement aux représentations numériques sur les compétences mathématiques et sur les patrons d'activation neuronale dans les régions cérébrales dédiées spécifiquement au nombre, chez des enfants dyscalculiques et des enfants contrôles de 8 à 10 ans. Dans les mesures pré-entraînement, ces enfants dyscalculiques présentent un score plus faible que leurs pairs contrôles à un test standardisé en mathématiques et dans une tâche expérimentale pour laquelle ils doivent décider si trois nombres arabes de 1 à 9 suivent un ordre (croissant ou décroissant) ou non, et une plus faible activation des aires pariétales bilatérales (en particulier au niveau du sulcus intrapariétal bilatéral, du gyrus cingulaire et du lobe pariétal supérieur), suggérant une dysfonction dans ces aires dédiées aux processus numériques. L'entraînement,

d'une durée de 15 minutes par jour pendant 5 jours, consiste à placer sur une ligne numérique de 0 à 100 différentes valeurs numériques, soit des nombres présentés en code arabe, le résultat d'additions et de soustractions, et l'estimation d'ensembles de points. Après cet entraînement, les enfants dyscalculiques restent moins performants que leurs pairs contrôles, mais les deux groupes s'améliorent au test standardisé en mathématiques. Parallèlement à cette amélioration, les auteurs observent une diminution du recrutement des aires cérébrales pariétales bilatérales chez les deux groupes, d'autant plus forte chez les enfants dyscalculiques, suggérant que l'entraînement soit responsable de l'automatisation des processus numériques. Ces études appuient donc l'hypothèse d'un dysfonctionnement cérébral initial déviant chez les enfants dyscalculiques qui bénéficient cependant d'un entraînement spécifique aux représentations numériques. De plus, Mussolin et al. (2009) mettent en évidence, chez des enfants dyscalculiques de 10-11 ans, une faible activation des aires dédiées aux représentations numériques. De manière très intéressante, ces auteurs montrent aussi que les sulcus intrapariétaux droit et gauche ne sont modulés par la distance numérique que chez les enfants contrôles lors d'une tâche de comparaison de nombres en code arabe. Une étude en IRMf (Price, Mazzocco, & Ansari, 2013) porte sur le lien entre l'activation cérébrale observée pendant l'exécution de tâches arithmétiques simples et de tâches d'associations de nombres en code arabe et analogique, et les habiletés mathématiques chez des adolescents de 15-17 ans. Au contraire des études antérieures, ces auteurs montrent que la performance des adolescents dans les tâches numériques est corrélée négativement à l'activation du sulcus intrapariétal, et corrélée positivement à l'activation des gyri supramarginal gauche et cingulaire antérieur. Chez l'adulte, le lobe pariétal inférieur gauche, incluant le gyrus supramarginal et le cortex cingulaire antérieur, est recruté dans le processus de récupération directe en mémoire des faits arithmétiques, alors que le sulcus intrapariétal est impliqué dans le processus de manipulation des quantités. Les résultats de cette étude suggèrent donc que les adolescents dont les performances sont bonnes en arithmétique engagent des mécanismes impliqués dans la récupération en mémoire, alors que les adolescents faibles en arithmétique engagent davantage des mécanismes impliqués dans la quantité et les procédures de calcul. Les études en imagerie cérébrale permettent ainsi de mettre en évidence un dysfonctionnement au niveau des aires spécifiquement dédiées au traitement du nombre chez les sujets dyscalculiques.

Tableau 4. Résumé des études portant sur les corrélats neuronaux de la dyscalculie développementale

Table 4. Summary of studies about neural correlates in developmental dyscalculia

	Age	Langues	Nombres d'enfants	Techniques d'imagerie cérébrale	Tâches	Résultats
Rotzer, Kucian, Martin, <i>et al.</i> (2008)	9	Français	12 DC	IRM	/	Moins de matière grise dans le sulcus intrapariétal droit.
Price, Holloway, Räsänen, <i>et al.</i> (2007)	11	Anglais	8 DC 8 Contrôles	IRMf	Comparaison non symbolique, 1 à 9.	Activation plus faible dans le sulcus intrapariétal.
Kucian, Grond, Rotzer, <i>et al.</i> (2011)	8-10	Français (Belgique)	16 DC 16 Contrôles	IRMf	Décider si 3 nombres arabes suivent un ordre ou non, 1 à 9.	Activation plus faible des aires pariétales bilatérales (sulcus intrapariétal bilatéral, gyrus cingulaire, lobe pariétal supérieur).
Mussolin, De Volder, Grandin, <i>et al.</i> (2009)	10-11	Français (Belgique)	15 DC 15 Contrôles	IRMf	Comparaison symbolique, 1 à 9.	Sulcus intrapariétaux droit et gauche modulés par la distance numérique que chez les contrôles.
Price, Mazzocco, & Ansari (2013)	15-17	Anglais	33 DC	IRMf	Tâches arithmétiques. Associations de nombres en code arabe. Comparaison non symbolique, 5 à 21 ;	Performance mathématique corrélée négativement à l'activation du sulcus intrapariétal droit, et corrélée positivement à l'activation des gyri supramarginal gauche et cingulaire antérieur.

DC: dyscalculiques

## **Conclusion**

Ces dernières années, l'avancée des études comportementales et des études en imagerie cérébrale a permis de poser l'hypothèse de l'existence d'un trouble spécifique du traitement du nombre à l'origine de la dyscalculie. Les études comportementales sont effectivement en accord avec l'hypothèse d'un déficit du sens du nombre ou du module nombre, qui se manifeste par des difficultés de subitizing des petites quantités non symboliques et des difficultés à traiter approximativement les grandes quantités non symboliques. Sur le plan neurophysiologique, les études menées en imagerie démontrent la présence chez les enfants dyscalculiques d'un dysfonctionnement du sulcus intrapariétal, structure cérébrale qui sous-tend les représentations numériques et confortent donc l'hypothèse selon laquelle la dyscalculie est causée par un trouble spécifique du nombre. Toutefois, il n'existe aucun consensus quant au caractère déviant des représentations numériques. Les effets de taille et de distance et la précision des représentations numériques des enfants dyscalculiques devront être davantage précisés. Des études additionnelles portant sur les traitements non symboliques du nombre et sur les représentations numériques mentales sont nécessaires pour mieux comprendre la nature des représentations numériques des enfants dyscalculiques. En effet, tant au niveau du Système Numérique Précis qu'au niveau du Système Numérique Approximatif, les études ne font pas consensus. Il semble ainsi nécessaire de proposer des études prenant en compte très distinctement le Système Numérique Précis et le Système Numérique précis, tout en contrôlant un ensemble de processus et de tâches distinctes tels que la reconnaissance, la production et la comparaison de quantités.

La question de l'intégrité des représentations numériques des enfants dyscalculiques et de leurs capacités à traiter les représentations non symboliques des nombres reste encore débattue. La section suivante traite de l'hypothèse d'un déficit d'accès au sens du nombre via les codes symboliques, à savoir des difficultés à accéder au sens des quantités à partir des nombres présentés sous forme orale ou arabe.

## **DÉFICIT DE L'ACCÈS AU SENS DU NOMBRE**

### **Études comportementales**

Si plusieurs études mettent en évidence la présence d'un trouble de la représentation non symbolique du nombre chez les enfants dyscalculiques, d'autres études récentes suggèrent qu'il s'agit davantage d'un trouble de l'accès aux représentations numériques mentales via les représentations numériques symboliques arabes. Le Tableau 5 résume l'ensemble des études traitant de cette habileté d'accès au sens du nombre chez l'enfant dyscalculique. Plusieurs études précédemment décrites semblent d'ailleurs suggérer la présence d'un déficit d'accès aux représentations numériques (Geary et al., 2008 ; Landerl et al., 2009 ; Andersson & Östergren, 2012). Dans ces études, l'enfant doit placer un nombre présenté symboliquement (i.e., nombres

arabes) sur une ligne numérique allant de 0 à 100 ; l'étude de Andersson et Östergren (2012) montre par exemple que les enfants dyscalculiques de 10-12 ans ont des représentations numériques moins précises que celles de leurs pairs contrôles. En 2007, Rousselle et Noël (2007) montrent pour la première fois qu'un groupe d'enfants dyscalculiques de 7-8 ans présente, certes, des difficultés à comparer des chiffres arabes, mais qu'ils obtiennent les mêmes performances que leurs pairs contrôles pour comparer des ensembles de points. Très récemment, Andersson et Östergren (2012) montrent que les enfants dyscalculiques de 10-12 ans sont aussi performants que leurs pairs contrôles dans une tâche de comparaison de 2 à 8 points ; mais, ils sont en difficultés, précisément plus lents que leurs pairs contrôles, en comparaison de nombres arabes (à un ou deux chiffres). Ces études viennent ainsi questionner l'hypothèse du déficit du sens du nombre et suggèrent qu'il s'agirait davantage d'un déficit d'accès aux représentations numériques. Dans une étude, De Smedt et Gilmore (2011) montrent que des jeunes enfants dyscalculiques âgés de 6 ans 8 mois échouent dans le traitement de nombres symboliques (comparaisons, additions, soustractions), mais qu'ils réussissent aussi bien que leurs pairs contrôles à des tâches impliquant le traitement de nombres non symboliques. Les enfants dyscalculiques de 7-8 ans sont plus faibles que leurs pairs contrôles dans des tâches de comparaison symbolique de nombres (arabes et verbaux), mais tous ont les mêmes habiletés à comparer des nombres présentés non symboliquement (Desoete et al., 2012). De manière intéressante, cette étude montre que les enfants dyscalculiques de 5-6 ans étaient moins performants que leurs pairs contrôles pour comparer des nombres présentés analogiquement, alors qu'ils ne diffèrent plus à 7-8 ans. Il semblerait donc que les jeunes enfants dyscalculiques aient des difficultés à traiter les nombres symboliques et non symboliques et que seules persistent des difficultés de traitement des nombres symboliques ensuite. Considérant que le système symbolique se greffe sur le système non symbolique (voir Feigenson, Libertus, & Halberda (2013) pour une revue), ce résultat suggère que le dysfonctionnement initial du système non symbolique, à l'origine du dysfonctionnement observé ultérieurement au niveau du système symbolique, se résorbe progressivement au cours du temps. Toutefois, l'étude menée par luculano, Tang, Hall, et Butterworth (2008) auprès de deux enfants dyscalculiques de 8-9 ans démontre l'existence de différence dans la nature sous-jacente des troubles du calcul. Le premier de ces enfants présente à la fois des difficultés de traitement non symbolique et symbolique du nombre et semble donc présenter un déficit des représentations numériques elles-mêmes. Le second présente en revanche de bonnes compétences dans des tâches de comparaisons, additions et soustractions non symboliques, mais des difficultés dans des tâches d'additions symboliques exactes, un comportement explicable par l'existence d'un déficit d'accès à des représentations numériques intégrées. C'est à un constat similaire que parviennent Chan, Au, et Tang (2013) dans une étude dans laquelle ils mettent en évidence la présence de troubles cognitifs distincts chez des enfants dyscalculiques chinois de 6-7 ans : un groupe d'enfants présente un déficit du sens du nombre (difficultés à effectuer des tâches numériques non symboliques) alors que les enfants de l'autre groupe présentent plutôt un déficit dans les tâches numériques

symboliques. Ces deux dernières études suggèrent ainsi des origines fonctionnelles différentes des troubles du calcul.

Tableau 5. Résumé des études portant sur l'accès au Système Numérique Approximatif dans la dyscalculie développementale

Table 5. Summary of studies about the access to the Approximate Numerical System in developmental dyscalculia

	Age	Langues	Nombre	Tâche	Taille des quantités	Justesse de la réponse	Temps
Desoete, Ceulemans, De Weerd, Pieters (2012)	5-6 7-8	Néerlandais (Belgique)	16 DC 315 Contrôles	Comparaison symbolique Comparaison non symbolique	2 à 420 1 à 15	Moins précis. Moins précis à 5-6 ans, aussi précis à 7-8 ans.	/ /
Chan, Au, & Tang (2013)	6-7	Chinois	28 DC 37 Contrôles	Tâches symboliques : Comparaison, Addition Tâches non symboliques : Groupement par 10, Addition.	1 à 9 Non précisé	Moins précis. Aussi précis.	/ /
Rousselle et Noël (2007)	7-8	Français	29 DC 45 Contrôles	Comparaison symbolique Comparaison non symbolique	1 à 9 6 à 28	Moins précis. Aussi précis.	Plus lents. Aussi rapides.
Iuculano, Tang, Hall <i>et al.</i> (2008)	8-9	Anglais	2 DC 23 Contrôles	Comparaison symbolique Comparaison non symbolique	1 à 9	DC1 : Moins efficient en symbolique, aussi efficient en non symbolique. DC2 : Moins efficient en symbolique et non symbolique.	Plus lents.
De Smedt et Gilmore (2011)	10-11	Néerlandais (Belgique)	20 DC 41 Contrôles	Comparaison symbolique Comparaison non symbolique	1 à 9	Aussi précis.	Plus lents. Aussi rapides.
Andersson et Östergen (2012)	10-12	Suédois	20 DC 43 Contrôles	Comparaison symbolique Comparaison non symbolique	1 à 9 et 21 à 36 2 à 8	/ /	Plus lents. Aussi rapides.

DC: dyscalculiques

Des études supplémentaires sont toutefois nécessaires pour préciser davantage les habiletés des enfants dyscalculiques à traiter le nombre dans un format symbolique (arabe et oral) et non symbolique.

## CONCLUSION

Les définitions cliniques (DSM-V) de la dyscalculie ne permettent pas de déterminer les troubles cognitifs à l'origine de ce trouble handicapant pour l'enfant et sa vie scolaire, quotidienne, sociale et professionnelle future. Les causes de ce trouble d'apprentissage restent encore à préciser. Actuellement, deux hypothèses cognitives concernant les déficits numériques sont en débat quant à l'origine cognitive spécifiquement numérique sous-jacente de la dyscalculie. L'hypothèse d'un déficit du sens du nombre suggère que la dyscalculie résulte d'un déficit du traitement des représentations non symboliques du nombre et d'une altération des représentations numériques mentales. À cet égard, les études montrent que certains enfants dyscalculiques ont des difficultés à *subitiser* des petites collections de points, que d'autres ont des difficultés à comparer des grandes collections non symboliques et une acuité numérique plus faible. En revanche, l'hypothèse d'un déficit d'accès aux représentations numériques mentales via les codes symboliques explique la dyscalculie davantage par la présence de difficultés à accéder au sens des quantités à partir des nombres présentés symboliquement sous forme arabe. Cette hypothèse est notamment soutenue par des études qui montrent que certains enfants dyscalculiques parviennent très bien à comparer les quantités présentées non symboliquement mais présentent des difficultés à comparer les quantités présentées en code arabe. Ainsi, il pourrait donc être envisageable de considérer la dyscalculie primaire, non pas comme le résultat d'une unique cause cognitive numérique (hypothèse d'un déficit du sens du nombre ou d'un déficit d'accès aux représentations numériques mentales) mais davantage comme un trouble résultant de deux origines cognitives numériques possibles. La mise en évidence de deux causes cognitives différentes à la dyscalculie suggère effectivement l'existence, non pas d'un profil d'enfants dyscalculiques, mais de deux types de dyscalculie primaire : une dyscalculie analogique et une dyscalculie symbolique.

Répondre à la question des troubles cognitifs numériques responsables de la dyscalculie a des implications non seulement théoriques, mais également cliniques. En effet, comprendre les troubles cognitifs numériques des enfants dyscalculiques permettrait de faciliter le diagnostic différentiel entre un enfant dyscalculique et un enfant en retard scolaire mathématique et d'adapter au mieux la rééducation des enfants dyscalculiques. Ainsi l'évaluation d'un enfant en difficultés mathématiques devrait comporter plusieurs parties. Tout d'abord, l'entretien d'anamnèse conduit en début d'évaluation devrait conduire le professionnel à identifier la plainte de l'enfant et de sa famille, les répercussions scolaires et quotidiennes des difficultés mathématiques. Ensuite, parce que la dyscalculie est d'abord décrite comme un trouble du développement mathématique, l'évaluation des capacités mathématiques générales aurait pour but d'objectiver les difficultés scolaires mathématiques

rencontrées à l'aide d'outils standardisés (par exemple : Zareki-R (Dellatolas & Von Aster, 2006) pour les enfants de 6 à 11 ans ; Tedi-Maths (Van Nieuwenhoven, Grégoire, & Noël, 2001) pour les enfants de 5 à 8 ans ; KeyMaths-3 (Connolly, 2008) pour les enfants et adolescents de 4 ans et demi à 18 ans). Enfin, cette présente revue mettant en évidence deux types de profils de dyscalculie primaire (un déficit cognitif numérique du sens du nombre et/ou un déficit de l'accès au sens du nombre via les codes symboliques numériques arabes), il conviendrait d'intégrer, dans une démarche diagnostique, la recherche de la présence ou l'absence de ce type de déficit dans l'évaluation des habiletés mathématiques, ce qu'aucun des tests susmentionnés ne fait. En effet, l'évaluation des habiletés numériques de base, et plus particulièrement du traitement des codes numériques analogiques (et plus précisément du Système Numérique Précis et du Système Numérique Approximatif) et des codes numériques arabe et oral, et de leurs liens aux représentations numériques mentales, est indispensable pour identifier la présence d'un trouble cognitif numérique et envisager le diagnostic de dyscalculie. Cette évaluation approfondie pourrait comporter des épreuves telles que la comparaison de nombres arabes, de nombres oraux, mais aussi de petits et de grands ensembles de points pour envisager l'ensemble des traitements des codes numériques. De plus, des tâches de placement de nombres oraux, arabes, et analogiques sur une ligne numérique permettraient d'envisager l'évaluation des représentations numériques et de leur degré de précision. Intégrer les épreuves des études précédemment décrites dans ce présent article permettrait donc l'évaluation des divers systèmes numériques et l'identification d'un déficit cognitif numérique, de faciliter ainsi le diagnostic différentiel entre un enfant dyscalculique et un enfant en retard scolaire mathématique et, dans un but ultime, d'adapter au mieux la rééducation des enfants dyscalculiques.

Bien que cette présente revue mette en évidence la présence de plusieurs profils de dyscalculies primaires, aucun consensus, à ce jour, ne peut être clairement établi quant à l'origine de la dyscalculie. Plusieurs perspectives de recherche peuvent alors être développées et plusieurs questions sont mises en relief. Tout d'abord, il semble inévitable de poursuivre les études relatives au traitement des représentations analogiques chez les enfants dyscalculiques, en prenant bien le soin de différencier le traitement des petites quantités (référant au Système Numérique Précis) et les grandes quantités (référant au Système Numérique Approximatif), ainsi que les études relatives au traitement des quantités présentées symboliquement en code arabe, et aux relations entre les deux codes numériques décrits. Il semble primordial également d'explorer divers processus numériques autres que la comparaison de nombres tels que la reconnaissance de nombres, le jugement d'adéquation entre deux quantités présentées dans deux codes différents, la production de quantités, etc. De plus, aucune donnée relative au traitement des quantités présentées symboliquement en code oral par les enfants dyscalculiques n'a été mise en exergue ; il convient donc d'identifier s'il existe également un profil d'enfants dyscalculiques présentant un déficit d'accès au sens du nombre, c'est-à-dire aux représentations numériques mentales, lorsque les nombres sont présentés oralement. Dans la mesure où

plusieurs profils de dyscalculie pourraient être mis en évidence, il reste alors primordial de répondre à la question du profil mathématique spécifique à chaque déficit cognitif numérique et chaque profil dyscalculique ; pour cela, il semble tout à fait indispensable d'intégrer dorénavant dans les études, non pas seulement un unique groupe d'enfants dyscalculiques, mais plusieurs groupes dont le profil cognitif numérique est précisé. Plusieurs axes de recherche se profilent donc pour tenter de répondre à ces importantes questions. Sont donc à envisager des études exploratoires et systématiques visant à évaluer les systèmes numériques analogiques et symboliques, les relations qu'ils entretiennent, au fil du développement avant, en début et en cours d'apprentissage formel des mathématiques et leur implication dans les apprentissages arithmétiques et mathématiques plus généralement.

## Références

- American Psychiatric Association (2003). *Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux, texte révisé (DSM-4-TR)*. Paris, France : Elsevier Masson.
- American Psychiatric Association (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-5)*. Arlington, VA: APA.
- Andersson, U., & Östergren, R. (2012). Number magnitude processing and basic cognitive functions in children with mathematical learning disabilities. *Learning and Individual Differences*, 22(6), 701–714. doi:10.1016/j.lindif.2012.05.004
- Ashkenazi, S., Mark-Zigdon, N., & Henik, A. (2009). Numerical distance effect in developmental dyscalculia. *Cognitive Development*, 24(4), 387–400. doi:10.1016/j.cogdev.2009.09.006
- Ashkenazi, S., Mark-Zigdon, N., & Henik, A. (2013). Do subitizing deficits in developmental dyscalculia involve pattern recognition weakness? *Developmental Science*, 16(1), 35–46. doi:10.1111/j.1467-7687.2012.01190.x
- Badian, N. (1999). Persistent Arithmetic, Reading, or Arithmetic and Reading Disability. *Annals of Dyslexia*, 49, 45–70.
- Barbarese, W. J., Katusic, S. K., Colligan, R. C., Weaver, A. L., & Jacobsen, S. J. (2005). Math learning disorder: incidence in a population-based birth cohort, 1976-82, Rochester, Minn. *Ambulatory Pediatrics: The Official Journal of the Ambulatory Pediatric Association*, 5(5), 281–9. doi:10.1367/A04-209R.1
- Booth, J. L., & Siegler, R. S. (2006). Developmental and individual differences in pure numerical estimation. *Developmental Psychology*, 42(1), 189–201. doi:10.1037/0012-1649.41.6.189
- Butterworth, B. (1999). *The mathematical brain*. London: MacMillan.
- Chan, W. W. L., Au, T. K., & Tang, J. (2013). Developmental dyscalculia and low numeracy in Chinese children. *Research in Developmental Disabilities*, 34(5), 1613–1622. doi:10.1016/j.ridd.2013.01.030
- Connolly, A. J. (2008). *Test KeyMath 3 Diagnostic assessment – Edition canadienne*. San Antonio: Pearson.

- De Smedt, B., & Gilmore, C. K. (2011). Defective number module or impaired access? Numerical magnitude processing in first graders with mathematical difficulties. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(2), 278–92. doi:10.1016/j.jecp.2010.09.003
- Dehaene, S. (1992). *Varieties of numerical abilities*. *Cognition*, 44, 1–42.
- Dellatolas, G., & Von Aster, M. (2006). *Zareki-R, Batterie pour l'évaluation du traitement des nombres et du calcul chez l'enfant*. Paris : ECPA.
- Desoete, A., Ceulemans, A., De Weerd, F., & Pieters, S. (2012). Can we predict mathematical learning disabilities from symbolic and non-symbolic comparison tasks in kindergarten? Findings from a longitudinal study. *Issue British Journal of Educational Psychology*, 82(1), 64–81.
- Desoete, A., & Grégoire, J. (2006). Numerical competence in young children and in children with mathematics learning disabilities. *Learning and Individual Differences*, 16(4), 351–367. doi:10.1016/j.lindif.2006.12.006
- Devine, A., Soltész, F., Nobes, A., Goswami, U., & Szűcs, D. (2013). Gender differences in developmental dyscalculia depend on diagnostic criteria. *Learning and Instruction*, 27, 31–39. doi:10.1016/j.learninstruc.2013.02.004
- Dirks, E., Spyer, G., van Lieshout, E. C. D. M., & de Sonneville, L. (2008). Prevalence of combined reading and arithmetic disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 41(5), 460–73. doi:10.1177/0022219408321128
- Fayol, M., Perros, H., & Seron, X. (2004). Les représentations numériques : caractéristiques, troubles et développement. In M. Metz-Lutz, E. Demont, C. Seegmuller, M. De Agostini, & N. Bruneau (Eds.), *Développement cognitif et troubles des apprentissages*, pp. 69–107). Marseille : Solal.
- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. S. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307–14. doi:10.1016/j.tics.2004.05.002
- Feigenson, L., Libertus, M. E., & Halberda, J. (2013). Links Between the Intuitive Sense of Number and Formal Mathematics Ability. *Child Development Perspectives*, 1–6. doi:10.1111/cdep.12019
- Ferreira, F., Wood, G., Pinheiro-Chagas, P., Lonnemann, J., Krinzinger, H., Willmes, K., & Haase, V. (2012). Explaining school mathematics performance from symbolic and nonsymbolic magnitude processing: similarities and differences between typical and low-achieving children. *Psychology and Neuroscience*, 5(1), 37–46. doi:10.3922/j.psns.2012.1.06
- Geary, D. C., Hoard, M. K., Nugent, L., & Byrd-craven, J. (2008). Developmental Neuropsychology Development of Number Line Representations in Children With Mathematical Learning Disability. *Memory*, 37–41.
- Gilmore, C. K., McCarthy, S. E., & Spelke, E. S. (2007). Symbolic arithmetic knowledge without instruction. *Nature*, 447(7144), 589–91. doi:10.1038/nature05850
- Gross-Tsur, V., Manor, O., & Shalev, R. S. (1996). Developmental dyscalculia: prevalence and demographic features. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 38(1), 25–33. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8606013>

- Luculano, T., Tang, J., Hall, C. W. B., & Butterworth, B. (2008). Core information processing deficits in developmental dyscalculia and low numeracy. *Developmental Science*, 11(5), 669–80. doi:10.1111/j.1467-7687.2008.00716.x
- Kucian, K., Grond, U., Rotzer, S., Henzi, B., Schönmann, C., Plangger, F., Von Aster, M. (2011). Mental number line training in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage*, 57(3), 782–95. doi:10.1016/j.neuroimage.2011.01.070
- Landerl, K., Fussenegger, B., Moll, K., & Willburger, E. (2009). Dyslexia and dyscalculia: two learning disorders with different cognitive profiles. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(3), 309–24. doi:10.1016/j.jecp.2009.03.006
- Landerl, K., & Kölle, C. (2009). Typical and atypical development of basic numerical skills in elementary school. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(4), 546–65. doi:10.1016/j.jecp.2008.12.006
- Lewis, C., Hitch, G. J., & Walker, P. (1994). The prevalence of specific arithmetic difficulties and specific reading difficulties in 9- to 10-year-old boys and girls. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 35(2), 283–92. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8188799>
- Mazzocco, M. M. M., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Impaired acuity of the approximate number system underlies mathematical learning disability. *Child Development*, 82(4), 1224–37. doi:10.1111/j.1467-8624.2011.01608.x
- Mejias, S., Mussolin, C., Rousselle, L., Grégoire, J., & Noël, M.-P. (2011). Numerical and nonnumerical estimation in children with and without mathematical learning disabilities. *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence*, 37–41. doi:10.1080/09297049.2011.625355
- Moeller, K., Neuburger, S., Kaufmann, L., Landerl, K., & Nuerk, H.-C. (2009). Basic number processing deficits in developmental dyscalculia: Evidence from eye tracking. *Cognitive Development*, 24(4), 371–386. doi:10.1016/j.cogdev.2009.09.007
- Mussolin, C., Mejias, S., & Noël, M.-P. (2010). Symbolic and nonsymbolic number comparison in children with and without dyscalculia. *Cognition*, 115(1), 10–25. doi:10.1016/j.cognition.2009.10.006
- Mussolin, C., Volder, A. De, Grandin, C., Schlögel, X., Nassogne, M., & Noël, M. (2009). Neural Correlates of Symbolic Number Comparison in Developmental Dyscalculia. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(5), 860–874.
- Opfer, J. E., & Siegler, R. S. (2007). Representational change and children's numerical estimation. *Cognitive Psychology*, 55(3), 169–95. doi:10.1016/j.cogpsych.2006.09.002
- Piazza, M., Facoetti, A., Noemi, A., 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
- Price, G. R., Holloway, I. D., Räsänen, P., Vesterinen, M., & Ansari, D. (2007). Impaired parietal magnitude processing in developmental dyscalculia. *Current Biology*, 17(24), 1042–3. doi:10.1016/j.cub.2007.10.013

- Price, G. R., Mazzocco, M. M. M., & Ansari, D. (2013). Why mental arithmetic counts: brain activation during single digit arithmetic predicts high school math scores. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience*, 33(1), 156–63. doi:10.1523/JNEUROSCI.2936-12.2013
- Rotzer, S., Kucian, K., Martin, E., von Aster, M., Klaver, P., & Loenneker, T. (2008). Optimized voxel-based morphometry in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage*, 39(1), 417–22. doi:10.1016/j.neuroimage.2007.08.045
- Rousselle, L., & Noël, M.-P. (2007). Basic numerical skills in children with mathematics learning disabilities: a comparison of symbolic vs. non-symbolic number magnitude processing. *Cognition*, 102(3), 361–95. doi:10.1016/j.cognition.2006.01.005
- Schleifer, P., & Landerl, K. (2011). Subitizing and counting in typical and atypical development. *Developmental Science*, 2(14), 280–291. doi:10.1111/j.1467-7687.2010.00976.x
- Share, D. L., Moffitt, T. E., & Silva, P. A. (1988). Factors Associated with Arithmetic-and-Reading Disability and Specific Arithmetic Disability. *Journal of Learning Disabilities*, 21(5), 313–320. doi:10.1177/002221948802100515
- Starkey, P., & Cooper, R. G. (1995). The development of subitizing in young children. *British Journal of Developmental Psychology*, 13, 399–420.
- Van Nieuwenhoven, C., Grégoire, J., & Noël, M.-P. (2001). *Tedi-Math Test diagnostique des compétences de base en mathématiques*. Paris: ECPA.
- Wilson, A. J., & Dehaene, S. (2007). Number Sense and Developmental dyscalculia. In D. Coch, G. Dawson, K. W. Fischer, *Human Behavior learning, and the developing brain: atypical development* (pp. 212–238). New-York : Guilford Press.

# Chapitre 3. Méthodologie générale

## 3.1. Participants

Pour cette thèse, soixante-dix-huit enfants francophones québécois âgés entre huit et neuf ans et scolarisés en troisième année de primaire (1<sup>ère</sup> année du 2<sup>e</sup> cycle) ont été recrutés dans onze écoles de la ville de Québec. Aucun ne présentait de troubles sensoriel, physique, neurologique, ou psychiatrique.

La procédure de sélection des enfants et de constitution des groupes s'est effectuée en deux temps. Le premier temps consistait à établir si l'enfant présentait ou non des difficultés mathématiques au quotidien. En effet, la définition de la dyscalculie renvoie à la présence de difficultés affectant le quotidien et la scolarité de l'enfant. Pour cela, l'identification par les enseignants et les orthopédagogues (ou les orthophonistes) des écoles a été choisie. Parmi les enfants, trente-sept (37) ont été initialement identifiés comme ayant un développement mathématique typique alors que trente-neuf (39) d'entre eux ont été identifiés avec des difficultés mathématiques scolaires.

Le second temps de sélection des enfants et de constitution des groupes consistait à administrer à chaque enfant un test mathématique standardisé et normalisé dans le but de confirmer ou d'infirmer le profil de réussite ou d'échec mathématique à l'école. Pour cela, le test Zareki-R (Dellatolas & Von Aster, 2006), un test dédié à l'évaluation du traitement des nombres et du calcul chez l'enfant, a été utilisé pour évaluer précisément le niveau mathématique de chaque enfant. Des normes de références franco-québécoises pour les enfants âgés entre huit et neuf ans et scolarisés en troisième année de primaire (1<sup>ère</sup> année du 2<sup>e</sup> cycle), établies sur la base de la performance de 81 enfants, ont été utilisées (Lafay, St-Pierre, Macoir, sous presse). Le seuil de -1.5 écarts-types a été choisi car il correspond au seuil permettant d'identifier les enfants les 5 % les plus faibles, pourcentage correspondant globalement à la prévalence de la dyscalculie selon la littérature (Badian, 1999 ; Barbaresi, Katusic, Colligan, Weaver, & Jacobsen, 2005 ; Devine, Soltész, Nobes, Goswami, & Szűcs, 2013 ; Dirks, Spyer, van Lieshout, & De Sonneville, 2008 ; Gross-Tsur, Manor, & Shalev, 1996 ; Lewis, Hitch, & Walker, 1994 ; Share, Moffitt, & Silva, 1988). Si l'enfant, préalablement identifié sans difficulté mathématique par l'enseignant, réussissait le test mathématique avec un score situé au-dessus de -1,5 écarts-types par rapport à la moyenne des enfants de son âge et de sa classe, il était intégré au groupe des enfants « sans difficulté mathématique »<sup>1</sup>. Au contraire, mais ce ne fut pas le cas, si l'enfant avait été préalablement identifié sans difficulté mathématique par l'enseignant, mais avait réussi le test mathématique avec un score situé en-dessous de -1,5 écarts-types, il aurait été exclu de l'étude. En effet, bien que présentant des difficultés mathématiques au test, le profil d'un tel enfant ne correspondrait pas à la définition

---

<sup>1</sup> Dans les chapitres 4, 5 et 6 correspondant aux études expérimentales 2, 3 et 4, le groupe des enfants « sans difficulté mathématique » est nommé « children with typical development (TD children) ».

de la dyscalculie puisqu'il ne présenterait pas de plainte à propos de difficultés mathématiques au quotidien. Au total, le groupe des enfants « sans difficulté mathématique » était constitué des trente-sept (37) enfants initialement identifiés comme tel par les enseignants. Si l'enfant était préalablement identifié comme ayant des difficultés mathématiques par l'enseignant et l'orthopédagogue (ou l'orthophoniste), et obtenait un score situé en-dessous de -1,5 écarts-types au Zareki-R, il était intégré au groupe « dyscalculique »<sup>2</sup>. Au contraire, si l'enfant était préalablement identifié avec des difficultés mathématiques par l'enseignant et l'orthopédagogue (ou l'orthophoniste), mais réussissait le test mathématique avec un score situé au-dessus de -1,5 écarts-types, il était exclu de l'étude car ne présentait pas de difficultés mathématiques majeures objectivées (voir Figure 2, la procédure de constitution des groupes). Ainsi, onze (11) enfants initialement identifiés par les enseignants et l'orthopédagogue (ou l'orthophoniste) comme présentant des difficultés mathématiques ont été exclus de l'étude car leur score mathématique se situait au-dessus de -1,5 écarts-types au Zareki-R. Enfin, quatre (4) enfants ont également été exclus parce qu'ils avaient doublé une classe. Au total, le groupe « dyscalculique » était constitué de vingt-quatre (24) enfants.

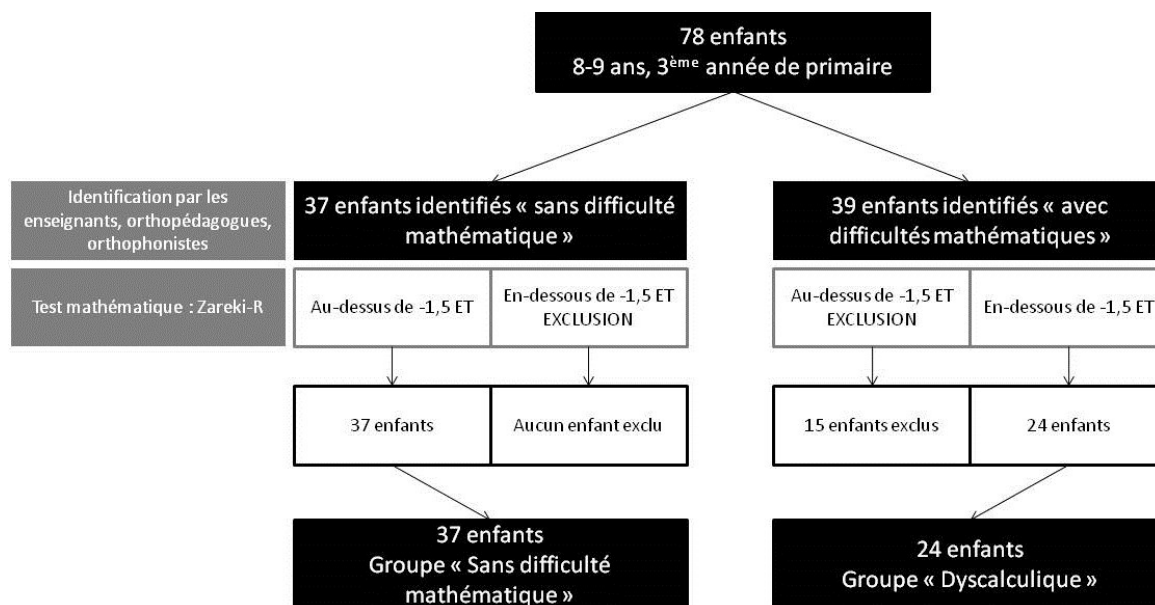


Figure 2. Sélection des participants et constitution des groupes

### 3.2. Protocole expérimental

Tous les enfants ont été évalués individuellement dans une salle calme : soixante-seize (76) dans leur école, un (1) dans le bureau de son orthophoniste et un (1) dans une salle du centre de recherche de l'Institut Universitaire en Santé Mentale de Québec. Les tests ont été réalisés de février à juin de l'année scolaire en

<sup>2</sup> Dans le chapitre 3 correspondant à l'étude expérimentale 2, le groupe « dyscalculique » est nommé « children with mathematic difficulties (children with MD) ». Dans les chapitres 4 et 5 correspondant aux études expérimentales 3 et 4, le groupe « dyscalculique » est nommé « children with developmental dyscalculia (children with DD) ».

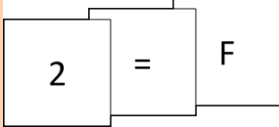

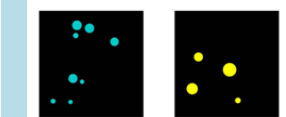


cours pendant trois sessions d'environ quarante-cinq minutes à une heure en présence d'un évaluateur. Les évaluations ont été effectuées par deux expérimentateurs différents à une semaine d'intervalle chacune. La première expérimentatrice était l'auteure de la présente thèse. La seconde expérimentatrice était une étudiante en psychologie qui occupait un poste d'assistante de recherche : elle a reçu une formation de base sur les objectifs du projet, la passation et la cotation des tests standardisés et des tâches expérimentales. Le protocole administré aux enfants consistait en une évaluation cognitive générale et une évaluation cognitive numérique.

L'évaluation cognitive générale comportait une évaluation des habiletés mathématiques générales, de l'intelligence non verbale, de la vitesse de traitement, de la mémoire à court terme et de travail visuospatiale, de la mémoire à court terme et de travail verbale, de la compréhension et production de mots, et de la lecture et de l'écriture de mots écrits, ainsi qu'une évaluation des réactions motrices pour chaque main à l'aide de tâches expérimentales développées dans le cadre du projet doctoral avec le logiciel Dmdx (Forster & Forster, 2003). Cette évaluation avait pour objectif de documenter de manière détaillée le portrait cognitif général de chaque enfant participant à l'étude. Une description plus précise est présentée dans les chapitres suivants, à l'intérieur de chacun des articles.

L'évaluation cognitive numérique comportait dix-neuf tâches expérimentales (cf. Tableau 6) : trois tâches visant à évaluer le traitement du code analogique des nombres (étude 2), cinq tâches visant à évaluer le traitement du code arabe des nombres, cinq tâches visant à évaluer le traitement du code oral des nombres (étude 3), et six tâches visant à évaluer l'intégrité de la ligne numérique et son accès via les codes symboliques (étude 4). Une description plus précise des tâches expérimentales est présentée dans les chapitres suivants.

**Tableau 6. Récapitulatif des tâches expérimentales**

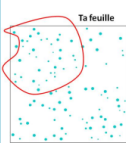
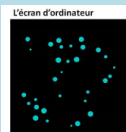
Les cases bleues correspondent à l'étude 2, les cases roses l'étude 3, et les cases jaunes à l'étude 4.

	Analogique	Arabe	Oral
Reconnaissance		 Tâche 6	 Tâche 7
Compréhension Jugement	 Tâche 1	 Tâche 8	 Tâche 14

**Compréhension**  
Comparaison



Tâche 5



Tâche 2

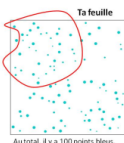
**Production**  
non symbolique

2

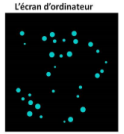
4



Tâche 13

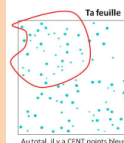


Tâche 10

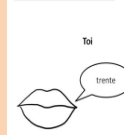


Tâche 9

Tâche 19



Tâche 16



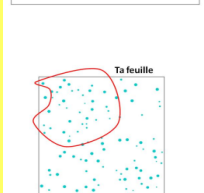
Tâche 15

**Production**  
symbolique

**Ligne**  
numérique  
Nombre-à-  
Position

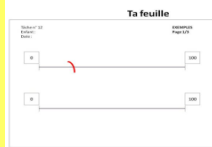


Tâche 4

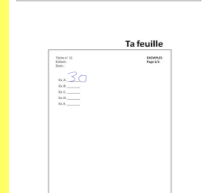


Tâche 3

32

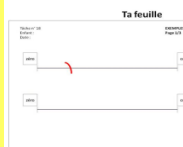


Tâche 12

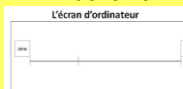


Tâche 11

trente



Tâche 18



Tâche 17

**Ligne**  
numérique  
Position-à-  
Nombre

La première séance d'évaluation comportait l'administration du test visant l'évaluation des habiletés mathématiques générales et les tests d'intelligence non verbale, de vitesse de traitement, de la mémoire à court et de travail visuospatiale et de la mémoire à court terme et de travail verbale. La deuxième séance consistait en l'administration des tests portant sur la compréhension et la production de mots, la lecture et la dictée de mots écrits, des réactions motrices de chaque main, ainsi qu'en l'administration d'une première partie des tâches expérimentales. La seconde partie des tâches expérimentales était administrée lors de la

troisième séance d'évaluation. L'ordre d'administration des tâches expérimentales a été randomisé selon les trois contraintes suivantes : 1) pas plus de deux tâches portant sur le même code numérique (analogique, arabe, oral) ne se suivaient, 2) les tâches de reconnaissance précédaient les autres tâches, 3) les tâches de production précédaient les autres tâches restantes. Dix listes d'ordre randomisé ont ainsi été créées et attribuées aléatoirement aux enfants des deux groupes (Cf. Tableau 7).

**Tableau 7. Listes d'ordre randomisé des tâches expérimentales**

Listes	Ordre des tâches
n°1	T7* ; T6 ; T17 ; T9 ; T10 ; T18 ; T11 ; T3 ; T12 ; T2 ; T15 ; T4 ; T16 ; T1 ; T8 ; T1 ; T19 ; T14 ; T21 ; T5 ; T20
n°2	T6 ; T7 ; T12 ; T4 ; T11 ; T17 ; T18 ; T3 ; T15 ; T2 ; T16 ; T10 ; T9 ; T1 ; T5 ; T21 ; T13 ; T14 ; T8 ; T19 ; T20
n°3	T7 ; T6 ; T18 ; T10 ; T4 ; T16 ; T12 ; T2 ; T3 ; T11 ; T9 ; T17 ; T15 ; T13 ; T5 ; T21 ; T20 ; T8 ; T19 ; T1 ; T14
n°4	T6 ; T7 ; T12 ; T9 ; T18 ; T4 ; T16 ; T17 ; T2 ; T3 ; T10 ; T11 ; T15 ; T19 ; T21 ; T13 ; T5 ; T8 ; T20 ; T1 ; T14
n°5	T6 ; T7 ; T18 ; T3 ; T4 ; T12 ; T2 ; T9 ; T17 ; T10 ; T16 ; T11 ; T15 ; T8 ; T14 ; T1 ; T20 ; T13 ; T21 ; T5 ; T19
n°6	T7 ; T6 ; T17 ; T9 ; T15 ; T4 ; T16 ; T18 ; T12 ; T2 ; T3 ; T10 ; T20 ; T11 ; T21 ; T19 ; T5 ; T1 ; T14 ; T13 ; T8
n°7	T6 ; T7 ; T9 ; T15 ; T11 ; T4 ; T12 ; T18 ; T2 ; T16 ; T3 ; T10 ; T17 ; T21 ; T14 ; T19 ; T5 ; T20 ; T8 ; T1 ; T13
n°8	T7 ; T6 ; T17 ; T11 ; T12 ; T2 ; T10 ; T15 ; T3 ; T16 ; T4 ; T18 ; T9 ; T1 ; T5 ; T21 ; T8 ; T14 ; T20 ; T19 ; T13
n°9	T6 ; T7 ; T9 ; T16 ; T18 ; T10 ; T11 ; T4 ; T15 ; T2 ; T3 ; T17 ; T12 ; T8 ; T19 ; T1 ; T14 ; T5 ; T21 ; T20 ; T1
n°10	T7 ; T6 ; T16 ; T12 ; T17 ; T4 ; T15 ; T11 ; T2 ; T10 ; T3 ; T9 ; T18 ; T21 ; T14 ; T5 ; T1 ; T8 ; T19 ; T20 ; T13

\* T : Tâche

### 3.3. Plan statistique

Des analyses comparatives ont été réalisées entre le groupe d'enfants sans difficulté mathématique et le groupe d'enfants dyscalculiques pour chaque test cognitif et chaque tâche expérimentale. En particulier, des tests *t* ou des analyses de variance (ANOVA) ont été effectués pour comparer les performances aux différentes tâches (exemple de variables dépendantes : score, temps de réponse, etc.) en fonction du groupe et en fonction des variables concernant spécifiques à chaque tâche expérimentale (exemple de variables indépendantes : taille des quantités, codes numériques, etc.). De plus, des analyses de covariance (ANCOVA) ont été effectuées pour mesurer l'implication de certaines variables cognitives (exemple : le raisonnement non

verbal, la lecture, la mémoire, etc.) sur la performance aux tâches expérimentales. L'ensemble des variables considérées est détaillé dans les chapitres 4, 5 et 6.

# Chapitre 4. Déficits de traitement numérique non symbolique dans la dyscalculie développementale

## Étude 2. Impairment of non-symbolic number processing in developmental dyscalculia

Lafay, A., St-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (*submitted*). Impairment of non-symbolic number processing in developmental dyscalculia, *Learning and Individual Differences*.

### Résumé

L'origine fonctionnelle de la dyscalculie, un trouble d'apprentissage mathématique, est controversée. Dans cette étude nous avons évalué le traitement des nombres non symboliques chez des enfants franco-québécois de 8-9 ans. Les résultats ont montré que les enfants dyscalculiques étaient aussi performants que les enfants dont le développement mathématique est typique en comparaison des nombres, mais moins performants en jugement de nombres. Leurs performances en production de nombres analogiques étaient également similaires à celles des enfants au développement typique pour les grandes (10-99) numérosités, alors qu'elles étaient moins bonnes dans le transcodage des petites (1-4) et moyenne (5-9) numérosités. Les résultats suggèrent ainsi qu'ils présentaient un déficit spécifique du sens du nombre affectant le traitement des petites et moyennes numérosités.

### Abstract

The functional origin of dyscalculia, an impairment affecting mathematics learning, remains controversial. We explored the processing of non-symbolic numbers in Quebec French-speaking 8–9-year-old children. Results showed that children with dyscalculia were as successful as typically developing children in a comparison task, but less successful in a matching task. Their performance in a dot set selection task was also similar to that of typically developing children for large (10-99) numerosities, while they were less successful in transcoding small (1-4) and medium (5-9) numerosities. Results suggest a specific deficit in processing small and medium numerosities.

## INTRODUCTION

Mathematics is involved in many activities of daily life, such as counting sets of objects, using time or distance measures, handling money, saying oral numbers, and even writing and reading Arabic numbers (e.g. telephone numbers). Although they are abstract in nature, people easily – and even automatically – perceive, use, and manipulate numbers in everyday life. Furthermore, poor numeracy is an important cause of

educational underachievement (Fortin, Royer, Potvin, Marcotte, & Yergeau, 2004). Developmental dyscalculia is defined by the American Psychiatric Association in the Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders, DSM-5 (2013) as a mathematics disorder that interferes with learning and daily life activities. It is manifested by mathematics difficulties affecting various abilities such as counting, enumeration, calculation, problem-solving, etc. Studies on dyscalculia to date showed a remarkable prevalence from 1 to 10% (Badian, 1999; Barbaresi, Katusic, Colligan, Weaver, & Jacobsen, 2005; Devine, Soltész, Nobes, Goswami, & Szűcs, 2013; Dirks, Spyer, van Lieshout, & De Sonneville, 2008; Gross-Tsur, Manor, & Shalev, 1996; Lewis, Hitch, & Walker, 1994; Share, Moffitt, & Silva, 1988). While some children can present with only dyscalculia, others present with both reading and mathematics disabilities (Badian, 1999). Indeed, a high comorbidity of dyscalculia and other developmental deficits such as dyslexia has been demonstrated (Gross-Tsur et al., 1996), leading some researchers (e.g., Geary, 1993) to propose that dyscalculia resulted from a general cognitive deficit affecting functions such as working memory. Nevertheless, the functional origin of dyscalculia remains unclear.

The cognitive processing of numbers has been conceptualized in various theoretical models. In the triple-code model (Dehaene, 1992, 2010), three different representations are used for number processing skills in adults. Numbers may be manipulated and represented mentally in three different codes: analogic, Arabic, and verbal. The Arabic and verbal codes are both symbolic and asemantic. In the Arabic number form, numbers are manipulated in Arabic format (e.g., 3), allowing exact calculations or parity judgments to be processed, for example. In verbal code, numbers are manipulated in words (e.g. /three/), allowing addition and multiplication arithmetic facts (i.e., directly retrieve results for addition and multiplication in memory) to be counted or processed, for example. Finally, the analogic code is non symbolic and represents the magnitude of numerosities over a number line. According to the literature, this number line is spatially oriented from left to right (Hubbard, Piazza, Pinel, & Dehaene, 2005) and is compressive so that the space between pairs of numbers becomes smaller as numerical magnitude increases (Gallistel & Gelman, 2000; Izard & Dehaene, 2008; Stoianov & Zorzi, 2012). This code, which is called “number sense” by Dehaene (1992, 2010) (for a broader conception of number sense, see Berch, 2005), is required to process number comparisons or approximate calculations, for example. Number sense is a core system for numerical processing that exists in human and animals (Gallistel & Gelman, 2000; Stoianov & Zorzi, 2012). Although it is a model for number processing in adults, the triple-code model provides a relevant framework for the understanding of numerical development and deficits in children. That model clearly describes the organization and processing of number representations and was therefore used as the theoretical framework for the present study.

Other models have been proposed to account for the development of numerical abilities in children. According to the developmental model of number acquisition (Von Aster & Shalev, 2007), cognitive number

representation develops during infancy and the school years through four main steps. The first consists of an inherited basic number sense based on core-system representation of magnitude, which allows the child to process subitizing and estimation. These two abilities rely respectively on the Exact Numerical System (ENS) and the Approximate Numerical System (ANS) (see Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004) for a description of these systems and processes). The ENS (also called Object Tracking System) sustains subitizing, which is the intuitive, fast, and precise ability to perceive small sets of objects, without counting. The ENS is limited to 3, according to Fayol, Perros, and Seron (2004) and Schleifer and Landerl (2011), or to 5, according to Starkey and Cooper (1995). For its part, the ANS sustains estimation, which is the intuitive, fast, and approximate ability to perceive large sets of more than 5 objects, without counting. Numerosities from 5 to 9 have a particular status because, although they depend on the ANS, they can be subitized and precisely identified through exposition and learning (Clements, 1999; Sullivan & Barner, 2014). The child's early numerical skills improve with age and become efficient in adulthood: 5-year-olds are able to subitize small quantities (Starkey & Cooper, 1995) (through the ENS) but they become faster with age (Schleifer & Landerl, 2011); they can also compare numbers (Gilmore, McCarthy, & Spelke, 2010; White, Scücs, & Soltész, 2012), estimate sets or place numbers on a number line (Booth & Siegler, 2006; Siegler & Booth, 2004) (through the ANS), but their mental numerical representations become more accurate with age (Halberda, Mazzocco, & Feigenson, 2008; Piazza et al., 2010; see also Lafay, St-Pierre, & Macoir, 2013 for a review). According to Von Aster and Shalev (2007) and Feigenson, Dehaene, and Spelke (2004), both the ENS and ANS are important for developing arithmetic abilities. Other researchers, such as Carey (2001, 2004) and Butterworth (1999, 2005), postulated that only the ENS is essential for understanding cardinality of sets (see Lafay, St-Pierre, & Macoir, 2013 for a review of the development and predictive character of the ENS and ANS in mathematical success). According to the developmental model of number acquisition (Von Aster & Shalev, 2007), the second step of numerical development consists of the acquisition of number words during the preschool years and the association of a perceived number of objects with spoken number symbols. In the third step, children learn Arabic symbols and associate them with a perceived number of objects and the corresponding number word. Finally, these three steps are necessary preconditions for the fourth step, which consists of developing a mature mental number line. This model was also used as the theoretical framework for the present study, which focused more specifically on the first step in number acquisition development.

The triple-code model (Dehaene, 1992, 2010) and the four-step developmental model of number acquisition (Von Aster & Shalev, 2007) are in agreement with respect to the functional origin of dyscalculia. Both models posed that dyscalculia is a "number sense" deficit, although this functional origin remains controversial. According to the triple-code model, a "number sense" deficit results from an impaired analogic code while, according to the four-step developmental model of number acquisition (Von Aster & Shalev, 2007), it results from an impairment of the inherited core-system representation of magnitude. Such a deficit would lead to

difficulty processing non-symbolic number representations and impaired mental numerical representations, and would therefore cause problems in the comparison, identification and estimation of numbers. In more general terms, if primary core-system abilities (i.e. ENS and ANS) fail to develop, children would be at risk for dyscalculia and inappropriate number development. In the majority of studies, the ability to compare non-symbolic numbers was impaired in children with dyscalculia (Davidse, De Jong, Shaul, & Bus, 2014; Desoete, Ceulemans, De Weerd, & Pieters, 2012; Ferreira et al., 2012; Landerl, Fussenegger, Moll, & Willburger, 2009; Mazzocco, Feigenson, & Halberda, 2011; Mejias, Mussolin, Rousselle, Grégoire, & Noël, 2012; Piazza et al., 2010; Mussolin, Mejias, & Noël, 2010; Price, Holloway, Räsänen, Vesterinen, & Ansari, 2007; Skagerlund & Träff, 2014), whereas this impairment was not reported in some other studies (De Smedt & Gilmore, 2011; De Visscher & Noël, 2012; Landerl & Kölle, 2009; Rousselle & Noël, 2007). The lack of consensus is also reflected in two case studies reported by Lucifora, Tang, Hall, and Butterworth (2008), who showed that only one of the two 8-9-year-old boys had difficulty processing non-symbolic numbers. In the same vein, in the group study by Chan, Au, and Tang (2013), one group of children with mathematics difficulties had poor performances in non-symbolic tasks, while the other group did not. The authors indicated that these two groups differed in the severity of the difficulties, as measured with a standardized mathematical test. However, no data in Chan, Au, and Tang (2013) were given for the children's general cognitive abilities (such as reasoning, reading, verbal and visuospatial memory, etc.), which could explain, at least in part, the numerical performances.

In all these studies, most of the researchers measured non-symbolic abilities with comparison of dot sets, which is, according to Dietrich, Huber, and Nuerk (2015), a classic and pure measure of non-symbolic number abilities. In this task, two sets of dots are presented and the children are asked to select the one containing the most dots. This is a very simple task since there is only one response choice. However, other tasks could be also employed to measure non-symbolic abilities. For example, the non-symbolic number matching task (also called the same-different task) is a measure of estimation abilities (Dietrich, Huber, & Nuerk, 2015; Gebuis & van der Smagt, 2011; Sasanguie, Defever, Van den Bussche, & Reynvoet, 2011; Smets, Gebuis, Defever, & Reynvoet, 2014) in which two sets of dots are presented and the children are asked to decide if they represent the same numerosity or not. This task measures the same construct as the non-symbolic number comparison task (Dietrich, Huber, & Nuerk, 2015), but is more demanding cognitively since the children have to compare two numerosities and choose between two response choices. As shown by Dietrich et al. in their research review on the topic, adults are less successful in matching than in comparison tasks, suggesting that the first is more difficult. To the best of our knowledge, no studies have investigated non-symbolic abilities measured with a matching task in children with dyscalculia. Another way to assess non-symbolic abilities is to use a dot set selection task. In this task, children are presented with sets of dots and asked to produce a set of approximately the same number of dots. In comparison and matching tasks, the integrity of non-symbolic

numerosity is derived from the ability to make judgments on presented stimuli. In comparison, a dot set selection task requires more engagement and seems more direct since the expected response is supposed to reflect the numerosity the children have activated following the stimulus presentation. To the best of our knowledge, only one study (Mejias et al., 2012) explored non-symbolic number production abilities in children with dyscalculia aged 9-10 years old with a dot selection task. The results pointed to the impairment of non-symbolic number production in children with dyscalculia. Thus, the use of these three tasks seems an informative way to provide a comprehensive picture of children's non-symbolic numerical abilities.

Finally, there is also no clear consensus regarding the presence of a deficit affecting the ENS and/or ANS in children with dyscalculia. Some behavioral studies suggested a ENS deficit because these children were not able to identify precisely and quickly small numerosities (Ashkenazi, Mark-Zigdon, & Henik, 2013; Andersson & Östergren, 2012; Landerl, 2013; Moeller, Neuburger, Kaufmann, Landerl, & Nuerk, 2009; Schleifer & Landerl, 2011) or to quickly compare small numerosities from 1 to 3 or 4 (Castro Cañizares, Reigosa Crespo, & González Alemañy, 2012). However, Desoete and Grégoire (2006) showed that only 33% of children with mathematics difficulties had difficulty processing small numerosities. In most of the studies, an identification task was used, involving not only a non-symbolic numerical process (the child had to look at a series of dots and identify how many dots there were), but also a symbolic process (the child had to give his/her response in the spoken modality). Such a task does not allow the symbolic and non-symbolic aspects of number processing to be disentangled. Sella, Lanfranchi, and Zorzi (2013) adopted a specific paradigm to avoid the influence of symbolic processing in the assessment of subitizing. They developed a dots-to-dots match-to-sample task in which children with Down syndrome were asked to report whether target dot sets had the same or a different numerosity with respect to a sample dot set. However, until now no similar task had been used in children with dyscalculia. With respect to the ANS, Castro Cañizares, Reigosa Crespo, and González Alemañy (2012) found good performances in processing large numerosities in 9–10-year-old children with dyscalculia. In other behavioral studies, these children had less precise number acuity in non-symbolic comparison tasks involving large numerosities (Mazzocco, Feigenson, & Halberda, 2011; Piazza et al., 2010) (see Lafay, St-Pierre, & Macoir, 2014 for a review of the numerical cognitive deficit in dyscalculia). Number acuity refers to the precision of the internal numerical representation and is measured by the ratio between two discriminated numerosities. Although an increasing number of studies in recent years have documented this aspect in dyscalculia, the presence of a deficit affecting the ENS and/or ANS remains unclear. This issue is addressed in the present study.

In summary, a number sense deficit was hypothesized to explain the mathematics difficulties observed in dyscalculia. However, there is still no consensus regarding the actual existence of such a deficit or the presence of a deficit affecting the ENS and/or ANS. Moreover, all studies were limited to tasks exploring the

comparison of non-symbolic numbers so that no conclusions could be drawn with respect to the existence of a number sense deficit in dyscalculia. Indeed, there is a need to use different tasks to provide a comprehensive picture of children's non-symbolic numerical abilities.

## **EXPERIMENTAL STUDY**

In the present study, we investigated the number sense deficit hypothesis in children with dyscalculia through an assessment of their abilities to process non-symbolic numerosities. More precisely, this study addressed the following research questions: 1) is dyscalculia a number sense deficit?; and 2) is dyscalculia a specific deficit affecting the ENS necessary to subitize very small numerosities or the ANS necessary to estimate large numerosities?

## **PARTICIPANTS**

Seventy-six 8- or 9-year-old third grade French-speaking children were recruited for this study. They had no history of sensory, physical, neurological, language and/or psychiatric illness. All these children were recruited from eleven French schools in Quebec City, Canada. Of these schools, one was classified as being in a poor socioeconomic environment, nine as average, and one as being in an advantaged environment, according to the socioeconomic index published by Québec's Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport (2014).

The initial research sample included thirty-seven children with typical development and thirty-nine children with mathematics difficulties, as identified by the child's teacher, special education teacher or speech-language pathologist. The Zareki-R (Dellatolas & Von Aster, 2006), a "paper-and-pencil" French battery designed to assess number processing and calculation in children aged 6 to 11 years old, was used to determine grade-specific achievement and general mathematical abilities. This test battery comprises the following eleven subtests: 1) counting dots, 2) backward oral counting, 3) dictation of numbers, 4) mental calculation (additions, subtractions, multiplications), 5) number reading, 6) number positioning on an analog scale, 7) magnitude comparison on spoken numbers, 8) estimation of sets of dots, 9) contextual estimation of quantities, 10) spoken problem-solving, and 11) magnitude comparison of Arabic numbers. The selection of participants in the present study was based on recent Quebec-French normative data for third grade (Lafay, St-Pierre, & Macoir, in press). Thirty-seven typical children scored above -1.5 standard deviations (SD) on the Zareki-R test and formed the group of typically developing (TD) children. Of the children with mathematic difficulties, 11 scored above -1.5 SD of the average on the total score of the Zareki-R test and were excluded from the present study. Four children were excluded because they had repeated a grade. Finally, 24 children who scored below -1.5 SD of the average on the total score of the Zareki-R test formed the group of children with mathematics difficulties (MD).

In summary, there were 37 TD children (mean age in months = 107.3, SD = 3.8) and 24 children with MD (mean age = 108.2, SD = 4.3). An ANOVA (analysis of variance) was performed on the mean age with the variable Mathematic Group (Group: TD vs. MD). The result showed no Mathematic Group effects ( $F(1, 55) = .058, p = .810, \eta_p^2 = .001$ ), indicating that the groups did not differ significantly in mean age. There were 21 girls (57%) and 16 boys (43%) in the TD group and 20 girls (83%) and 4 boys (17%) in the MD group, and the difference in gender distribution between the two groups was significant ( $\chi^2(1) = 4.666, p = .031$ ). The two groups (TD: 31 right-handed (84%) and 6 left-handed (16%); MD: 19 right-handed (79%) and 5 left-handed, 21%) were equivalent in terms of handedness distribution ( $\chi^2(1) = 0.210, p = .647$ ). Finally, the distribution of the children according to socioeconomic environment was significantly different ( $\chi^2(2) = 10.364, p = .006$ ) in the two groups (TD: 23 children from an advantaged (62%), 8 from an average (22%), and 6 from a poor socioeconomic environment (16%); MD: 7 children from an advantaged (29%), 15 from an average (63%), and 2 from a poor socioeconomic environment, 8%).

An ANOVA (Group: TD vs. MD) on the total score of the Zareki-R showed a Group effect, indicating that the performance of the children with MD was significantly poorer than that of the TD children with respect to general mathematical abilities (see Table 8). Furthermore, a MANOVA (Group: TD vs. MD) on each subtest score (11) of the Zareki-R showed a Group effect (MD lower than TD) on the following eight subtests: backward oral counting, number dictation, mental calculation, number reading, number positioning on an analog scale, oral magnitude comparison on spoken numbers, contextual estimation of quantities, and problem-solving. A marginal Group effect (MD lower than TD) was observed for three subtests: dot counting, estimating sets of dots, and magnitude comparison of Arabic numbers.

**Table 8. Participants' details: TD and MD**

	TD	MD	ANOVAs (Group: TD vs. MD)		
	( <i>n</i> = 37)	( <i>n</i> = 24)	<i>F</i> (1, 59)	<i>p</i>	$\eta_p^2$
Mathematic abilities (/163)	140.8 (9.3)	112.7 (9.8)	127.687	2.169E-16*	.684
Dot counting (/6)	5.7 (0.5)	5.4 (0.8)	3.350	.072	.054
Backward oral counting (/4)	3.5 (0.9)	2.6 (1.2)	11.838	.001*	.167
Number dictation (/16)	15.4 (1.0)	13.4 (2.4)	20.238	3.264E-5*	.255
Mental calculation (/44)	37.1 (4.8)	26.8 (5.9)	55.762	4.368E-10*	.486
Number reading (/16)	15.4 (0.9)	14.2 (1.8)	12.931	.001*	.180
Number positioning on an analog scale (/24)	17.9 (3.3)	14.2 (3.7)	17.055	1.159E-4*	.224
Magnitude comparison on spoken numbers (/16)	14.7 (1.3)	12.2 (2.1)	34.272	2.254E-7*	.367
Estimation of sets of dots (/5)	4.2 (0.8)	3.8 (1.2)	3.409	.070	.055
Contextual estimation of quantities (/10)	7.9 (2.5)	5.4 (2.9)	13.413	.001*	.185
Spoken problem-solving (/12)	9.1 (2.0)	5.3 (2.3)	46.907	4.873E-9*	.443

Magnitude comparison of Arabic numbers (/10)	9.8 (0.5)	9.5 (0.7)	3.683	.060	.059
Neuropsychological abilities					
Non-verbal reasoning (/36)	28.4 (3.2)	25.6 (3.0)	10.461	.002*	.151
Processing speed (/126)	39.5 (7.4)	34.9 (5.4)	6.686	.012*	.102
Visuospatial short-term memory (/16)	7.0 (1.6)	6.3 (1.3)	3.344	.072	.054
Visuospatial working memory (/14)	6.3 (2.0)	5.4 (1.3)	3.935	.052	.063
Verbal short-term memory (/12)	9.1 (2.0)	8.2 (2.5)	2.614	.111	.042
Verbal working memory (/12)	6.9 (2.1)	5.2 (1.4)	12.776	.001*	.178
Linguistic abilities					
Reading and spelling (/90)	77.9 (6.8)	66.0 (10.0)	30.499	7.889E-7*	.341
Word comprehension and production (/80)	53.2 (3.8)	50.7 (2.9)	7.367	.009*	.111
Reaction time (in ms)	513.9 (135.9)	634.9 (203.3)	10.022	.002*	.145

Note.

SD = Standard Deviation

\* These ability scores were significantly lower than those of TD children ( $p < .05$ )

## CHARACTERIZATION OF NEUROPSYCHOLOGICAL AND LINGUISTIC ABILITIES

All children first underwent a general neuropsychological assessment tapping the cognitive domains sensitive to number processing. This assessment battery included measures of non-verbal reasoning, processing speed, visuospatial short-term and working memory, verbal short-term and working memory, spoken word comprehension, word production, reading and spelling. Their performances in a reaction time task were also assessed.

### TASKS AND MATERIALS

#### Assessment of neuropsychological abilities

Non-verbal reasoning was assessed with Raven's Coloured Progressive Matrices (CPM) (Raven, 1977). Processing speed was assessed with the Coding subtest of the WISC IV (Wechsler, 2003). Visuospatial and verbal short-term and working memory were respectively assessed with the forward and backward span of the Corsi block test (Isaacs & Vargha Khadem, 1989; Corsi, 1972) and the forward and backward digit repetition subtests of the Zareki-R (Dellatolas & Von Aster, 2006).

#### Assessment of linguistic abilities

Word comprehension and word production abilities were respectively assessed with the Reception (spoken word-to-picture matching) and Production subtests (picture naming) of the 'Évaluation du Langage Oral' (ELO) battery (Khomsi, 2001). Reading and spelling abilities were assessed with two subtests of the Batterie

Analytique du Langage Écrit (BALE) (Cogni-science, 2010). In the reading subtest, children were asked to read 60 stimuli, equally distributed among regular words, irregular words and non-words. In the word writing subtest, they were asked to spell to dictation 30 stimuli, equally distributed among regular words, irregular words and non-words.

### **Assessment of reaction time**

Since the experimental tasks were administered using a computer to record response time, a reaction time task was administered to the children. This task was presented on a computer screen with DMDX (Forster & Forster, 2003), software that allows the controlled presentation of stimuli and recording of response time. The children had to press a response button as quickly as possible each time they saw a fixation point (cross) appearing on the computer screen. In one condition, they were asked to press the red button with the index finger of their right hand and in the other condition they had to press the green button with the index finger of their left hand. In each condition, twenty fixation crosses were randomly presented with four different delays between each stimulus: 250, 500, 1000 or 1500 milliseconds. The dependent measure was the mean reaction time combined for both tasks.

## **RESULTS**

### **Neuropsychological abilities**

An ANOVA (Group: TD vs. MD) showed a Group effect in the following tasks: Raven's CPM, Coding subtest of the WISC IV, and the backward digit repetition subtest of the Zareki-R, indicating that the performance of the MD group was significantly poorer than that of the TD group for non-verbal reasoning, processing speed, and verbal working memory (see Table 8). Furthermore, the results showed a marginal Group effect (TD > MD) in tasks measuring visuospatial memory (forward and backward Corsi block test). Finally, the analysis showed no Group effect in the forward digit repetition subtest of the Zareki-R, indicating the two groups did not differ for verbal short-term memory.

### **Linguistic abilities**

A two-way ANOVA (Group: TD vs. MD) showed a Group effect in the total number of correct responses on both Reception and Production subtests of the ELO and on both Reading and Spelling subtests of the BALE, indicating that the performance of the MD group was significantly poorer than that of the TD group with respect to word comprehension and word production abilities as well as reading and spelling abilities (see Table 8).

### **Reaction time**

A 2 (Group: TD vs. MD) x 2 (Task: Right vs. Left reaction time) ANOVA was performed on response latencies. The analysis revealed a significant Group effect ( $F(1, 59) = 10.022, p = .002, \eta_p^2 = .145$ ), indicating that children with MD were slower than TD children (see Table 8). However, neither Task effect ( $F(1, 59) = 0.012, p = .914, \eta_p^2 = 2.002E-4$ ) nor interaction ( $F(1, 59) = 0.044, p = .834, \eta_p^2 = .001$ ) were observed.

## **Summary**

Compared to TD children, the performance of children with MD was significantly lower for non-verbal reasoning, processing speed, verbal working memory, word comprehension and production, reading and spelling, and reaction time. These data were entered as covariates in the analyses of the results on the experimental tasks..

## **ABILITIES TO PROCESS NON-SYMBOLIC NUMEROSITIES IN CHILDREN WITH MD**

TD children as well as those with MD underwent an experimental numerical assessment designed to identify the locus of the deficit at the origin of dyscalculia: a number sense deficit; a specific deficit affecting the ENS necessary to subitize very small numerosities and/or the ANS necessary to estimate large numerosities.

Children were tested individually in a quiet room at their school. Testing took place from February to June of the school year. Each child was tested in one session lasting between 45 and 60 minutes. The presentation order of the experimental tasks was randomized between children. All the stimuli were presented on a computer screen with DMDX (Forster & Forster, 2003).

## **TASKS AND MATERIALS**

### **Non-symbolic number comparison**

This task was administered to assess analog number comparison. It is a classic and pure measure of non-symbolic number abilities (Dietrich et al., 2015). Two sets of dots were presented on the computer screen and the children were asked to select the one that contained the most dots. There are several visual properties that covary with numerosity. For example, visual properties such as the occupied area, cumulative surface area, item size, total circumference, and density of the items are usually considered in comparison tasks (Dietrich et al., 2015). It was physically impossible to control for all properties at the same time (Leibovich & Henik, 2013), and we classically chose to control for the occupied area and cumulative surface area. With respect to the occupied area, stimuli consisted of pairs of black squares (10-cm sides) separated by a 2-cm space and containing a set of blue (left stimulus) or yellow (right stimulus) dots. The dots were not of equal size, so that the cumulative surface area was identical for both sets of dots and was controlled by a program developed by

Price, Palmer, Battista, and Ansari (2012). Magnitude comparisons were performed on 30 pairs in which the number of dots varied from 1 to 99. These pairs varied along three numerical sizes: 8 small pairs with 1 to 4 dots, 7 medium pairs with 5 to 9 dots, and 15 large pairs with 10 to 99 dots. Furthermore, the pairs also varied along three ratios of dots: 10 pairs with ratio  $1/2$ , 10 pairs with ratio  $2/3$ , and 10 pairs with ratio  $3/4$ . The side of the correct response (i.e., the largest number) was counterbalanced: each pair appeared twice, once in ascending (e.g. 1-2) and once in descending (e.g. 2-1) order, for a total of 60 pairs. Pairs were presented in random order. Five practice trials were offered to allow the children to become familiar with the task.

Each trial started with the presentation of a pair of dot sets, remaining on the screen until response or until 4000 milliseconds, and followed by a 500-millisecond delay. Responses and latencies were recorded by the computer. Blue and yellow stickers were stuck respectively on the left Alt key and right Alt key of the keyboard. As this task required choosing between two possible responses, one displayed on the left and one displayed on the right side on the screen, the children were asked to respond by pressing the button on the side of the correct response (i.e., the largest number)..

### **Non-symbolic number matching task**

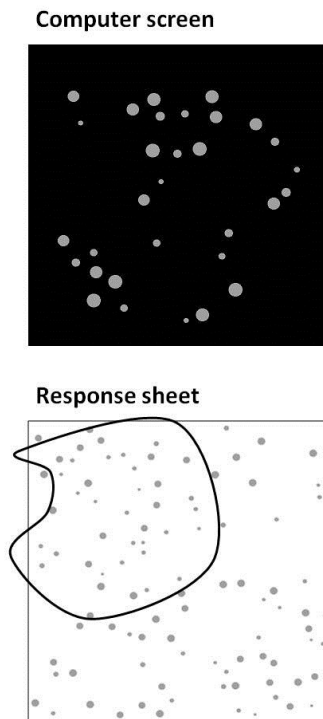
This non-symbolic number matching task is another measure of estimation abilities (Dietrich, Huber, & Nuerk, 2015; Gebuis & van der Smagt, 2011; Sasanguie, Defever, Van den Bussche, & Reynvoet, 2011; Smets, Gebuis, Defever, & Reynvoet, 2014). Two sets of dots were presented on the computer screen and the children were asked to decide if they represented the same numerosity or not. As explained in the introduction, compared to a non-symbolic number comparison task, the non-symbolic number matching task is cognitively more demanding (Dietrich, Huber, & Nuerk, 2015).

Stimuli consisted of pairs of black squares (10-cm sides) separated by a 2-cm space and containing a set of blue (left stimulus) or yellow (right stimulus) dots. The occupied area and cumulative surface area were identical for both sets of dots and controlled by a program developed by Price, Palmer, Battista, and Ansari (2012). Magnitude judgments were performed on 18 pairs in which the number of dots varied from 1 to 9. These pairs varied along two numerical sizes: 9 small pairs with 1 to 4 dots, and 9 large pairs with 5 to 9 dots. Furthermore, pairs also varied along three ratios of dots: 3 pairs with ratio  $1/2$ , 3 pairs with ratio  $2/3$ , and 3 pairs with ratio  $3/4$ . Half of the pairs were identical and half were different. The side on which the largest number was presented in pairs with a different number of dots was counterbalanced: each pair appeared twice, once in ascending (e.g. 1-2) and once in descending (e.g. 2-1) order, for a total of 36 pairs. Pairs were presented in random order. Five practice trials were offered to allow the children to become familiar with the task.

Each trial started with the presentation of a pair of dot sets, remaining on the screen until response or until 4000 milliseconds, and followed by a 500-millisecond delay. Responses and latencies were recorded by the computer. Green and red stickers were stuck respectively on the left Alt key and right Alt key of the keyboard. As this task required choosing between two possible responses (“yes, the two numerosities are identical” or “no, the two numerosities are different”), one displayed on the left and one displayed on the right side on the screen, the children were asked to respond by pressing the button on the side of the correct response (i.e., on the left green button to answer “yes”; on the right red button to answer “no”).

### Dot set selection task

This dot set selection task is another measure of estimation abilities. It was administered to also assess analog number production. Unlike the task developed by Mejias and Schiltz (2013), it allows estimation abilities to be measured without involving counting. The children were given a pencil and sheet of paper on which a set of 100 dots was drawn. A set of dots was then presented on the computer screen and they were asked to estimate the numerosity represented by the dots on the screen by quickly circling with the pencil (without counting) the same number of dots on the sheet of paper. This task is illustrated in Figure 3.



**Figure 3. Illustration of the dot set selection task**

This dot set selection task was performed on 30 sets in which the number of dots varied from 1 to 99. These sets varied along three numerical sizes: 10 very small numerosities with 1 to 4 dots (1, 1, 2, 2, 3, 3, 3, 4, 4),

10 small numerosities with 5 to 9 dots (5, 5, 6, 6, 7, 7, 8, 8, 9, 9), and 10 large numerosities with 10 to 99 dots (12, 17, 26, 31, 46, 53, 64, 79, 85, 98). They were presented in random order. Five practice trials were offered to allow the children to become familiar with the task.

Each trial started with the presentation of a dot set, remaining on the screen until response or until 7000 milliseconds, and followed by a 500-millisecond delay.

Because it was an estimation task and an exact response could not be expected, it was not possible to consider true or false responses in the analyses. Therefore, a ratio (child's response / target number) between the child's response and the target number was first calculated (for example, a ratio of 0.5 corresponded to a response of 6 for the target number 12). Second, the absolute distance ratio (ADR) between the child's calculated ratio and the perfect ratio 1 was calculated:  $ADR = 1 - \text{child's response} / \text{target number}$ . Finally, response time was also recorded by the experimenter, who pressed a response key as soon as the child started his/her response. This measure was used in the study by Reeve, Reynolds, Humberstone, and Butterworth (2012), who also recorded children's answers with a digital video camera. The correlation between reaction time measures for the two recording methods was very high ( $r = .99$ ); therefore, the key press method was considered an efficient way to record reaction time.

## RESULTS

### Non-symbolic number comparison

A 2 (Group: TD vs. MD) x 3 (Numerosity: Small vs. Medium vs. Large) ANOVA was performed on the mean number of correct responses and a 2 (Group: TD vs. MD) x 3 (Numerosity: Small vs. Medium vs. Large) ANCOVA was performed on response latencies (with reaction time as covariate), which are presented in Table 9. For the mean number of correct responses, the analysis revealed no Group effect ( $F(1, 59) = 2.467, p = .122, \eta_p^2 = .040$ ), indicating that the children with MD were as successful as the TD children, but did reveal a Numerosity effect ( $F(2, 118) = 52.957, p = 3.857E-17, \eta_p^2 = .473$ ), indicating that children were less successful for large than medium numerosities ( $p = 7.629E-6$ ), and for medium than small numerosities ( $p = 2.274E-5$ ). No interaction was observed ( $F(2, 118) = 1.183, p = .310, \eta_p^2 = .020$ ). With respect to response latency, the analysis revealed no Group effect ( $F(1, 58) = 0.005, p = .943, \eta_p^2 = 9.017E-5$ ), indicating that the children with MD were as fast as the TD children, but did reveal a significant Numerosity effect ( $F(2, 116) = 3.499, p = .033, \eta_p^2 = .057$ ). Post-hoc analysis (with Bonferroni correction) showed that the children were faster for large than for small ( $p = .012$ ) and medium ( $p = 7.410E-8$ ) numerosities. However, they were as fast for medium as for small numerosities ( $p = 0.097$ ). No interaction was observed ( $F(2, 116) = 0.290, p = .749, \eta_p^2 = .005$ ). Furthermore, a 2 (Group: TD vs. MD) x 3 (Ratio: 1/2 vs. 2/3 vs. 3/4) ANOVA was performed on the mean

number of correct responses for all stimuli regardless of their numerical size; a 2 (Group: TD vs. MD) x 3 (Numerosity: Ratio: 1/2 vs. 2/3 vs. 3/4) ANCOVA was also performed on response latencies (with reaction time as covariate) for all stimuli regardless of their numerical size. Results showed a Ratio effect for the mean number of correct responses ( $F(2, 118) = 44.984, p = 3.014E-15, \eta_p^2 = .433$ ) and for the response latencies ( $F(2, 116) = 4.075, p = .019, \eta_p^2 = .066$ ). Post-hoc analysis (with Bonferroni correction) showed that children were more successful for the ratio 1/2 than the ratio 2/3 ( $p = 1.779E-05$ ) and 3/4 ( $p = 2.086E-12$ ) and that they were faster for the ratio 1/2 than the ratio 2/3 ( $p = 8.715E-06$ ) and 3/4 ( $p = 4.342E-10$ ). However, there was no Group x Ratio interaction for the mean number of correct responses ( $F(2, 118) = 0.429, p = .652, \eta_p^2 = .007$ ) or for the response latencies ( $F(2, 116) = 0.123, p = .884, \eta_p^2 = .002$ ).

**Table 9. Mean number of correct responses (SD) on three non-symbolic numerical tasks for TD and MD**

Tasks	Size of Numerosity	Measures	TD	MD
			(n = 37)	(n = 24)
Comparison	Small	Responses	.9 (.1)	.9 (.1)
		Latencies	1205.9 (225.9)	1236.2 (175.3)
	Medium	Responses	.9 (.1)	.9 (.1)
		Latencies	1244.0 (235.8)	1273.7 (253.9)
	Large	Responses	.8 (.1)	.8 (.1)
		Latencies	1148.3 (228.0)	1168.0 (208.9)
	Total	Responses	.9 (.1)	.9 (.1)
		Latencies	1199.4 (231.2)	1225.8 (216.6)
Matching	Small	Responses	.9 (.1)	.9 (.1)*
		Latencies	1392.4 (266.9)	1506.6 (227.4)
	Medium	Responses	.7 (.1)	.6 (.2)*
		Latencies	1512.3 (292.9)	1492.6 (392.9)
	Total	Responses	.8 (.2)	.7 (.2)*
		Latencies	1452.3 (284.8)	1499.6 (317.6)
Selection	Small	ADR	.1 (.1)	.2 (.2)*
		Latencies	2945.5 (557.1)	2837.2 (455.3)
	Medium	ADR	.4 (.3)	.6 (.5)*
		Latencies	3750.6 (1029.0)	3361.1 (942.0)
	Large	ADR	.4 (.1)	.4 (.2)
		Latencies	3948.7 (1204.9)	3785.3 (1199.9)
	Total	ADR	.3 (.2)	.4 (.4)*
		Latencies	3548.3 (1055.1)	3327.8 (986.7)

Note. \*These ability scores were significantly lower than those of TD children ( $p < .05$ ) or these ADRs were significantly larger than those of TD children ( $p < .05$ ).

### Non-symbolic number matching task

First, we performed a correlation analysis to verify that our tasks captured the same construct. We observed a significant correlation between the number of correct responses ( $r = .485$ ) and between the latencies ( $r = .650$ ) in comparison and matching tasks. Second, a 2 (Group: TD vs. MD) x 2 (Numerosity: Small vs. Medium) ANOVA was performed on the mean number of correct responses and a 2 (Group: TD vs. MD) x 2 (Numerosity: Small vs. Medium) ANCOVA was performed on response latencies (with reaction time as

covariate) (see Table 9). For the mean number of correct responses, the analyses revealed a significant Group effect ( $F(1, 59) = 4.918, p = .018, \eta_p^2 = .091$ ), indicating that the children with MD were less successful than the TD children. A significant Numerosity effect ( $F(1, 59) = 149.528, p = 8.108E-18, \eta_p^2 = .717$ ) was also observed (children were more successful for small than medium numerosities), but no interaction ( $F(1, 59) = 2.503, p = .119, \eta_p^2 = .041$ ). The Group effect remained significant when the visuospatial and verbal short-term and working memory and word comprehension and production variables were introduced as covariates, although it disappeared with the non-verbal reasoning variable (Raven's CPM), processing speed, reading and spelling as covariates. With respect to response latency, the analysis revealed no Group effect ( $F(1, 58) = 0.29, p = .865, \eta_p^2 = .001$ ). A significant Numerosity effect ( $F(1, 58) = 4.523, p = .037, \eta_p^2 = .072$ ) was also observed (children were faster for small than medium numerosities), but no interaction ( $F(1, 58) = 1.982, p = .164, \eta_p^2 = .033$ ). Furthermore, a 2 (Group: TD vs. MD) x 3 (Ratio: 1/2 vs. 2/3 vs. 3/4) ANOVA was performed on the mean number of correct responses for different pairs, and a 2 (Group: TD vs. MD) x 3 (Numerosity: Ratio: 1/2 vs. 2/3 vs. 3/4) ANCOVA was performed on response latencies for different pairs (with reaction time as covariate). Results showed no Ratio effect for the mean number of correct responses ( $F(2, 118) = 0.833, p = .437, \eta_p^2 = .014$ ) or for the response latencies ( $F(2, 116) = 1.543, p = .218, \eta_p^2 = .026$ ), and no Group x Ratio interaction for the mean number of correct responses ( $F(2, 118) = 0.149, p = .862, \eta_p^2 = .003$ ) or for the response latencies ( $F(2, 116) = 1.339, p = .226, \eta_p^2 = .023$ ).

### **Dot set selection task**

First, we performed a correlation analysis between the latencies of each task to verify that our tasks captured the same construct. It was not possible to do a correlation analysis between the mean number of correct responses in the comparison and matching tasks and the ADR of the dot set selection task because of the nature of the data. The latencies in the dot set selection task were significantly correlated with the latencies in the comparison task ( $r = .350$ ), as well with the latencies in the matching task ( $r = .420$ ). Second, a 2 (Group: TD vs. MD) x 3 (Numerosity: Small vs. Medium vs. Large) ANOVA was performed on the ADR and a 2 (Group: TD vs. MD) x 3 (Numerosity: Small vs. Medium vs. Large) ANCOVA was performed on the response latencies (with reaction time as covariate) (see Table 9). For the ADR, the analysis revealed a significant Group effect ( $F(1, 59) = 10.015, p = .002, \eta_p^2 = .145$ ), indicating that in the MD group, the ADR was larger than in the TD group, a significant Numerosity effect ( $F(2, 118) = 47.140, p = 8.985E-16, \eta_p^2 = .444$ ). Furthermore, a significant Group x Numerosity interaction was observed ( $F(2, 118) = 4.517, p = .013, \eta_p^2 = .071$ ). More precisely, post-hoc analysis (with Bonferroni correction) showed that in MD, the ADR was larger than in TD children for small ( $p = .006$ ) and medium numerosities ( $p = .008$ ), although the two groups did not differ for large numerosities ( $p = .535$ ). The main Group effect was still significant when each cognitive variable (except reading and spelling) was introduced as covariate; the Group x Numerosity interaction were still significant

when verbal working memory and reading and spelling were introduced as covariates, but became marginal with other cognitive variables as covariates. The analysis of response latencies revealed no Group effect ( $F(1, 57) = 1.208, p = .276, \eta_p^2 = .021$ ), but a significant Numerosity effect ( $F(2, 114) = 6.544, p = .002, \eta_p^2 = .103$ ). Post-hoc analysis (with Bonferroni correction) showed that the children were significantly faster for small than medium ( $p = 7.438E-9$ ) and large numerosities ( $p = 3.951E-12$ ), and faster for medium than large numerosities ( $p = 2.348E-6$ ). No interaction was observed ( $F(2, 114) = 0.742, p = .478, \eta_p^2 = .013$ ).

### **Summary of results**

Children with MD had performances as good as the TD children in non-symbolic number comparison, but poorer performances than the TD children in non-symbolic number matching, regardless of whether the numerosities depended on the ENS or ANS. With respect to the dot set selection task, the children with MD had poorer performances than TD children in producing small and medium numerosities, although their performances were preserved for large numerosities.

## **DISCUSSION**

In this study, we investigated the number sense deficit hypothesis in children with dyscalculia through an assessment of their abilities to process non-symbolic numerosities. In addition to cognitive, linguistic and mathematical tests, the children were administered three experimental tasks of non-symbolic number processing (non-symbolic number comparison task, non-symbolic number matching task, and dot set selection task) designed to answer the following research questions: 1) is dyscalculia a general deficit affecting number sense?; and 2) is dyscalculia a specific deficit affecting the ENS necessary to subitize very small numerosities or the ANS necessary to estimate large numerosities?

In summary, results showed that the children with MD had performances that were as good as those of the TD children in non-symbolic number comparison, but they were less successful than the TD children in non-symbolic number matching. Furthermore, children with MD were less successful than TD children in producing small and medium non-symbolic numerosities in the dot set selection task, although their performances were as good as those of the TD children in producing large non-symbolic numerosities.

These results first showed that children with MD did not have a general number sense deficit since their performance was affected only in some of the tasks or for some sizes of numerosities. Instead, they suggest that MD could be a specific deficit affecting number sense.

In this regard, our results are not in line with the propositions (e.g., Davidse, De Jong, Shaul, & Bus, 2014; Desoete, Ceulemans, De Weerd, & Pieters, 2012) related to the functional origin of dyscalculia based on the

triple-code model (Dehaene, 1992, 2010) and/or the four-step developmental model of number acquisition (Von Aster & Shalev, 2007). In all these studies, researchers measured non-symbolic abilities with comparison tasks only. To the best of our knowledge, the present study was the first to explore, in the same group of children, the processing of analog numbers in three different experimental tasks. Our results showed that children with MD present specific difficulties in the three tasks. In our study, children with MD showed difficulties in the non-symbolic number matching task, but not in the non-symbolic number comparison task. This result is in agreement with some studies which showed that the ability to compare non-symbolic numbers was efficient in children with MD (De Smedt & Gilmore, 2011; Landerl & Kölle, 2009; Rousselle & Noël, 2007). However, other researchers found that this ability was impaired in these children (Davidse, De Jong, Shaul, & Bus, 2014; Desoete, Ceulemans, De Weerd, & Pieters, 2012; Ferreira et al., 2012; Landerl, Fussenegger, Moll, & Willburger, 2009; Mejias, Mussolin, Rousselle, Grégoire, & Noël, 2012; Mussolin, Mejias, & Noël, 2010; Price, Holloway, Räsänen, Vesterinen, & Ansari, 2007). Therefore, it is difficult to draw any conclusions concerning the integrity or impairment of analog number processing in MD with these two tasks. In our study, the difference between the results obtained in these two tasks could be explained by their differential cognitive load. Compared to the non-symbolic number comparison task, the non-symbolic number matching task required additional cognitive processes involving working memory and inhibitory control (Dietrich, Huber, & Nuerk, 2015). As shown in the present study, children with MD showed a deficit in processing speed and verbal working memory. Further studies should explore how executive functions are involved in non-symbolic number matching and how children with MD are impaired in executive functions, for example. Furthermore, another explanation could be given with regards to the three ratios used in the comparison and matching tasks ( $1/2$ ,  $2/3$  and  $3/4$ ). Considering the age of the children, the large size of numerosities, and the fact that stimuli were displayed up to four seconds, these ratios were maybe too easily discriminable, even for children with MD. Therefore, it was possible that the non-symbolic number comparison task, which was less cognitively demanding, lacked the sensitivity to detect an ANS deficit in children with MD.

With respect to the second issue addressed by our study, our results showed that children with MD were less successful than TD children in producing small numerosities (1-4), suggesting the alteration of subitizing abilities depending on the ENS. This result was in line with that reported by Castro Cañizares, Reigosa Crespo, & González Alemañy (2012), who noted a subitizing deficit in 9–10-year-old children with MD, but was not in accordance with Desoete & Grégoire (2006), who found that only 33% of 8–10-year-old children with mathematical difficulties had difficulty processing small numerosities. Unlike Mazzocco, Feigenson, & Halberda (2011) and Piazza et al. (2010), who showed that children with MD had less precise number acuity in a non-symbolic comparison task of large numerosities, we observed good performances in the production of large numerosities (10-99), suggesting preservation of estimation and approximation abilities relying on the ANS. In our opinion, the discrepancy between results could be explained by the use of different tasks and the

various methods used to analyze the children's responses in production (i.e. calculation of the mean ratio in comparison and selection tasks). More interestingly, in our study, children with MD had difficulty producing medium numerosities (from 5 to 9), a result suggesting that they were not able to subitize and precisely identify these numerosities, as TD children did by exposition and learning (Clements, 1999).

More generally, children with MD in the present study presented with neuropsychological, linguistic, and reading and spelling difficulties, in addition to their mathematical difficulties. Thus, our results provide support to the hypothesis of a domain general cognitive deficit in MD (Geary, 1993), but also, to some extent, to the hypothesis that MD is caused by multiple numerical and general cognitive deficits, as a working memory deficit or executive deficit (Geary, 2010). Future studies should explore how general cognitive abilities could influence number sense abilities in children with and without mathematic difficulties.

In the present study, we showed that children with MD were impaired to process small and medium numerosities (5-9), while they were able to process large numerosities (10-99) in the dot set selection task. Thus, the ANS was preserved in children with MD, but these children had an ENS deficit. These results confirmed that the ENS is essential for mathematics development (Carey, 2001, 2004; Butterworth, 1999, 2005). Furthermore, these results challenged the existence of the ENS and the ANS, the two numerical core systems respectively devoted to the processing of small (1-4) and large (5-99). They rather supported the propositions of Feigenson, Dehaene, and Spelke (2004), according to which a single numerical system, precise for small numerosities and more approximate when numerosities grow, sustains the processing of all numerosities. Future studies are needed to confirm the hypothesis of a unique processing system for all non-symbolic numerosities.

The present study has some limitations. First, children in the TD and MD groups were not paired according to gender and socioeconomic environment. Considering their possible influence on the results in each group, further studies controlling for these variables are needed. Second, children were allowed to provide a response within many seconds (4 seconds in comparison and matching tasks; 7 seconds in dot set selection task) although they were explicitly asked to answer as quickly as possible. Several examples were also given to encourage the children to proceed as quickly as possible and prevent them from counting. Moreover, children answered within 1236 ms for small numerosities, 1273 for medium numerosities, and 1168 ms for large numerosities in the comparison task. This response latency made the use of a counting strategy highly unlikely. Such response latencies are congruent with Mandler & Shebo (1982), who showed that small and medium numerosities were subitized within two seconds. Similar response latencies were also recorded in the matching task for small and medium numerosities. However, longer latencies (2837ms, 3361ms and 3948ms for small, medium and large numerosities respectively) were recorded in the dot set selection task, due to the

nature of the task which required the production of a written response. Despite these precautions and observations, we cannot completely rule out the possibility that some children adopted a counting strategy while others actually "subitized" numerosities. In further research, very short presentation of stimuli should be used to avoid counting in subitizing assessment. Finally, another limitation specifically concerned the dot set selection task in which children were asked to estimate the numerosity represented by the dots on the screen by quickly circling with a pencil the same number of dots on a sheet of paper. However, the number of dots on the sheet of paper (100) and the dot sets presented on the computer screen (varying from 1 to 99) allowed the production of underestimation errors only. In further studies, tasks allowing for under- and over-estimation errors should be used to better assess analog number production.

In sum, the present study showed that children with MD did not have a general number sense deficit: their ANS was preserved, whereas they presented with impairment of the ENS leading to difficulty processing of small and medium numerosities. This result challenges the four-step developmental model of number acquisition (Von Aster & Shalev, 2007), according to which dyscalculia is an impairment of the inherited core-system representation of magnitude. Hence, our results suggest that, in MD children, the number sense deficit specifically affects the ENS, thus confirming that this system is essential for mathematics development (Carey, 2001, 2004). Future research should explore the impact of the ENS impairment on the processing of symbolic numbers as well as on the development of a mature mental number line, the next steps in the developmental model of number acquisition (Von Aster & Shalev, 2007).

## **Ethics**

The present study was approved by the Ethics Committee of the Research for the Institut Universitaire en Santé Mentale de Québec.

## **Acknowledgements**

We thank for their collaboration all the children of the participating schools of Quebec: La Mosaïque, St Fidèle, La Farandole, St Pierre et St Laurent de l'île d'Orléans, Sous bois, St Jean Baptiste, Cap Soleil et St-Pierre, L'Orée des bois, Trivent, and Institut Saint-Joseph.

## **References**

American Psychiatric Association (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-5)*. Arlington, VA: APA.

- Andersson, U., & Östergren, R. (2012). Number magnitude processing and basic cognitive functions in children with mathematical learning disabilities. *Learning and Individual Differences*, 22(6), 701–714. doi:10.1016/j.lindif.2012.05.004
- Ashkenazi, S., Mark-Zigdon, N., & Henik, A. (2013). Do subitizing deficits in developmental dyscalculia involve pattern recognition weakness? *Developmental Science*, 16(1), 35–46. doi:10.1111/j.1467-7687.2012.01190.x
- Badian, N. (1999). Persistent arithmetic, reading, or arithmetic and reading disability. *Annals of Dyslexia*, 49, 45–70.
- Barbarese, W. J., Katusic, S. K., Colligan, R. C., Weaver, A. L., & Jacobsen, S. J. (2005). Math learning disorder: incidence in a population-based birth cohort, 1976-82, Rochester, Minn. *Ambulatory Pediatrics*, 5(5), 281–289. doi:10.1367/A04-209R.1
- Berch, D. B. (2005). Making sense of number sense: implications for children with mathematical disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 38(4), 333–339. <http://doi.org/10.1177/00222194050380040901>
- Booth, J. L., & Siegler, R. S. (2006). Developmental and individual differences in pure numerical estimation. *Developmental Psychology*, 42(1), 189–201. doi:10.1037/0012-1649.41.6.189
- Butterworth, B. (1999). *The mathematical brain*. London: MacMillan.
- Butterworth, B. (2005). *Developmental dyscalculia*. In Handbook of mathematical cognition (pp. 455–467). New York: Psychology Press.
- Carey, S. (2001). Cognitive foundations of arithmetic: Evolution and ontogenesis. *Mind & Language*, 16(1), 37–55.
- Carey, S. (2004). Bootstrapping & the origin of concepts. *Daedalus*, 133(1), 59–68.
- Castro Cañizares, D., Reigosa Crespo, V., & González Alemañy, E. (2012). Symbolic and non-symbolic number magnitude processing in children with developmental dyscalculia. *Spanish Journal of Psychology*, 15(3), 952–966. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23156905>
- Chan, W. W. L., Au, T. K., & Tang, J. (2013). Developmental dyscalculia and low numeracy in Chinese children. *Research in Developmental Disabilities*, 34(5), 1613–1622. doi:10.1016/j.ridd.2013.01.030
- Clements, D. H. (March 1999). *Subitizing: What is it? Why teach it? Teaching Children Mathematics*. Reston, VA: National Council of Teachers of Mathematics.
- Cogni-science (2010). *BALE : Batterie Analytique du Langage Écrit*. Grenoble.  
[http://www.cognisciences.com/article.php3?id\\_article=81](http://www.cognisciences.com/article.php3?id_article=81).
- Corsi, P. M. (1972). *Human memory and the medial temporal region of the brain*. Montreal: McGill University.
- Davidse, N. J., de Jong, M. T., Shaul, S., & Bus, A. G. (2014). A twin-case study of developmental number sense impairment. *Cognitive Neuropsychology*, 31, 221–236. doi:10.1080/02643294.2013.876980

- De Smedt, B., & Gilmore, C. K. (2011). Defective number module or impaired access? Numerical magnitude processing in first graders with mathematical difficulties. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(2), 278–292. doi:10.1016/j.jecp.2010.09.003
- De Visscher, A., & Noël, M.-P. (2012). A case study of arithmetic facts dyscalculia caused by a hypersensitivity-to-interference in memory. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 1–21. <http://doi.org/10.1016/j.cortex.2012.01.003>
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1–42.
- Dehaene, S. (2010). *La bosse des maths, 15 ans après*. Paris: Odile Jacob.
- Dellatolas, G., & Von Aster, V. (2006). *Zareki-R, Batterie pour l'évaluation du traitement des nombres et du calcul chez l'enfant*. Paris: ECPA.
- Desoete, A., Ceulemans, A., De Weerd, F., & Pieters, S. (2012). Can we predict mathematical learning disabilities from symbolic and non-symbolic comparison tasks in kindergarten? Findings from a longitudinal study. *British Journal of Educational Psychology*, 82(1), 64–81. doi: 10.1348/2044-8279.002002
- Desoete, A., & Grégoire, J. (2006). Numerical competence in young children and in children with mathematics learning disabilities. *Learning and Individual Differences*, 16(4), 351–367. doi:10.1016/j.lindif.2006.12.006
- Devine, A., Soltész, F., Nobes, A., Goswami, U., & Szűcs, D. (2013). Gender differences in developmental dyscalculia depend on diagnostic criteria. *Learning and Instruction*, 27, 31–39. doi:10.1016/j.learninstruc.2013.02.004
- Dietrich, J. F., Huber, S., & Nuerk, H.-C. (2015). Methodological aspects to be considered when measuring the approximate number system (ANS) – a research review. *Frontiers in Psychology*, 6, 295. doi:10.3389/fpsyg.2015.00295
- Dirks, E., Spyer, G., van Lieshout, E. C. D. M., & de Sonneville, L. (2008). Prevalence of combined reading and arithmetic disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 41(5), 460–473. doi:10.1177/0022219408321128
- Fayol, M., Perros, H., & Seron, X. (2004). Les représentations numériques : caractéristiques, troubles et développement. In M. N. Metz-Lutz, E. Demont, C. Seegmuller, M. De Agostini, & N. Bruneau (Eds.), *Développement cognitif et troubles des apprentissages* (pp. 69–107). Marseille: Solal.
- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. S. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307–14. doi:10.1016/j.tics.2004.05.002
- Ferreira, F., Wood, G., Pinheiro-Chagas, P., Lonnemann, J., Krinzinger, H., Willmes, K., & Haase, V. (2012). Explaining school mathematics performance from symbolic and nonsymbolic magnitude processing: similarities and differences between typical and low-achieving children. *Psychology and Neuroscience*, 5(1), 37–46. doi:10.3922/j.psns.2012.1.06
- Forster, K. I., & Forster, J. C. (2003). DMDX: A windows display program with millisecond accuracy. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 35(1), 116–124. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12723786>

- Fortin, L., Royer, É., Potvin, P., Marcotte, D., & Yergeau, É. (2004). Prediction of risk for secondary school dropout: Personal, family and school factors. *Canadian Journal of Behavioural Science*, 36(3), 219–231. doi:10.1037/h0087232
- Geary, D. C. (1993). Mathematical disabilities: Cognitive, neuropsychological, and genetic components. *Psychological Bulletin*, 114(2), 345–362. doi:10.1037/0033-2909.114.2.345
- Geary, D. C. (2010). Mathematical Disabilities: Reflections on cognitive, neuropsychological, and genetic components. *Learning and Individual Differences*, 20(2), 130–133. doi:10.1016/j.lindif.2009.10.008
- Gebuis, T., & van der Smagt, M. J. (2011). False approximations of the approximate number system? *PLoS ONE*, 6(10). doi:10.1371/journal.pone.0025405
- Gilmore, C. K., McCarthy, S. E., & Spelke, E. S. (2010). Non-symbolic arithmetic abilities and mathematics achievement in the first year of formal schooling. *Cognition*, 115(3), 394–406. doi:10.1016/j.cognition.2010.02.002
- Gross-Tsur, V., Manor, O., & Shalev, R. S. (1996). Developmental dyscalculia: prevalence and demographic features. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 38(1), 25–33. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8606013>
- Halberda, J., Mazocco, M. M. M., & Feigenson, L. (2008). Individual differences in non-verbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature*, 455(7213), 665–668. doi:10.1038/nature07246
- Isaacs, E. B., & Vargha Khadem, F. (1989). Differential course of development of spatial and verbal memory span: A normative study. *British Journal of Developmental Psychology*, 7(4), 377–380. doi:10.1111/j.2044-835X.1989.tb00814.x
- Iuculano, T., Tang, J., Hall, C. W. B., & Butterworth, B. (2008). Core information processing deficits in developmental dyscalculia and low numeracy. *Developmental Science*, 11(5), 669–680. doi:10.1111/j.1467-7687.2008.00716.x
- Izard, V., & Dehaene, S. (2008). Calibrating the mental number line. *Cognition*, 106(3), 1221–1247. <http://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.06.004>
- Khomsî, A. (2001). *Évaluation du Langage Oral*. Paris: ECPA.
- Lafay, A., St-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (in press). Performances moyennes des enfants franco-québécois de 8-9 ans au test mathématique Zareki-R.
- Lafay, A., St-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (2015). Narrative review of literature on digital cognitive disorders involved in developmental dyscalculia: Deficit number sense or lack of access to mental digital representations? *Canadian Psychology / Psychologie Canadienne*, 56(1), 96–107.
- Lafay, A., St-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (2013). Développement des systèmes numériques non symboliques et prédicteurs de réussite mathématique. *Glossa*, 112, 1–17.
- Landerl, K. (2013). Development of numerical processing in children with typical and dyscalculic arithmetic skills—a longitudinal study. *Frontiers in Psychology*, 4, 459. doi:10.3389/fpsyg.2013.00459

- Landerl, K., Fussenegger, B., Moll, K., & Willburger, E. (2009). Dyslexia and dyscalculia: two learning disorders with different cognitive profiles. *Journal of Experimental Child Psychology*, *103*(3), 309–324. doi:10.1016/j.jecp.2009.03.006
- Landerl, K., & Kölle, C. (2009). Typical and atypical development of basic numerical skills in elementary school. *Journal of Experimental Child Psychology*, *103*(4), 546–465. doi:10.1016/j.jecp.2008.12.006
- Leibovich, T., & Henik, A. (2013). Magnitude processing in non-symbolic stimuli. *Frontiers in Psychology*, *4*, 375. <http://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00375>
- Lewis, C., Hitch, G. J., & Walker, P. (1994). The prevalence of specific arithmetic difficulties and specific reading difficulties in 9- to 10-year-old boys and girls. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, *35*(2), 283–292. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8188799>
- Mazzocco, M. M. M., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Impaired acuity of the approximate number system underlies mathematical learning disability. *Child Development*, *82*(4), 1224–1237. doi:10.1111/j.1467-8624.2011.01608.x
- Mejias, S., Mussolin, C., Rousselle, L., Grégoire, J., & Noël, M.-P. (2012). Numerical and nonnumerical estimation in children with and without mathematical learning disabilities. *Child Neuropsychology*, *18*(6), 550–575. doi:10.1080/09297049.2011.625355
- Mejias, S., & Schiltz, C. (2013). Estimation abilities of large numerosities in kindergartners. *Frontiers in Psychology*, *4*, 518. doi:10.3389/fpsyg.2013.00518
- Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport (MELS) (2014). *Indices de défavorisation*. Québec, QC: Gouvernement du Québec.
- Moeller, K., Neuburger, S., Kaufmann, L., Landerl, K., & Nuerk, H.-C. (2009). Basic number processing deficits in developmental dyscalculia: Evidence from eye tracking. *Cognitive Development*, *24*(4), 371–386. doi:10.1016/j.cogdev.2009.09.007
- Mussolin, C., Mejias, S., & Noël, M.-P. (2010). Symbolic and nonsymbolic number comparison in children with and without dyscalculia. *Cognition*, *115*(1), 10–25. doi:10.1016/j.cognition.2009.10.006
- Piazza, M., Facoetti, A., Noemi, A., 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
- Price, G. R., Holloway, I. D., Räsänen, P., Vesterinen, M., & Ansari, D. (2007). Impaired parietal magnitude processing in developmental dyscalculia. *Current Biology*, *17*(24), R1042–3. doi:10.1016/j.cub.2007.10.013
- Price, G. R., Palmer, D., Battista, C., & Ansari, D. (2012). Nonsymbolic numerical magnitude comparison: reliability and validity of different task variants and outcome measures, and their relationship to arithmetic achievement in adults. *Acta Psychologica*, *140*(1), 50–57. doi:10.1016/j.actpsy.2012.02.008
- Raven, J. C. (1977). *Standard Progressive Matrices. Manuel PM47*. Issy-les-Moulineaux: Éditions ESP.
- Reeve, R., Reynolds, F., Humberstone, J., & Butterworth, B. (2012). Stability and Change in Markers of Core Numerical Competencies. *Journal of Experimental Psychology. General*. <http://doi.org/10.1037/a0027520>

- Rousselle, L., & Noël, M.-P. (2007). Basic numerical skills in children with mathematics learning disabilities: a comparison of symbolic vs non-symbolic number magnitude processing. *Cognition*, *102*(3), 361–395. doi:10.1016/j.cognition.2006.01.005
- Sasanguie, D., Defever, E., Van den Bussche, E., & Reynvoet, B. (2011). The reliability of and the relation between non-symbolic numerical distance effects in comparison, same-different judgments and priming. *Acta Psychologica*, *136*(1), 73–80. doi:10.1016/j.actpsy.2010.10.004
- Schleifer, P., & Landerl, K. (2011). Subitizing and counting in typical and atypical development. *Developmental Science*, *2*(14), 280–291. doi:10.1111/j.1467-7687.2010.00976.x
- Sella, F., Lanfranchi, S., & Zorzi, M. (2013). Enumeration skills in Down syndrome. *Research in Developmental Disabilities*, *34*(11), 3798–9806. <http://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.07.038>
- Share, D. L., Moffitt, T. E., & Silva, P. A. (1988). Factors associated with arithmetic-and-reading disability and specific arithmetic disability. *Journal of Learning Disabilities*, *21*(5), 313–320. doi:10.1177/002221948802100515
- Siegler, R. S., & Booth, J. L. (2004). Development of numerical estimation in young children. *Child Development*, *75*(2), 428–444. doi:10.1111/j.1467-8624.2004.00684.x
- Skagerlund, K., & Träff, U. (2014). Development of magnitude processing in children with developmental dyscalculia: Space, time, and number. *Frontiers in Psychology*, *5*, 1–15. <http://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00675>
- Smets, K., Gebuis, T., Defever, E., & Reynvoet, B. (2014). Concurrent validity of approximate number sense tasks in adults and children. *Acta Psychologica*, *150*, 120–128. doi:10.1016/j.actpsy.2014.05.001
- Starkey, P., & Cooper, R. G. (1995). The development of subitizing in young children. *British Journal of Developmental Psychology*, *13*(4), 399–420. doi: 10.1111/j.2044-835X.1995.tb00688.x
- Stoianov, I., & Zorzi, M. (2012). Emergence of a “visual number sense” in hierarchical generative models. *Nature Neuroscience*, *15*(2), 194–196. <http://doi.org/10.1038/nn.2996>
- Sullivan, J., & Barner, D. (2014). Inference and association in children’s early numerical estimation. *Child Development*, *85*(4), 1740–1755. <http://doi.org/10.1111/cdev.12211>
- Von Aster, M., & Shalev, R. S. (2007). Number development and developmental dyscalculia. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *49*, 868–873.
- Wechsler, D. (2003). *Wechsler Intelligence Scale for Children, Fourth Edition*. San Antonio, TX: Psychological Corporation.
- White, S., Scücs, D., & Soltész, F. (2012). Symbolic number: the integration of magnitude and spatial representations in children aged 6 to 8 years. *Frontiers in Psychology*, *2*, 392. doi:10.3389/fpsyg.2011.00392

# Chapitre 5. Déficits des traitements numériques symboliques dans la dyscalculie développementale

## Étude 3. Impairment of Arabic- and spoken- number processing in children with developmental dyscalculia

Lafay, A., Macoir, J. & St-Pierre, M.-C., (*submitted*). Impairment of Arabic- and spoken- number processing in children with developmental dyscalculia. *Journal of Learning Disabilities*.

### Résumé

Dans cette étude, nous explorons l'origine fonctionnelle de la dyscalculie chez 24 enfants franco-québécois de 8-9 ans. Leur performance en reconnaissance, accès au sens du nombre et production de nombres symboliques en code arabe et oral a été comparée à celles de 37 enfants sans difficulté mathématique afin d'évaluer les processus numériques symboliques. Les résultats ont montré que les enfants dyscalculiques étaient moins performants que leurs pairs sans difficulté mathématique dans toutes les tâches symboliques, incluant la reconnaissance des nombres. Ils suggèrent d'ailleurs qu'un tel déficit de reconnaissance pourrait être à l'origine des difficultés d'accès au sens du nombre et de production des nombres symboliques.

### Abstract

The performance of 24 French-Quebec 8–9-year-old children with developmental dyscalculia (DD) in Arabic and spoken number recognition, comprehension and production tasks designed to assess symbolic number processing was compared to that of 37 typically developing children (TD). Children with DD were less successful than TD children in every symbolic numerical task, including recognition of Arabic and spoken numbers. These results thus suggested that this deficit of symbolic number recognition could compromise symbolic number comprehension and production.

## INTRODUCTION

Poor numeracy is an important cause of educational underachievement (Fortin, Royer, Potvin, Marcotte, & Yergeau, 2004). In addition, mathematical difficulties are a frequent complaint reported in class by teachers. Developmental dyscalculia is defined in the DSM-V (2013) as a mathematics disorder that interferes with learning and daily life activities. It is manifested by difficulties affecting various abilities such as counting, enumeration, calculation, problem solving, etc. Studies on children with dyscalculia found a prevalence from 1 to 10% (Badian, 1999; Barbaresi, Katusic, Colligan, Weaver, & Jacobsen, 2005; Devine, Soltész, Nobes, Goswami, & Szűcs, 2013; Dirks, Spyer, Van Lieshout, & De Sonneville, 2008; Gross-Tsur, Manor, & Shalev,

1996; Lewis, Hitch, & Walker, 1994; Share, Moffitt, & Silva, 1988). Because mathematics is involved in many activities of daily life, people with dyscalculia can be marginalized and their social and professional integration affected (Badian, 1999; INSERM, 2007). Dyscalculia can be the only deficit observed in children (Badian, 1999). However, a high comorbidity of dyscalculia and other developmental deficits such as dyslexia has been demonstrated (Gross-Tsur et al., 1996), leading some researchers (e.g., Geary, 1993) to propose that dyscalculia resulted from a general cognitive deficit affecting functions such as working memory. However, the functional origin of dyscalculia remains unclear.

The cognitive processing of numbers has been conceptualized in various theoretical models. In the triple-code model (Dehaene, 1992, 2010) representing numerical skills in adults, numbers may be manipulated and represented mentally in three different codes: analogic, Arabic, and verbal. The analogic code is non-symbolic and represents the magnitude of numerosities over a compressible number line oriented from left to right. This analogic code is the “number sense” required to process number comparison and approximate calculation for example. The Arabic and verbal codes are both symbolic and non-semantic (i.e., they do not bear number sense themselves). In the Arabic number form, numbers are manipulated in Arabic format (e.g., 3), allowing exact calculation or parity judgment to be processed for example. Finally, numbers are manipulated in words (e.g., /three/) in the verbal code, allowing counting or addition and multiplication arithmetic facts to be processed for example. Although the triple-code model was implemented to account for mature numerical processes, it provides a relevant framework for understanding the development and deficits of numerical skills in children. This model clearly describes the organization and processing of number representations and was therefore used as a theoretical framework in the present study.

Other models have been proposed to account for the development of numerical abilities in children. According to the model of number acquisition (Von Aster & Shalev, 2007), the development of cognitive number representation is achieved from infancy through the school years through four main steps. The first step consists of an inherited basic number sense based on core-system representation of magnitude (similar to the analogic code in the triple-code model). More precisely, the Exact Numerical System (ENS) sustains subitizing which is the intuitive, fast, and precise ability of perceiving and identifying small collections of objects, without counting, which is limited to 3 (Schleifer & Landerl, 2011) or to 5 according (Starkey & Cooper, 1995); the Approximate Numerical System (ANS) rather sustains estimation, which is the intuitive, fast, and approximate ability of perceiving and identifying large collections of more than 5 objects, without counting. Medium numerosities from 5 to 9 have a particular status because, even they depend on ANS, they can be subitized and exactly identified through repetitive exposition (Clements, 1999). The second step consists of the acquisition of number words during the preschool years and in the association of a perceived number of objects with spoken number symbols (i.e., the verbal code in the triple-code model). In the third step, children

learn Arabic symbols and associate them with a perceived number of objects and its corresponding number word (i.e., the Arabic code in the triple-code model). Finally, these three steps are necessary preconditions for the fourth step, which consists of developing a mature mental number line. This model provides a developmental view of number acquisition and number processing and was also used as a theoretical framework in the present study.

According to both the triple-code model (Dehaene, 1992, 2010) and the four-step developmental model of number acquisition (Von Aster & Shalev, 2007), a main numerical cognitive hypothesis can be posited to explain primary dyscalculia: the “number sense” deficit. Such a deficit would lead to difficulty processing non-symbolic numbers and to impaired mental numerical representations (Davidse, De Jong, Shaul, & Bus, 2014; Desoete, Ceulemans, De Weerd, & Pieters, 2012; Ferreira et al., 2012; Landerl, Fussenegger, Moll, & Willburger, 2009; Mejias, Mussolin, Rousselle, Grégoire, & Noël, 2011; Mussolin, Mejias, & Noël, 2010). However, some studies did not report this impairment in children with dyscalculia (e.g., De Smedt & Gilmore, 2011; Landerl & Kölle, 2009; Rousselle & Noël, 2007). In these studies, children with dyscalculia were efficient in comparing non-symbolic numbers (i.e., sets of dots), while their performance was not as good as that of typically developing children when they had to compare Arabic numbers. Such an impairment could hardly be interpreted as a number sense deficit, but rather suggests impairment in the connection between the Arabic and analogic codes in the triple-code model (Dehaene, 1992, 2010) or impairment in the third step of the four-step developmental model of number acquisition (Von Aster & Shalev, 2007). This interpretation was adopted by Noël and Rousselle (2011), who suggested that dyscalculia is a specific deficit in the access to number sense from Arabic numbers rather than a “number sense” deficit per se (see also Noël, Rousselle, & De Visscher (2013) and Lafay, St-Pierre, & Macoir (2015) for a review on the numerical cognitive deficit in dyscalculia). Within this debate about the functional origin of dyscalculia, Chan, Au, and Tang (2013) recently showed that, depending on their performance, children with dyscalculia can be divided into two groups: one group with poor performances in non-symbolic and symbolic tasks (interpreted as a number sense deficit), and one group with difficulties with symbolic numbers only (interpreted as a deficit in the access to number sense). According to these authors, this differentiation could be due to differences between the two groups in terms of the severity of mathematical difficulties, the group with a number sense deficit having poorer performances in mathematics than the group with a deficit in the access to number sense. However, no data were given for the children’s general cognitive abilities (such as reasoning, reading, verbal and visuospatial memory, etc.), which could also explain, at least in part, the numerical performances of students in both groups.

The functional origin of dyscalculia remains controversial. Some of this uncertainty stems from significant differences in the methods and tasks used to measure numerical skills in children. In previous studies, researchers usually used comparison tasks to assess numerical abilities in children with dyscalculia and

mainly found that they presented deficits in processing Arabic numbers (Davidse et al., 2014; De Smedt & Gilmore, 2011; Desoete et al., 2012; Ferreira et al., 2012; Landerl et al., 2009; Landerl & Kölle, 2009; Mazzocco, Feigenson, & Halberda, 2011; Mejias et al., 2011; Mussolin et al., 2010; Piazza et al., 2010; Price, Holloway, Räsänen, Vesterinen, & Ansari, 2007; Rousselle & Noël, 2007). Spoken numerals are nonetheless as important as Arabic numerals in school as well as in daily life activities and should also be considered in studies designed to address the functional origin of dyscalculia. However, at least to our knowledge, researchers never used tasks in which children were asked to compare spoken numerals. Furthermore, in most of the reported studies, symbolic number processing was measured with comprehension tasks, while number production and number recognition tasks were used less often. When the production of symbolic numbers was investigated, researchers usually used transcoding tasks (such as analogic-to-symbolic numbers and vice versa) and found that children with dyscalculia had difficulties in transcoding analogic numerosities (e.g., groups of dots) to symbolic spoken numbers (e.g., Mazzocco et al., 2011; Mejias et al., 2011; Olkun, Altun, & Şahin, 2015), without investigating symbolic Arabic numbers. Furthermore, Mejias et al. (2011) explored only the reverse transcoding of Arabic numbers from 8 to 64 to analogic numbers and found that 9–10-year-old children with dyscalculia had difficulties in approximately producing a collection corresponding to an Arabic number. Surprisingly, neither study explored spoken-to-analogic numbers transcoding nor analogic-to-Arabic numbers transcoding in school-age children with dyscalculia, so that the picture regarding the production of numbers in dyscalculia remains incomplete. Furthermore, to the best of our knowledge, no study explored the recognition of symbolic numbers in dyscalculia. This recognition process is, however, a prior and essential prerequisite for every numerical activity and should therefore be considered in studies designed to identify the functional locus of dyscalculia.

To summarize, there is still no consensus regarding the functional origin of dyscalculia. With respect to the access to number sense from symbolic numbers, the actual existence of a deficit affecting Arabic and/or spoken numbers in children with dyscalculia remains unclear. By resorting to the triple-code model (Dehaene, 1992, 2010) or to the third step of number acquisition in the four-step developmental model (Von Aster & Shalev, 2007), some studies suggested that these children had impairment in the connection between Arabic and analogic numbers. However, the preservation/impairment of the connection between spoken and analogic numerals has not been explored. For the production of symbolic numbers, the literature highlighted difficulties in producing spoken numbers, but also a lack of data regarding the abilities of children with dyscalculia to produce Arabic numerals from analogic numerosities. Finally, no information was available about number recognition of symbolic Arabic and spoken numbers, although it is an essential step in number processing. The originality of the present study lies in the systematic exploration, in the same group of children with dyscalculia, of processes devoted to: the recognition of Arabic and spoken numbers, the access to number sense from Arabic and spoken numbers, the production of symbolic numbers from analogic numerosities (analogic-to-

symbolic) and vice versa (symbolic-to-analogic). We thus assessed both spoken and Arabic numbers processes, referring respectively to the second and third steps in the developmental model of number acquisition (Von Aster & Shalev, 2007). With regard to the triple-code model (Dehaene, 1992, 2010), symbolic number recognition, number sense access and production tasks were used to examine the integrity of the Arabic and spoken modules on the one hand, and the connections between these two modules and the analogic code (or number sense) on the other hand.

### **THE CURRENT STUDY: OBJECTIVES AND HYPOTHESES**

In the present study, we investigated symbolic Arabic and spoken number processing in children with dyscalculia in order to answer the following research questions: 1) Is dyscalculia a deficit affecting Arabic number processing and/or spoken number processing? And 2) Is dyscalculia a deficit affecting number sense access, number production, and/or number recognition?

### **PARTICIPANTS**

Seventy-six 8- or 9-year-old third grade French-speaking children were recruited for this study. They had no history of sensory, physical, neurological, language and/or psychiatric illness. All these children were recruited from eleven French schools in Quebec City, Canada. Of these schools, one was classified as being in a poor socioeconomic environment, nine as average, and one as being in an advantaged environment, according to the socioeconomic index published by Québec's Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport (2014).

The initial research sample included thirty-seven children with typical development and thirty-nine children with mathematical difficulties, as identified by the child's teacher, special education teacher or speech-language pathologist. These 39 children with mathematical difficulties met the DSM-V (2013) criterion according to which the affected academic skills cause significant interference with academic or occupational performance. According to the DSM-V (2013), the affected academic skills in dyscalculia are substantially and quantifiably below those expected for the individual's chronological age, as confirmed by individually administered standardized achievement measures and clinical assessment. To insure compliance with this criterion, the Zareki-R (Dellatolas & Von Aster, 2006), a "paper-and-pencil" French battery designed to assess number processing and calculation in children aged 6 to 11 years old, was administered to all children. This battery comprises the following eleven subtests: 1) counting dots, 2) backward oral counting, 3) dictation of numbers, 4) mental calculation (additions, subtractions, multiplications), 5) number reading, 6) number positioning on an analog scale, 7) magnitude comparison on spoken numbers, 8) estimation of sets of dots, 9) contextual estimation of quantities, 10) spoken problem-solving, and 11) magnitude comparison of Arabic numbers. The dependent measure was the number of correct responses for each subtest and the number of correct

responses combined for all subtests. The selection of participants for the present study was based on recent Quebec-French normative data for third grade (Lafay, St-Pierre, & Macoir, in press). Thirty-seven typical children (21 girls and 16 boys) scored above -1.5 standard deviations (SD) on the Zareki-R test and formed the group of typically developing (TD) children. Of the children with mathematical difficulties, 11 scored above -1.5 SD of the average on the total score of the Zareki-R test and were excluded from the present study. Four children were excluded because they had repeated a grade. Finally, 24 children (20 girls and 4 boys) who scored below -1.5 SD of the average on the total score of the Zareki-R test formed the group of children with developmental dyscalculia (DD). Teachers and parents also confirmed that DD children had difficulties for more than six months, another diagnostic criterion of dyscalculia according to the DSM-V (2013).

In summary, there were 37 TD children (mean age in months = 107.3, SD = 3.8) and 24 children with DD (mean age = 108.2, SD = 4.3). An ANOVA (analysis of variance) was performed on the mean age with the variable Group (Group: TD vs. DD). The result showed no Group effects ( $F(1, 55) = .058, p = .810, \eta_p^2 = .001$ ), indicating that the groups did not differ significantly in mean age. There were 21 girls (57 %) and 16 boys (43 %) in the TD group and 20 girls (83 %) and 4 boys (17 %) in the DD group and the difference in gender distribution between the two groups was significant ( $\chi^2(1) = 4.666, p = .031$ ). The two groups (TD: 31 right-handers (84 %) and 6 left-handers (16 %); DD: 19 right-handers (79 %) and 5 left-handers, 21 %) were equivalent in terms of handedness distribution ( $\chi^2(1) = 0.210, p = .647$ ). Finally, the repartition of children according to the socioeconomic environment was significantly different ( $\chi^2(2) = 10.364, p = .006$ ) in the two groups (TD: 23 children from an advantaged socioeconomic environment (62 %), 8 children from an average socioeconomic environment (22 %), and 6 children from a poor socioeconomic environment (16 %) ; DD: 7 children from an advantaged socioeconomic environment (29 %), 15 children from an average socioeconomic environment (63 %), and 2 children from a poor socioeconomic environment, 8%).

An ANOVA (Group: TD vs. DD) on the total score of the Zareki-R showed a Group effect, indicating that the performance of the children with DD was significantly poorer than that of the TD children with respect to general mathematical abilities, as expected (see Table 10). Furthermore, a two-way MANOVA (Group: TD vs. DD) on each subtest score (11) of the Zareki-R showed a Group effect (DD lower than TD) on the following eight subtests: backward oral counting, number dictation, mental calculation, number reading, number positioning on an analog scale, oral magnitude comparison on spoken numbers, contextual estimation of quantities, and problem-solving. A marginal Group effect (DD lower than TD) was observed for three subtests: dot counting, estimating sets of dots, and magnitude comparison of Arabic numbers.

**Table 10. Participants' general cognitive abilities: TD and DD (mean (SD) and statistics)**

	TD	DD	ANOVAs (Group: TD vs. DD)		
	( <i>n</i> = 37)	( <i>n</i> = 24)	<i>F</i> (1, 59)	<i>p</i>	$\eta_p^2$
Mathematic abilities (/163)	140.8 (9.3)	112.7 (9.8)	127.687	2.169E-16*	.684
Dot counting (/6)	5.7 (0.5)	5.4 (0.8)	3.350	.072	.054
Backward oral counting (/4)	3.5 (0.9)	2.6 (1.2)	11.838	.001*	.167
Number dictation (/16)	15.4 (1.0)	13.4 (2.4)	20.238	3.264E-5*	.255
Mental calculation (/44)	37.1 (4.8)	26.8 (5.9)	55.762	4.368E-10*	.486
Number reading (/16)	15.4 (0.9)	14.2 (1.8)	12.931	.001*	.180
Number positioning on an analogic scale (/24)	17.9 (3.3)	14.2 (3.7)	17.055	1.159E-4*	.224
Magnitude comparison on spoken numbers (/16)	14.7 (1.3)	12.2 (2.1)	34.272	2.254E-7*	.367
Estimation of sets of dots (/5)	4.2 (0.8)	3.8 (1.2)	3.409	.070	.055
Contextual estimation of quantities (/10)	7.9 (2.5)	5.4 (2.9)	13.413	.001*	.185
Spoken problem-solving (/12)	9.1 (2.0)	5.3 (2.3)	46.907	4.873E-9*	.443
Magnitude comparison of Arabic numbers (/10)	9.8 (0.5)	9.5 (0.7)	3.683	.060	.059
<b>Neuropsychological abilities</b>					
Non-verbal reasoning (/36)	28.4 (3.2)	25.6 (3.0)	10.461	.002*	.151
Processing speed (/126)	39.5 (7.4)	34.9 (5.4)	6.686	.012*	.102
Visuospatial short-term memory (/16)	7.0 (1.6)	6.3 (1.3)	3.344	.072	.054
Visuospatial working memory (/14)	6.3 (2.0)	5.4 (1.3)	3.935	.052	.063
Verbal short-term memory (/12)	9.1 (2.0)	8.2 (2.5)	2.614	.111	.042
Verbal working memory (/12)	6.9 (2.1)	5.2 (1.4)	12.776	.001*	.178
<b>Linguistic abilities</b>					
Reading and spelling (/90)	77.9 (6.8)	66.0 (10.0)	30.499	7.889E-7*	.341
Word comprehension and production (/80)	53.2 (3.8)	50.7 (2.9)	7.367	.009*	.111
Reaction time (in ms)	513.9 (135.9)	634.9 (203.3)	10.022	.002*	.145

Note.

\* These ability scores were significantly lower than those of TD children ( $p < .05$ ).

## CHARACTERIZATION OF NEUROPSYCHOLOGICAL AND LINGUISTIC ABILITIES

All children first underwent a general neuropsychological assessment tapping the cognitive domains sensitive to number processing. This assessment battery included measures of non-verbal reasoning, processing speed, visuospatial short-term and working memory, verbal short-term and working memory, spoken word comprehension, word production, reading and spelling. Their number processing and calculation abilities were then assessed, as well as their performance in a reaction time task.

## TASKS AND MATERIALS

With respect to neuropsychological abilities, non-verbal reasoning was assessed with Raven's Colored Progressive Matrices (Raven, 1977). Visuospatial and verbal short-term and working memory were respectively assessed with the Corsi block test (Isaacs & Vargha Khadem, 1989; Corsi, 1972) and the forward and backward digit repetition subtests of the Zareki-R (Dellatolas & Von Aster, 2006). Linguistic abilities were assessed with the Reception (spoken word-to-picture matching) and Production subtests (picture naming) of the 'Évaluation du Langage Oral' (ELO) battery (Khomsî, 2001) and with the Reading and Spelling subtests of the Batterie Analytique du Langage Écrit (BALE) battery (Cogni-science, 2010).

Finally, since the experimental tasks were administered using a computer to record response time (see below), a reaction time task was administered to the children. This task was presented on a computer screen with DMDX (Forster & Forster, 2003), software that allows the controlled presentation of stimuli and recording of response time. The children had to press a response button as quickly as possible each time they saw a fixation point (cross) appearing on the computer screen. In one condition, they were asked to press the red button with the index finger of their right hand and in the other condition they had to press the green button with the index finger of their left hand. In each condition, twenty fixation crosses were randomly presented with four different delays between each stimulus: 250, 500, 1000 or 1500 milliseconds. The dependent measure was the mean reaction time combined for both tasks.

## RESULTS

For neuropsychological abilities, the performance of the DD group was significantly lower than that of the TD group for non-verbal reasoning, processing speed, and verbal working memory (see Table 10). This group was also marginally lower than the TD group for visuospatial short-term and working memory, but as good as the TD group for verbal short-term memory. Results also showed that the performance of the DD group was significantly lower than that of the DD group for word comprehension and word production abilities as well as for reading and spelling abilities. Furthermore, a 2 (Group: TD vs. DD) x 2 (Task: Right vs. Left reaction time) ANOVA was performed on response latencies (see Table 10). The analysis revealed a significant Group effect ( $F(1, 59) = 10.022, p = .002, \eta_p^2 = .145$ ), indicating that children with DD were slower than TD children. However, neither Task effect ( $F(1, 59) = 0.012, p = .914, \eta_p^2 = 2.002E-4$ ), nor interaction ( $F(1, 59) = 0.044, p = .834, \eta_p^2 = .001$ ) was observed.

In summary, compared to TD children, the performance of children with DD was significantly lower for non-verbal reasoning, processing speed, verbal working memory, word comprehension and production, reading and spelling, and reaction time. These data were entered as covariates in the analyses of the results on the experimental tasks.

## ABILITIES TO PROCESS SYMBOLIC NUMBERS IN CHILDREN WITH DD

TD children as well as those with DD underwent an experimental numerical assessment designed to identify the locus of the deficit at the origin of dyscalculia. Children were tested individually in a quiet room at their school. Testing took place from February to June of the school year. Each child was tested in two sessions lasting 30 minutes. The presentation order of the experimental tasks was randomized between children. All the stimuli were presented on a computer screen with DMDX (Forster & Forster, 2003), a Windows-based program designed to precisely time the presentation of stimuli and enable the measurement of reaction times. Spoken numbers were presented at an intensity of 70-db in a headset.

### COMPREHENSION OF SYMBOLIC NUMBERS

#### Tasks and materials

##### *Magnitude comparison of symbolic numbers*

The ability to access number sense from symbolic numbers was assessed with two tasks administered in the Arabic and spoken codes. They involved recognizing symbolic numbers and accessing their numerosities (in other words, number sense).

In the Arabic code, stimuli, displayed on the computer screen, consisted of two white squares (side = 10 cm) separated by a 2-cm space, containing a blue (left stimulus) and a yellow (right stimulus) Arabic number (Calibri, 22 millimeters) and children were asked to select the largest one. Magnitude comparisons were performed on 30 pairs in which numbers varied from 1 to 99. The size of numerosity was controlled with regard to the ENS and the ANS, as well as to medium numerosities from 5 to 9, which had a particular position and overlapped the two previous systems. Indeed, these pairs varied along three numerical sizes: 8 small pairs from 1 to 4 were contrasted with 7 medium pairs from 5 to 9 and 15 large pairs from 10 to 99. The pairs also varied along three ratios between the numbers: 10 pairs with ratio 1/2, 10 pairs with ratio 2/3, and 10 pairs with ratio 3/4. The side of the correct response (i.e., the largest number) was counterbalanced: each pair appeared twice, once in ascending (e.g. 1-2) and once in descending (e.g. 2-1) order, for a total of 60 pairs. Pairs were presented in random order. Five practice trials were offered to allow the children to become familiar with the task.

Each trial started with the presentation of the pair, remaining on the screen until response or until 4000 milliseconds, and followed by a 500-millisecond delay. Blue and yellow stickers were respectively stuck on the left Alt key and right Alt key of the keyboard. As this task required choosing between two possible responses, one displayed on the left and one displayed on the right side, the children were asked to respond by pressing

the button on the side of the correct response (i.e. the largest number). Responses and latencies were recorded by the computer.

In the spoken code, two white squares containing blue and yellow pictures of earphones were displayed on the computer screen. The children listened to pairs of spoken numbers, separated by 1000 milliseconds, and were asked to select the largest one. They had to press the left blue button or right yellow button respectively if the largest number was the first or second number heard.

#### *Magnitude judgment on analogic-symbolic numbers association*

Two tasks in the Arabic and spoken codes were administered to assess the ability to access number sense from symbolic numbers. More particularly, these tasks investigated the direct association between a symbolic number and the corresponding numerosity. Two numbers were presented on the computer screen and children were asked to decide if they represented the same numerosity or not. Compared to the magnitude comparison, this task was cognitively more demanding. First, the concurrent processing of two different modalities within the same trial is complex, as pointed out by Lyons, Ansari, & Beilock (2012). Second, while there is only one response choice in the magnitude comparison task, the magnitude judgement task requires a response between two possible choices (i.e. same numerosity or not), which adds to the processing load. As shown by Dietrich et al. (Dietrich, Huber, Nuerk, 2015), adults are less successful in judgment than in comparison tasks with numbers, suggesting that the first one is more difficult.

In the Arabic code, a set of dots and an Arabic number were presented on the computer screen and the children had to decide if the two numbers (set of dots and Arabic number) represented the same numerosity or not. In the spoken code, a set of dots and an earphone picture were presented on the computer screen; at the same time, the children listened to a spoken number and had to decide if the two numbers (set of dots and spoken number) represented the same numerosity or not.

Stimuli, separated by a 2-cm space, consisted of a black square (10-cm sides) containing a set of blue dots (left stimulus) and a white square containing a black Arabic number in the Arabic code (Calibri, 22 millimeters) or a yellow earphone picture in the spoken code (right stimulus).

Magnitude judgments were performed on pairs in which the numbers varied from 1 to 9. The 18 pairs varied along two numerical sizes: 9 small pairs with 1 to 4 dots, and 9 large pairs with 5 to 9 dots. Different pairs also varied along three ratios of dots: 3 pairs with ratio 1/2, 3 pairs with ratio 2/3, and 3 pairs with ratio 3/4. The side on which the largest number was presented in pairs with two different numbers was counterbalanced: each

pair appeared twice, once in ascending (e.g., 1-2) and once in descending (e.g., 2-1) order, for a total of 36 pairs. Pairs were presented in random order. Five practice trials were offered to allow the children to become familiar with the task.

Each trial started with the presentation of the pair, remaining on the screen until response or until 4000 milliseconds, and followed by a 500-millisecond delay. Green and red stickers were respectively stuck on the left Ctrl key and the right Ctrl key of the keyboard. As this task required choosing between two possible responses (“yes, it is a number” or “no, it is not a number”), one displayed on the left and one displayed on the right side, the children were asked to respond by pressing the left Ctrl key button for the answer “yes” or the right Ctrl key for the answer “no”. Responses and latencies were recorded by the computer.

## Results

### *Magnitude comparison of symbolic numbers*

A 2 (Group: TD vs. DD) x 3 (Numerosity: Small vs. Medium vs. Large) x 2 (Code: Arabic vs. Spoken) ANOVA was performed on the mean number of correct responses. The analysis revealed a significant Group effect ( $F(1, 59) = 7.700, p = .007, \eta_p^2 = .115$ ), indicating that children with DD were less successful than TD children (TD: Mean (SD) = 0.88 (.09); DD: Mean (SD) = 0.86 (.13)). However, there was no Code effect ( $F(1, 59) = 3.983, p = .061, \eta_p^2 = .063$ ) or Numerosity effect ( $F(2, 118) = 0.204, p = .815, \eta_p^2 = .003$ ), as well as no interaction. The Group effect disappeared with non-verbal reasoning as well as reading and spelling variables as covariates; it remained significant when each of the other cognitive variables was introduced as covariate. A 2 (Group: TD vs. DD) x 3 (Numerosity: Small vs. Medium vs. Large) x 2 (Code: Arabic vs. Spoken) ANCOVA was performed on response latencies with reaction time as covariate. The analyses revealed no Group effect ( $F(1, 58) = 1.846, p = .180, \eta_p^2 = .031$ ), a Numerosity effect ( $F(2, 116) = 22.978, p = 3.923E-9, \eta_p^2 = .284$ ), a Code effect ( $F(1, 58) = 250.103, p = 1.1070E-22, \eta_p^2 = .812$ ), and no interaction. Children were faster for small than medium than large numerosities, as well for Arabic than spoken numbers. The mean response latency was 955 milliseconds for Arabic numbers and 3890 m for spoken numbers.

### *Magnitude judgment on analogic-symbolic numbers association*

A 2 (Group: TD vs. DD) x 2 (Numerosity: Small vs. Medium) x 2 (Code: Arabic vs. Spoken) ANOVA was performed on the mean number of correct responses. The analyses revealed a significant Group effect ( $F(1, 59) = 7.174, p = .010, \eta_p^2 = .108$ ), indicating that children with DD were less successful than TD children (TD: Mean (SD) = 0.79 (.19); DD: Mean (SD) = 0.73 (.23)). A Numerosity effect ( $F(1, 59) = 165.515, p = 9.053E-19, \eta_p^2 = .737$ ) was also observed. No Code effect ( $F(1, 59) = 1.989, p = .164, \eta_p^2 = .033$ ), and no interaction was

observed. The Group effect disappeared with reading and spelling variables as covariates; it became marginal with non-verbal reasoning and verbal working memory variables as covariates; finally, it remained significant when the other cognitive variables were introduced as covariates. A 2 (Group: TD vs. DD) x 2 (Numerosity: Small vs. Medium) x 2 (Code: Arabic vs. Spoken) ANCOVA was performed on response latencies with reaction time as covariate. The analyses revealed a Group effect ( $F(1, 58) = 8.590, p = .005, \eta_p^2 = .129$ ), a Numerosity effect ( $F(1, 58) = 9.484, p = .003, \eta_p^2 = .141$ ), a Code effect ( $F(1, 58) = 11.146, p = .001, \eta_p^2 = .161$ ), and no interaction. Children were faster for small than medium numerosities, as well for Arabic than spoken numbers. The mean response latency was 1285 milliseconds for Arabic numbers and 2028 m for spoken numbers.

## **PRODUCTION OF NUMBERS**

### **Tasks and materials**

#### *Analogic-to-symbolic number transcoding*

Two tasks were administered to assess symbolic number production from analogic numerosities. These tasks involved numerosity recognition as well as production of symbolic (Arabic or spoken) numbers. A set of dots (black squares (10-cm sides) which contained a set of blue circles) was presented on the computer screen. Children were asked to estimate the numerosity represented by the dots by writing (without counting) the corresponding Arabic number on a sheet of paper (Arabic code) or by orally producing the corresponding spoken number (spoken code).

Number production was performed on sets in which the number of dots varied from 1 to 99. The 30-dot sets varied along three numerical sizes: 10 small numerosities with 1 to 4 dots (1, 1, 2, 2, 2, 3, 3, 3, 4, 4) were contrasted with 10 medium numerosities with 5 to 9 dots (5, 5, 6, 6, 7, 7, 8, 8, 9, 9) and with 10 large numerosities with 10 to 99 dots (12, 17, 26, 31, 46, 53, 64, 79, 85, and 98 for the Arabic code; 13, 18, 25, 32, 47, 51, 66, 74, 89, and 94 for the spoken code). Because of the nature of the task and the small size of dots sets, it was highly probable that children transcode small numerosities by counting dots. Therefore, in this task, we expected that children with DD would be as successful as TD children in this condition of small numerosities.

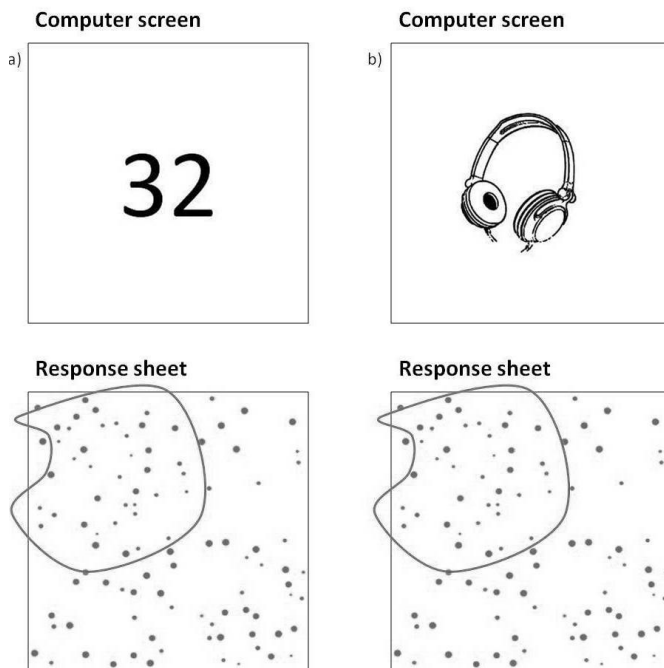
They were presented in random order. Five practice trials were offered to allow the children to become familiar with the task.

Each trial started with the presentation of a set of dots, remaining on the screen until response or until 4000 milliseconds, and followed by a 500-millisecond delay. Because it was an estimation task and an exact

response could not be expected, it was not possible to consider true or false responses in analyses. Therefore, a ratio (child's response / target number) between child's response and the target number was first calculated (for example, a ratio of 0.5 corresponded to a response of 6 for the target number 12). Second, the absolute distance (ADR) between the child's calculated ratio and the perfect ratio 1 was calculated:  $ADR = 1 - \text{child's response} / \text{target number}$ . Finally, response time was also recorded by the experimenter, who pressed a response key as soon as the child started his/her response. This measure was used in the study by Reeve, Reynolds, Humberstone, and Butterworth (2012), who also recorded children's answers with a digital video camera. The correlation between reaction time measures for the two recording methods was very high ( $r = .99$ ); therefore, the key press method was considered an efficient way to record reaction time.

#### *Symbolic-to-analogic number transcoding*

Two tasks were administered to assess analogic number production from a symbolic number. These tasks involved symbolic number (Arabic or spoken) recognition, as well as production of numerosities in an analogic format. In the Arabic code, an Arabic number (Calibri, 22 millimeters) was presented on the computer screen. In the spoken code, an earphone picture was presented on the computer screen and the children listened to a spoken number. Then they were asked to quickly circle with a pencil (without counting) the corresponding number of dots on a sheet of paper on which a set of one hundred dots was drawn. An illustration of the task in each code is presented in Figure 4.



**Figure 4.** Illustration of the Arabic-to-analogic number transcoding task (a) and the spoken-to-analogic number transcoding task (b)

Numerosities varied from 1 to 99. The 30 numbers varied along three numerical sizes: 10 small numerosities with 1 to 4 dots (1, 1, 2, 2, 2, 3, 3, 3, 4, 4) were contrasted with 10 medium numerosities with 5 to 9 dots (5, 5, 6, 6, 7, 7, 8, 8, 9, 9) and with 10 large numerosities with 10 to 99 dots (12, 17, 26, 31, 46, 53, 64, 79, 85, and 98 for the Arabic code; 11, 19, 24, 33, 48, 52, 65, 76, 87, and 95 for the spoken code). Stimuli were presented in random order. Five practice trials were offered to allow the children to become familiar with the task.

Each trial started with the presentation of symbolic numbers, remaining on the screen until response or until 7000 milliseconds, and followed by a 500-millisecond delay. With respect to the analyses of responses, the ADR was calculated.

## Results

### *Analogic-to-symbolic number transcoding*

First, a 2-sample test for equality of proportions, with continuity correction using the prop.test R 3.2.2 ([www.r-project.org](http://www.r-project.org)), was performed in Arabic and spoken modalities for children whose ADR was perfect (i.e. equal to 0) for small numerosities. As expected, the proportion of TD children who got a perfect ADR equal to 0 in Arabic (35/37, 94.6 %) and spoken (36/37, 97.3 %) code was equivalent to that of children with DD (Arabic numbers: 22/24, 91.7 %;  $p = 1.000$  / Spoken numbers: 21/24, 87.5 %;  $p = .327$ ).

A 2 (Group: TD vs. DD) x 2 (Numerosity: Medium vs. Large) x 2 (Code: Arabic vs. Spoken) ANOVA was performed on the ADR. The analysis revealed a significant Group effect ( $F(1, 59) = 7.804, p = .007, \eta_p^2 = .117$ ), indicating that the ADR was larger in children with DD than in TD children (TD: Mean (SD) = 0.17 (.22); DD: Mean (SD) = 0.23 (.27)), and a significant Numerosity effect ( $F(1, 59) = 49.70, p = 2.227E-9, \eta_p^2 = .457$ ), indicating that the children's ADR was significantly larger for large than medium numerosities. A Code effect was also observed ( $F(1, 59) = 6.962, p = .011, \eta_p^2 = .106$ ), indicating that the children's ADR was smaller for spoken than Arabic numbers. No interaction was observed. The Group effect disappeared with reading and spelling as covariates, but remained significant when each of the other cognitive variables was introduced as covariate. A 2 (Group: TD vs. DD) x 3 (Numerosity: Small vs. Medium vs. Large) x 2 (Code: Arabic vs. Spoken) ANOVA was performed on response latencies. The analyses revealed no Group effect ( $F(1, 59) = 1.226, p = .273, \eta_p^2 = .020$ ), a Numerosity effect ( $F(2, 118) = 604.237, p = 1.004E-62, \eta_p^2 = .911$ ), a Code effect ( $F(1, 59) = 203.238, p = 9.049E-21, \eta_p^2 = .775$ ), and no interaction. Children were faster for small than medium than large numerosities, as well for Arabic than spoken numbers. The mean response latency was 1237 milliseconds for Arabic numbers and 3704 m for spoken numbers.

### *Symbolic-to-analogic number transcoding*

First, a 2-sample test for equality of proportions with continuity correction using the `prop.test`, R 3.2.2 was performed in Arabic and spoken modalities for children whose ADR was perfect (i.e. equal to 0) for small numerosities. As expected, the proportion of DD children who got a perfect ADR equal to 0 in Arabic (26/37, 70.3 %) and spoken (20/37, 54.1 %) codes was equivalent to that of children with DD (Arabic numbers: 12/24, 50.0 %;  $p = .190$  / Spoken numbers: 11/24 = 45.8 %;  $p = .715$ ).

A 2 (Group: TD vs. DD) x 2 (Numerosity: Medium vs. Large) x 2 (Code: Arabic vs. Spoken) ANOVA was performed on the ADR (see Figure 5). The analysis revealed a significant Group effect ( $F(1, 59) = 21.479$ ,  $p = 2.024E-5$ ,  $\eta_p^2 = .267$ ), indicating that the ADR was larger in children with DD, than in TD children, and a significant Numerosity effect ( $F(1, 59) = 6.915$ ,  $p = .011$ ,  $\eta_p^2 = .105$ ), indicating that the children's ADR was significantly larger for large than medium numerosities. No Code effect was observed ( $F(1, 59) = 1.006$ ,  $p = .320$ ,  $\eta_p^2 = .017$ ), indicating that the children with DD were as successful for Arabic as for spoken numbers. Furthermore, a significant Group x Numerosity interaction was observed ( $F(1, 59) = 4.425$ ,  $p = .040$ ,  $\eta_p^2 = .070$ ). More precisely, post-hoc analysis showed that, in children with DD, the ADR was similar for medium and large numerosities ( $p = .737$ ), while in TD children, the ADR was larger for large than for medium numerosities ( $p = 3.761E-4$ ). This Group x Numerosity interaction disappeared with reading and spelling as covariates; it became marginal with non-verbal reasoning and visuospatial working memory as covariates; finally, it remained significant when each other cognitive variable was introduced as covariate. A 2 (Group: TD vs. DD) x 3 (Numerosity: Small vs. Medium vs. Large) x 2 (Code: Arabic vs. Spoken) ANOVA was performed on response latencies. The analyses revealed no Group effect ( $F(1, 59) = 3.632$ ,  $p = .062$ ,  $\eta_p^2 = .058$ ), a Numerosity effect ( $F(2, 118) = 127.451$ ,  $p = 3.288E-30$ ,  $\eta_p^2 = .684$ ), a Code effect ( $F(1, 59) = 50.331$ ,  $p = 1.872E-9$ ,  $\eta_p^2 = .460$ ), and no interaction. Children were faster for small than medium than large numerosities, as well for Arabic than spoken numbers. The mean response latency was 2484 milliseconds for Arabic numbers and 5122 m for spoken numbers.

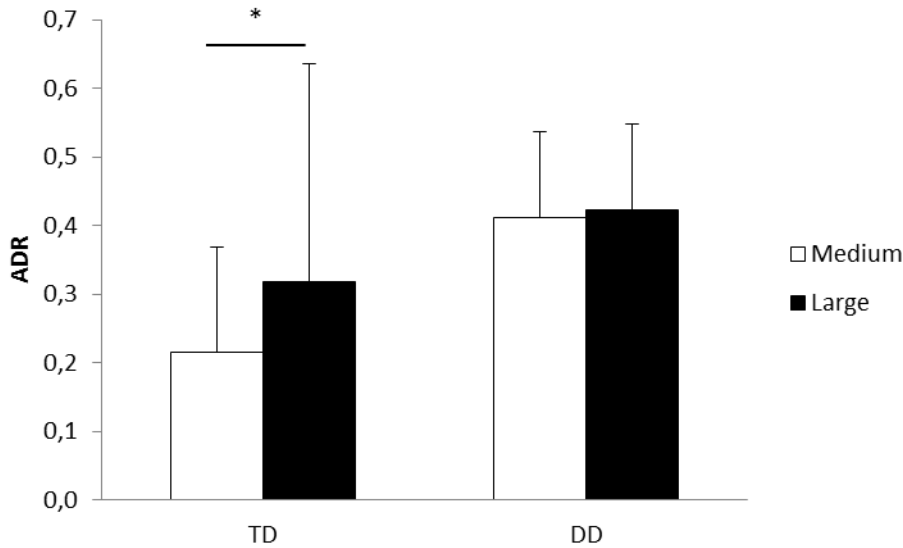


Figure 5. TD and DD performances on Symbolic-to-Analogic number transcoding tasks

## RECOGNITION OF SYMBOLIC NUMBERS

### Tasks and materials: Lexical decision on symbolic numbers

Two lexical decision tasks were administered to assess the recognition of symbolic numbers. In the Arabic code, a symbol was presented on the computer screen. In the spoken code, an earphone picture was presented on the computer screen; at the same time, children listened to a spoken symbol. In both tasks, children were asked to decide if the symbol seen or heard was a number or not.

In the Arabic code, stimuli consisted of a white square containing digits (1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 presented twice), letters (A, B, C, D, E, F, G, H, J), or mathematical signs (+, -, x, ÷, =, ≠, <, >, //), written in black, for a total of 36 stimuli. In the spoken code, stimuli were digits (1 (/œ̃/), 2 (/dœ/), 3 (/tɛwa/), 4 (/katɛ/), 5 (/sɛk/), 6 (/sis/), 7 (/sct/), 8 (/ɥit/), 9 (/nœf/), presented twice), monosyllabic words (en 'in' (/ɛ/), beau 'beautiful' (/bo/), bruit 'noise' (/bɛɥi/), pauvre 'poor' (/povɛ/), fonte 'melting' (/fɔ̃t/), fauve 'tawny' (/fov/), chaque 'each' (/ʃak/), hyène 'hyena' (/jɛn/), mousse 'foam' (/mus/), or non-words (u (/y/), ti (/ti/), prui (/pɛɥi/), toupre (/tupɛ/), zomp (/zɔ̃p/), chup (/ʃup/), fat (/fat/), hiap (/jap/), mosse /mɔs/) for a total of 36 stimuli. Words and pseudo-words were selected to resemble digit names with respect to number and nature of phonemes as well as syllabic structure. Furthermore, words were controlled in frequency with regard to numbers from the basis Lexique 3 (New, et al., 2001).

Stimuli were presented in random order for each participant. Five practice trials were offered to allow the children to familiarize themselves with the task. Each trial started with the presentation of the digit, remaining

on the screen until response (in the Arabic code only) or until 4000 milliseconds, and followed by a 500-millisecond delay. Children were asked to respond by pressing the button on the side of the correct response (i.e., on the left green button to answer “yes, it is a digit”, or on the right red button to answer “no, it is not a digit”). Responses were recorded by the computer.

## Results

A 2 (Group: TD vs. DD) x 2 (Code: Arabic vs. Spoken) ANOVA was performed on the mean number of correct responses. The analyses revealed a significant Group effect ( $F(1, 59) = 4.583, p = .036, \eta_p^2 = .072$ ) indicating that children with DD were less successful than TD children (TD: Mean (SD) = 0.95 (.08); DD: Mean (SD) = 0.93 (.09)). No Code effect ( $F(1, 59) = 3.140, p = .082, \eta_p^2 = .051$ ) and no interaction ( $F(1, 59) = 1.710, p = .196, \eta_p^2 = .028$ ) were observed. The Group effect disappeared with non-verbal reasoning (i.e., Raven's Colored Progressive Matrices), reading and spelling, and word comprehension and production as covariates; it became marginal with visuospatial short-term memory, as well verbal working memory variables as covariates; finally, it remained significant when processing speed, visuospatial working memory, and verbal short term memory were introduced as covariates. A 2 (Group: TD vs. DD) x 2 (Code: Arabic vs. Spoken) ANCOVA was performed on response latencies with reaction time as covariate. The analyses revealed no Group effect ( $F(1, 58) = 3.290, p = .075, \eta_p^2 = .054$ ), a Code effect ( $F(1, 58) = 70.255, p = 1.408E-11, \eta_p^2 = .548$ ), and no interaction ( $F(1, 58) = 5.749E-5, p = .994, \eta_p^2 = 9.912E-7$ ). Children were faster for Arabic than spoken numbers. The mean response latency was 793 milliseconds for Arabic numbers and 1659 m for spoken numbers.

## SUMMARY

The children with DD had poorer performances than TD children in all symbolic numerical tasks. In symbolic number recognition, children with DD were impaired for Arabic and spoken numbers. For number comprehension, they had poorer performances than TD children, regardless of numerical code, numerical size, and the task. Compared to TD children, children with DD were impaired in the production and estimation of medium and large numbers, regardless of the numerical code.

## DISCUSSION

In this study, we investigated the processing of symbolic numbers in children with dyscalculia. In addition to cognitive, linguistic and mathematic tests, the children were administered experimental tasks involving symbolic number recognition, comprehension and production designed to answer the following research

questions: 1) Is dyscalculia a deficit affecting Arabic number processing and/or spoken number processing? and 2) Is dyscalculia a deficit affecting number recognition, number access and/or number production?

In summary, results showed that children with DD had poorer performances than TD children in all symbolic numerical tasks. In number recognition, they were impaired for Arabic and spoken numbers. For number access, children with DD had lower performances than TD children, regardless of the numerical code, the task, and the size of numerosity. Compared to TD children, children with DD were also impaired in the production and estimation of medium and large symbolic numbers, regardless of the Arabic or spoken numerical code. These results are the first to show that children with DD not only presented with an Arabic number processing deficit but also with a spoken number processing deficit and a recognition number deficit. Altogether, they suggested that children with DD had a general symbolic number processing impairment.

With regard to our first research question, our results clearly suggest that dyscalculia is not limited to a specific code but affects both Arabic and spoken symbolic numbers. The present study was thus in line with studies showing that children with DD had difficulty with Arabic (e.g., De Smedt & Gilmore, 2011) and spoken numbers (e.g., Olkun et al., 2015). Noël and Rousselle (2011) suggested that dyscalculia is a specific deficit in the access to number sense from Arabic numbers. Results of the present study suggest that this number sense access deficit was observed for Arabic, but also for spoken numbers. In the four-step developmental model of number acquisition (Von Aster & Shalev, 2007), spoken numbers are acquired before Arabic numbers. Therefore, it is logical to assume that impairment in processing spoken numbers, as we reported in this study, could lead to further impairment in processing Arabic numbers. Future studies should address this question.

For the second research question concerning numerical processes, our results are the first to show that dyscalculia affects number recognition, number access and number production. First, with respect to number access, our results were in agreement with those reported by De Smedt and Gilmore (2011), Landerl and Kölle (2009), and Rousselle and Noël (2007), who found that children with DD had difficulty comparing Arabic numbers. Indeed, children with DD in the present study were less successful and slower than TD children not only in Arabic but also in spoken number comparison and judgment, pointing to a number comprehension deficit in both symbolic codes. Furthermore, children with DD presented with difficulties in the Magnitude judgment on analogic-symbolic numbers association task, suggesting an impairment in mapping non-symbolic numerosities to symbolic numbers. This result was consistent with results recently reported by Wong, Ho, and Tang (2015), who found that Chinese children with DD also showed deficits in number-magnitude mapping. Overall, our results suggested that children with DD had a deficit in understanding symbolic numbers and mapping them with numerosities (i.e., number sense).

Second, with respect to number production, our results also confirmed those of studies showing that children with DD were impaired in tasks consisting of transcoding numerosities in spoken numbers (for example, Olkun et al., 2015; Mazzocco et al., 2011; and Mejias et al., 2011). In our study, we found that children with DD were less precise than TD children when asked to produce numbers in both analogic-to-symbolic and symbolic-to-analogic number transcoding tasks. Our results indeed showed that, compared to TD children, children with DD were less precise in producing medium and large numerosities in analogic-to-symbolic and symbolic-to-analogic number transcoding tasks. Furthermore, whereas TD children clearly showed better performance to produce medium than large numerosities, it was not the case for children with DD. These results strongly suggested a deficit in estimation (intuitive, fast, and approximate ability to perceive and identify large collections of more than 5 objects) (Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004) and were in agreement with those reported by Mazzocco et al. (2011) and Mejias et al. (2011), who noted impairment in estimating large numerosities in children with DD. Moreover, children with DD in our study were not able to identify and transcode medium numerosities in symbolic numbers, in line with what was found by Olkun et al. (2015) in 6–10-year-old children. Small numerosities from 5 to 9 have a particular status because they can be subitized and accurately identified through repeated exposure (Clements, 1999). Our results suggested that children with DD did not adequately develop this capacity to identify medium numerosity by exposition.

Finally, with respect to number recognition, our results pointed to a deficit in recognizing Arabic and spoken numbers in children with DD. Recognition is a prerequisite for all subsequent number processing abilities. Having difficulty recognizing numbers would thus lead to subsequent impairment in the automatic access to number sense. In other words, a deficit at this processing stage would compromise symbolic number comprehension and production. To our knowledge, this is the first study to show the presence of number recognition impairment in children with DD.

Children with DD in the present study also presented with cognitive, linguistic, and reading and spelling difficulties, in addition to mathematical difficulties. Furthermore, most of the Group effects disappeared when the reading and spelling performances were entered as covariates of the analyses. It was not surprising because a high comorbidity of dyscalculia and other developmental deficits such as dyslexia has been frequently reported (Gross-Tsur et al., 1996). Thus, our results provide support to the hypothesis that DD is caused by multiple numerical and general cognitive deficits, such as a working memory deficit or executive deficit (Geary, 1993, 2010). Future studies should explore how general cognitive abilities could influence number sense abilities in children with and without DD.

In conclusion, the present study showed that children with DD had poorer performances than those of TD children in all symbolic numerical tasks, regardless of the numerical codes. To our knowledge, this is the first

study to show that children with DD had a symbolic number deficit affecting number access and production abilities, highly suggestive of a deficit in the access to number sense from Arabic and spoken symbolic numbers. Such a deficit is congruent with results recently reported by Lafay, St-Pierre, Macoir (2016) who also showed a deficit in the access to the mental number line from Arabic and spoken numbers in children with DD. Furthermore, they also showed impairment in symbolic number recognition. Thus, these children presented with a primary deficit affecting the recognition of symbolic numbers, which entailed impairment of symbolic number comprehension and production.

The present study has some limitations. First, children of TD and DD groups were not paired according to gender and socioeconomic environment. Considering their possible influence on the results in each group, further studies controlling for these variables are needed. Second, children were allowed to provide a response within many seconds (4 seconds in Judgment tasks; 7 seconds in transcoding tasks), although they were explicitly asked to answer as quickly as possible. Several examples were also given to encourage children to proceed as fast as possible and to prevent them from counting. Moreover, children answered within 1749 ms for small numerosities and 2028 ms for medium numerosities in judgment task. Such response latency made it highly unlikely the use of a counting strategy. Such response latencies are congruent with Mandler & Shebo, (1982) who showed that small and medium numerosities were subitized within two seconds. Longer latencies were however recorded (2484 ms for small numerosities to 5122 ms for large numerosities) in the transcoding tasks, due to the nature of the tasks requiring the production of a written or spoken response. Despite these precautions and observations, we cannot completely rule out the possibility that some children had adopted a counting strategy while others actually had "subitized" numerosities. In further research, very short presentation of stimuli should be preferred in order to avoid counting in subitizing assessment. Finally, another limit specifically concerned the Symbolic-to-analogic number transcoding task in which children were asked to estimate the numerosity represented by the Arabic or the spoken numbers on the screen by quickly circling with the pencil the same number of dots on a sheet of paper. However, the number of dots on the sheet of paper (i.e. 100) and the numbers presented on the computer screen (varying from 1 to 99) allowed only the production of underestimation errors. In further studies, tasks allowing for under- and over-estimation errors should be used to better assess analog number production.

The present study begs various other research questions. Further studies should first examine how the development of Arabic numbers is independent of or linked to the development of spoken numbers. According to the developmental model of number acquisition (Von Aster & Shalev, 2007), Arabic numbers are acquired after spoken numbers and impairment of Arabic number processing could be the consequence of impairment of spoken number processing. This assumption needs to be tested. In our study, both symbolic codes are affected in children with DD and further studies are needed to disentangle the two processes. Moreover,

further studies should investigate how symbolic number deficits are implied in different mathematical difficulties in children with DD and, more precisely, which is the implication of Arabic number processing and that of spoken number processing. Studies with younger children in a longitudinal paradigm could be useful in examining these questions. Also, future studies should examine what effects number deficits in children with DD have on the development of the mental number line. According to the developmental model of number acquisition (Von Aster & Shalev, 2007), the three steps (analogic, spoken and Arabic number processes) are necessary preconditions for the fourth step, which consists of developing a mature mental number line. One could legitimately ask, therefore, if symbolic number impairment in children with DD has an impact on their numerical mental representation, and more specifically on their mental number line.

### **Ethics**

The present study was approved by the Ethics Committee of the Research for the Institut Universitaire en Santé Mentale de Québec.

### **Acknowledgements**

We thank for their collaboration all the children of the participating schools of Quebec: La Mosaïque, St Fidèle, La Farandole, St Pierre et St Laurent de l'île d'Orléans, Sous bois, St Jean Baptiste, Cap Soleil et St-Pierre, L'Orée des bois, Trivent, and Institut Saint-Joseph.

### **References**

- American Psychiatric Association (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-5)*. Arlington, VA: APA.
- Badian, N. (1999). Persistent Arithmetic, Reading, or Arithmetic and Reading Disability. *Annals of Dyslexia*, 49, 45–70.
- Barbarelli, W. J., Katusic, S. K., Colligan, R. C., Weaver, A. L., & Jacobsen, S. J. (2005). Math learning disorder: incidence in a population-based birth cohort, *Ambulatory Pediatrics*, 5(5), 281–9. <http://doi.org/10.1367/A04-209R.1>
- Chan, W. W. L., Au, T. K., & Tang, J. (2013). Developmental dyscalculia and low numeracy in Chinese children. *Research in Developmental Disabilities*, 34(5), 1613–1622. <http://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.01.030>
- Clements, D. H. (March 1999). *Subitizing: What is it? Why teach it? Teaching Children Mathematics*. Reston, VA: National Council of Teachers of Mathematics.
- Cogni-science (2010). *BALE : Batterie Analytique du Langage Écrit*. Grenoble [http://www.cognisciences.com/article.php3?id\\_article=81](http://www.cognisciences.com/article.php3?id_article=81).

- Corsi, P. M. (1972). *Human memory and the medial temporal region of the brain*. Montreal: McGill University.
- Davidse, N. J., de Jong, M. T., Shaul, S., & Bus, A. G. (2014). A twin-case study of developmental number sense impairment. *Cognitive Neuropsychology*, 30, 1–16. <http://doi.org/10.1080/02643294.2013.876980>
- De Smedt, B., & Gilmore, C. K. (2011). Defective number module or impaired access? Numerical magnitude processing in first graders with mathematical difficulties. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(2), 278–92. <http://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.09.003>
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1–42.
- Dehaene, S. (2010). *La bosse des maths, 15 ans après*. Paris: Odile Jacob.
- Dellatolas, G., & Von Aster, V. (2006). *Zareki-R, Batterie pour l'évaluation du traitement des nombres et du calcul chez l'enfant*. Paris: ECPA.
- Desoete, A., Ceulemans, A., De Weerd, F., & Pieters, S. (2012). Can we predict mathematical learning disabilities from symbolic and non-symbolic comparison tasks in kindergarten? Findings from a longitudinal study. *Issue British Journal of Educational Psychology*, 82(1), 64–81. doi: 10.1348/2044-8279.002002
- Devine, A., Soltész, F., Nobes, A., Goswami, U., & Szűcs, D. (2013). Gender differences in developmental dyscalculia depend on diagnostic criteria. *Learning and Instruction*, 27, 31–39. <http://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2013.02.004>
- Dietrich, J. F., Huber, S., & Nuerk, H.-C. (2015). Methodological aspects to be considered when measuring the approximate number system (ANS) – a research review. *Frontiers in Psychology*, 6, 1–14. <http://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00295>
- Dirks, E., Spyer, G., Van Lieshout, E. C. D. M., & De Sonneville, L. (2008). Prevalence of combined reading and arithmetic disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 41(5), 460–73. <http://doi.org/10.1177/0022219408321128>
- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. S. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307–14. <http://doi.org/10.1016/j.tics.2004.05.002>
- Ferreira, F., Wood, G., Pinheiro-Chagas, P., Lonnemann, J., Krinzinger, H., Willmes, K., & Haase, V. (2012). Explaining school mathematics performance from symbolic and nonsymbolic magnitude processing: similarities and differences between typical and low-achieving children. *Psychology and Neuroscience*, 5(1), 37–46. <http://doi.org/10.3922/j.psns.2012.1.06>
- Forster, K. I., & Forster, J. C. (2003). DMDX: a windows display program with millisecond accuracy. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 35(1), 116–24. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12723786>
- Fortin, L., Royer, É., Potvin, P., Marcotte, D., & Yergeau, É. (2004). La prédiction du risque de décrochage scolaire au secondaire: Facteurs personnels, familiaux et scolaires. *Canadian Journal of Behavioural Science*, 36(3), 219–231. <http://doi.org/10.1037/h0087232>
- Geary, D. C. (1993). Mathematical disabilities: Cognitive, neuropsychological, and genetic components. *Psychological Bulletin*, 114(2), 345–362. <http://doi.org/10.1037/0033-2909.114.2.345>

- Geary, D. C. (2010). Mathematical Disabilities: Reflections on Cognitive, Neuropsychological, and Genetic Components. *Learning and Individual Differences*, 20(2), 130–133. <http://doi.org/10.1016/j.lindif.2009.10.008>
- Gross-Tsur, V., Manor, O., & Shalev, R. S. (1996). Developmental dyscalculia: prevalence and demographic features. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 38(1), 25–33. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8606013>
- INSERM (2007). *Dyslexie, Dysorthographe, Dyscalculie. Bilan des données scientifiques*. Paris.
- Isaacs, E. B., & Vargha Khadem, F. (1989). Differential course of development of spatial and verbal memory span: a study normative. *British Journal of Developmental Psychology*, 7, 377–380. doi: 10.1111/j.2044-835X.1989.tb00814.x
- Khomsî, A. (2001). *Évaluation du Langage Oral*. Paris: ECPA.
- Lafay, A., St-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (2016). The mental number line in dyscalculia: Impaired number sense or access from symbolic numbers? *Journal of Learning Disabilities*.
- Lafay, A., St-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (in press). Performances moyennes des enfants franco-québécois de 8-9 ans au test mathématique Zareki-R, *Glossa*.
- Lafay, A., St-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (2015). Revue narrative de littérature relative aux troubles cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale : déficit du sens du nombre ou déficit de l'accès aux représentations numériques mentales. *Canadian Psychology / Psychologie Canadienne*, 56(1), 96–107.
- Landerl, K., Fussenegger, B., Moll, K., & Willburger, E. (2009). Dyslexia and dyscalculia: two learning disorders with different cognitive profiles. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(3), 309–24. <http://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.03.006>
- Landerl, K., & Kölle, C. (2009). Typical and atypical development of basic numerical skills in elementary school. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(4), 546–65. <http://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.12.006>
- Lewis, C., Hitch, G. J., & Walker, P. (1994). The prevalence of specific arithmetic difficulties and specific reading difficulties in 9- to 10-year-old boys and girls. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 35(2), 283–92. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8188799>
- Lyons, I. M., Ansari, D., & Beilock, S. L. (2012). Symbolic estrangement: evidence against a strong association between numerical symbols and the quantities they represent. *Journal of Experimental Psychology*, 141(4), 635–41. <http://doi.org/10.1037/a0027248>
- Mandler, G., & Shebo, B. J. (1982). Subitizing: an analysis of its component processes. *Journal of Experimental Psychology*, 111(1), 1–22. <http://doi.org/10.1037/0096-3445.111.1.1>
- Mazzocco, M. M. M., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Impaired acuity of the approximate number system underlies mathematical learning disability. *Child Development*, 82(4), 1224–37. <http://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2011.01608.x>

- Mejias, S., Mussolin, C., Rousselle, L., Grégoire, J., & Noël, M.-P. (2011). Numerical and nonnumerical estimation in children with and without mathematical learning disabilities. *Child Neuropsychology*, 37–41. <http://doi.org/10.1080/09297049.2011.625355>
- Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport (MELS) (2013). *Indices de défavorisation*. Québec, QC: Gouvernement du Québec.
- Mussolin, C., Mejias, S., & Noël, M.-P. (2010). Symbolic and nonsymbolic number comparison in children with and without dyscalculia. *Cognition*, 115(1), 10–25. <http://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.10.006>
- New, B., Pallier, C., Ferrand, L., & Matos, R. (2001). Une base de données lexicales du français contemporain sur internet: LEXIQUE™//A lexical database for contemporary french: LEXIQUE™. *L'année Psychologique*, 101(3), 447-462.
- Noël, M.-P., & Rousselle, L. (2011). Developmental Changes in the Profiles of Dyscalculia: An Explanation Based on a Double Exact-and-Approximate Number Representation Model. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5, 165. <http://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00165>
- Noël, M.-P., Rousselle, L., & De Visscher, A. (2013). La dyscalculie développementale : à la croisée de facteurs numériques spécifiques et de facteurs cognitifs généraux. *Développements*, 15, 24–31.
- Olkun, S., Altun, A., & Şahin, S. G. (2015). Beyond Subitizing : Symbolic Manipulations of. *International Journal of Learning, Teaching and Educational Research*, 10(1), 93–103.
- Piazza, M., Facoetti, A., Noemi, A., 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. <http://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.03.012>
- Price, G. R., Holloway, I. D., Räsänen, P., Vesterinen, M., & Ansari, D. (2007). Impaired parietal magnitude processing in developmental dyscalculia. *Current Biology*, 17(24), R1042–3. <http://doi.org/10.1016/j.cub.2007.10.013>
- Raven, J. C. (1977). *Standard Progressive Matrices. Manuel PM47*. Issy-les-Moulineaux: Éditions ESP.
- Reeve, R., Reynolds, F., Humberstone, J., & Butterworth, B. (2012). Stability and Change in Markers of Core Numerical Competencies. *Journal of Experimental Psychology*. <http://doi.org/10.1037/a0027520>
- Rousselle, L., & Noël, M.-P. (2007). Basic numerical skills in children with mathematics learning disabilities: a comparison of symbolic vs non-symbolic number magnitude processing. *Cognition*, 102(3), 361–95. <http://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.01.005>
- Share, D. L., Moffitt, T. E., & Silva, P. a. (1988). Factors Associated with Arithmetic-and-Reading Disability and Specific Arithmetic Disability. *Journal of Learning Disabilities*, 21(5), 313–320. <http://doi.org/10.1177/002221948802100515>
- Schleifer, P., & Landerl, K. (2011). Subitizing and counting in typical and atypical development. *Developmental Science*, 2(14), 280–291. <http://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.00976.x>
- Starkey, P., & Cooper, R. G. (1995). The development of subitizing in young children. *British Journal of Developmental Psychology*, 13, 399–420.

- Von Aster, M., & Shalev, R. S. (2007). Number development and developmental dyscalculia. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 49, 868–873.
- Wong, T. T.-Y., Ho, C. S.-H., & Tang, J. (2015). Defective Number Sense or Impaired Access? Differential Impairments in Different Subgroups of Children With Mathematics Difficulties. *Journal of Learning Disabilities*. <http://doi.org/10.1177/0022219415588851>



## **Chapitre 6. Déficits d'accès à la ligne numérique mentale via les nombres symboliques dans la dyscalculie développementale**

### **Étude 4. The mental number line in dyscalculia: Impaired number sense or access from symbolic numbers?**

Lafay, A., St-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (2016). The mental number line in dyscalculia: Impaired number sense or access from symbolic numbers? *Journal of Learning Disabilities*. DOI: 10.1177/0022219416640783

#### **Résumé**

Les nombres sont manipulés et représentés mentalement le long d'une ligne numérique compressible orientée de gauche à droite. Selon plusieurs études, la dyscalculie est un déficit de la ligne numérique mentale qui se manifeste chez les enfants dyscalculiques par des difficultés à placer des nombres arabes sur une ligne numérique. Cependant, aucune étude n'a été encore menée pour déterminer si les enfants dyscalculiques présentent un déficit intrinsèque de la ligne numérique mentale ou s'ils ont plutôt un déficit d'accès à cette ligne numérique via les codes symboliques (arabe, oral). Des enfants franco-québécois de 8-9 ans dyscalculiques (24) et sans difficulté mathématique (37) ont été évalués avec une tâche de placement de nombres sur une ligne numérique et une tâche de production de nombres à partir d'une position sur une ligne numérique dans les trois modalités (analogique, arabe, oral). Les résultats ont montré que les enfants dyscalculiques produisent un pourcentage d'erreur plus grand que celui de leurs pairs sans difficulté mathématique dans chaque tâche, excepté dans la tâche de placement de nombres analogiques sur une ligne numérique. Ces résultats suggèrent que les enfants dyscalculiques ne présentent pas un déficit intrinsèque de la ligne numérique mentale, mais plutôt un déficit d'accès à cette ligne numérique via les codes symboliques.

#### **Abstract**

Numbers may be manipulated and represented mentally over a compressible number line oriented from left to right. According to numerous studies, one of the primary reasons for dyscalculia is related to improper understanding of mental number line. Children with dyscalculia usually show difficulty when they have to place Arabic numbers on a physical number line. However, it remains unclear if they have a deficit of the mental number line per se or a deficit to access it from non-symbolic and/or symbolic numbers. Quebec French-speaking 8–9-year-old children with (24) and without dyscalculia (37) were assessed with transcoding tasks (number-to-position and position-to-number) designed to assess the acuity of the mental number line with Arabic and spoken numbers, as well as with analogic numerosities. Results showed that children with

dyscalculia produced a larger percentage absolute error than children without mathematics difficulties in every task, except the number-to-position transcoding task with analogic numerosities. Hence, these results suggested that children with dyscalculia do not have a general deficit of the mental number line, but rather a deficit to access it from symbolic numbers.

## INTRODUCTION

Every day, children are exposed to numbers. They count sets of objects, say, read, and write numbers, manage common activities using time, and date, distance measures or even money, etc. People easily – and even automatically – perceive, use, and manipulate numbers in their daily life. Thus, children need to acquire efficient and precise mental numerical representations when they have to deal with Arabic and spoken numbers.

The model of number acquisition (Von Aster & Shalev, 2007) was proposed to account for the development of numerical abilities in children. According to this model, the development of cognitive number representations is achieved from infancy to schooling through four main steps: 1) an inherited basic number sense based on a core-system representation of magnitude (i.e., the quantity to which a number corresponds), 2) the acquisition of number words during preschool, 3) the learning of Arabic symbols in primary school, and 4) the development of a mature mental number line (MNL). This final MNL step is constructed from the linguistic and Arabic number system and comes into play when identifying ordinal positions of numbers with reference to their numerical neighbors. The concept of MNL was prior developed by Dehaene (1992, 2010) in the theoretical triple-code model (Dehaene, 1992, 2010) representing numerical skills in adults. According to this model, numbers may be manipulated and represented mentally in three different codes – Arabic, verbal, and analogic. The Arabic and verbal codes are both symbolic and non semantic (i.e., they do not bear information about numerosity themselves). In the Arabic number form, numbers are manipulated in Arabic format (e.g., 3), allowing to process exact calculation or parity judgment for example. In the verbal code, numbers are manipulated in words (e.g., /three/), allowing counting or process addition and multiplication arithmetic facts for example. Finally, the analogic code is the abstract and amodal representation of the magnitude of non-symbolic numerosities that could be represented internally over a compressible number line oriented from left to right: this code is the MNL, an important component of the “number sense.” Mental number representations obey the Weber-Fechner Law, according to which the mentally represented magnitude is a logarithmic function of the objective number stimulus and which influence people’s performances in numerical processes, especially in discrimination tasks (i.e., the discriminability of two numbers decreases as the magnitude of the numbers increases). The larger the numbers are, the more their mental representation become indistinct. Even if the triple-code model was implemented for adult processes, it also could give a relevant framework for the

understanding of the development and the deficits of numerical skills in children. This model and the one of number acquisition of Von Aster and Shalev (2007) were used as theoretical frameworks in the present study.

Most researchers have investigated children's MNL using the typical number-to-position task. In this kind of task, children were shown a physical number line, with start and end points identified with numbers (e.g., 0 and 100), on which they were asked to mark with a pencil the corresponding position of an Arabic number (Berteletti, Lucangeli, Piazza, Dehaene, & Zorzi, 2010; Booth & Siegler, 2006; Booth & Siegler, 2008; Friso-van den Bos, Kroesbergen, et al., 2015; Laski & Siegler, 2007; Opfer & Siegler, 2007; Siegler & Opfer, 2003; Siegler & Booth, 2004) or a spoken number (Berteletti et al., 2010; Geary, Hoard, Nugent, & Byrd-craven, 2008; Siegler & Opfer, 2003). In fewer studies, researchers used variants of this task such as the reverse position-to-number task (Ashcraft & Moore, 2012; luculano & Butterworth, 2011; Siegler & Opfer, 2003) in which children are shown number lines with a mark and were asked to tell the corresponding number. Researchers hypothesized that children's estimation on or from a physical number line reflects their internal representation of numbers (Siegler & Opfer, 2003). The classical analyses performed on the results obtained in these two tasks examined the fit of linear, logarithmic, and exponential models to the median estimates of children for each of the presented numbers. The linear model corresponds to the linear function and implies that mean estimates should perfectly correspond to numerical magnitudes. The logarithmic model corresponds to the logarithmic function and implies that mean estimates should increase logarithmically with numerical magnitude. The exponential model corresponds to the exponential function and implies that mean estimates should increase exponentially with numerical magnitude. Authors consider that the more linear number curve fit was, the more precise was the MNL acuity.

In studies conducted with children of different ages, researchers showed that MNL acuity is developing with age. For example, children of grade 3 were more successful to place Arabic numbers on a 0-100 number line than those of grade 2, who were better than children of grade 1, who were also better than children in kindergarten (Booth & Siegler, 2006; Booth & Siegler, 2008). Number line placements of children in kindergarten conformed to the logarithmic model (Booth & Siegler, 2006; Booth & Siegler, 2008; Laski & Siegler, 2007), whereas children from grade 1 showed more linear number representations (Booth & Siegler, 2006; Geary et al., 2008; see Siegler & Booth, 2005 for a review).

Many researchers have already highlighted a strong link between the MNL acuity and mathematics performances. For example, Friso-van den Bos, Kroesbergen, et al. (2015) showed that in children from kindergarten to grade 2, those with MNL (assessed with Arabic numbers) fitting the linear model performed better in a standardized mathematics test of word problems solving than children with MNL fitting the logarithmic model. Interestingly, Friso-van den Bos et al. (2015) also showed that this number line task allowed

to distinguish between children who were and who were not at-risk for mathematics difficulties. These authors reported various growth trajectories of the MNL acuity: typical or high performers, who started with high scores and showed a slight increase over time; catch-up children, who started with lower scores on MNL acuity but quickly caught up to a level much closer to typical performers, and at-risk children who started with lower scores, but did not show the quick increase in scores expected after the onset of formal education. Also, it has been shown that the acuity of the MNL of young kindergarten children, assessed with Arabic numbers and analogic numerosities (i.e., sets of dots), was predictive of their exact and approximate calculation abilities (Xenidou-Dervou, Van der Schoot, Van Lieshout, 2014). Furthermore, a correlation was reported between the MNL acuity (measured with Arabic numbers) and performances in addition solving in children of grade 1 (Booth & Siegler, 2008), as well as between the MNL acuity (measured with spoken numbers) and mathematics performances in children from grades 1 to 5 and in adults (Ashcraft & Moore, 2012a). For children in grades 2 and 3, Cowan and Powell (2014) also highlighted a strong relation between the MNL acuity (measured with Arabic numbers) and many arithmetic skills such as basic calculation fluency, written multi-digit computation, and arithmetic word problems. Finally, poor ability to resolve arithmetic word problems orally in grade 2 was predicted by poor estimations of Arabic numbers on number line in children in grade 1 (Reeve, Paul, & Butterworth, 2015). To resume, the MNL acuity, measured with Arabic numbers, appeared to be strongly related with various mathematics performances (basic and written calculation as well as arithmetic word problems solving). Furthermore, some results also suggested a relationship between MNL acuity measured with spoken numbers or with analogic numerosities and mathematics performances.

The integrity of the MNL was also explored in children with dyscalculia. Developmental dyscalculia (DD) is defined in the DSM-V (2013) as a mathematics disorder that interferes with learning and daily life activities. DD is manifested by difficulties affecting various abilities such as counting, enumeration, calculation, problem solving, etc. Studies on children with DD found a prevalence from 1 to 10% (Badian, 1999; Barbaresi, Katusic, Colligan, Weaver, & Jacobsen, 2005; Devine, Soltész, Nobes, Goswami, & Szűcs, 2013; Dirks, Spyer, van Lieshout, & de Sonneville, 2008; Gross-Tsur, Manor, & Shalev, 1996; Lewis, Hitch, & Walker, 1994; Share, Moffitt, & Silva, 1988). People with DD can be marginalized and their social and professional integration affected (Badian, 1999). DD is then frequently attributed to a “number sense” deficit, although this functional origin remains controversial. According to the triple-code model (Dehaene, 1992, 2010), a “number sense” deficit results from an impaired analogic code, or in other words, from an impaired MNL. According to the four-step developmental model of number acquisition (Von Aster & Shalev, 2007), the impairment of number processing, called pure developmental dyscalculia, results either from an impairment of the inherited core-system representation of magnitude (step 1), which corresponds to the MNL in the triple-code model (Dehaene, 1992, 2010), or to an impairment in the acquisition of symbolic numbers (numbers words, step 2; Arabic numbers, step 3). Considering the sequential nature of these steps in mathematical learning, both

impairments lead to an impairment of the MNL (step 4) for which its development is based on the inherited basic number sense and on the intermediate development of domain specific abilities (i.e. symbolic numbers).

In various studies, authors showed that children with dyscalculia actually had difficulties to place symbolic Arabic numbers on a number line. For example, in a number-to-position task with spoken numbers from 1 to 100, 6-8-year-old children with dyscalculia showed a MNL with a logarithmic curve, whereas children without mathematics difficulties had already got linear representations (Geary et al., 2008). Also, Cirino, Fuchs, Elias, Powell, and Schumacher (2015) recently highlighted an impairment of the MNL in 7-8-year-old children with dyscalculia who showed a larger absolute difference between the number placement and the correct position in a number-to-position task with Arabic numbers from 0 to 100. Landerl, Fussenegger, Moll, and Willburger (2009) showed that 9-10-year-old children with dyscalculia had a linear-curve fit of the MNL in a number-to-position task measured with Arabic numbers from 1 to 100, as children without mathematics difficulties. However, compared to these typically developing children who showed linear number representations, they showed difficulties with numbers from 1 to 1000 for which they still had a logarithmic-curve fit of the MNL. Moreover, older children with dyscalculia, aged 10 to 12, had a lesser linear-curve fit of the MNL measured with Arabic numbers than children without mathematics difficulties (Andersson & Östergren, 2012). In one single study, the researchers (Van Viersen, Slot, Kroesbergen, Van't Noordende, & Leseman, 2013) used symbolic numbers in Arabic code and non-symbolic numerosities (sets of dots) in number-to-position tasks to assess MNL acuity in a 9-year-old girl with dyscalculia. Compared to children without mathematics difficulties, this little girl was impaired in every task. Her MNL fitted the logarithmic curve in the symbolic and non-symbolic tasks, whereas it fitted the linear curve of children without mathematics difficulties.

To summarize, studies showed that the MNL acuity, measured with Arabic numbers, is strongly related with mathematics performances in children. Reported studies also showed that children with dyscalculia were impaired in placing spoken and Arabic numbers on a number line. Such a deficit can be interpreted as an impairment of the MNL or as an access impairment to the MNL. An impairment affecting the ability to place symbolic numbers as well as non-symbolic numerosities on a physical number line would rather suggest that the MNL per se is affected. Such an impairment was reported in only one single-case study (Van Viersen et al., 2013). To date, data issued from the literature are not altogether convincing and do not allow to fully understand the functional origin of the MNL acuity deficit in dyscalculia. Dyscalculia is commonly explained by a "number sense" deficit, manifested by difficulties to process non-symbolic numerosities (Dehaene, 1992, 2010). However, according to another explanatory hypothesis, dyscalculia would rather be a specific deficit in the access to number sense from Arabic numbers (Noël & Rousselle, 2011; see also Lafay, St-Pierre, & Macoir, 2014 and Noël, Rousselle, & De Visscher, 2013 for reviews). The present study aimed to identify the functional origin of dyscalculia with tasks tapping the activation of mental representations of numbers and

numerosities. More specifically, this study addressed the following contrasted questions: a) does dyscalculia originate from a deficit of the MNL per se, supporting the number sense deficit hypothesis or, b) does dyscalculia come from a deficit in the MNL access from symbolic numbers, rather supporting the number access deficit hypothesis.

## **THE PRESENT STUDY: OBJECTIVES AND HYPOTHESES**

The present study addressed the two following main issues: 1) is dyscalculia a general MNL deficit, affecting the capacity to process non-symbolic numerosities and symbolic numbers? 2) if not, is dyscalculia a specific deficit in the MNL access from symbolic (Arabic/spoken) numbers. To answer these questions, we investigated the integrity of the MNL in children with dyscalculia through the assessment of their abilities to place symbolic numbers and non-symbolic numerosities on a physical number line (number-to-position transcoding task) and to produce symbolic numbers and non-symbolic numerosities from a physical number line (position-to-number transcoding task).

It was hypothesized that, if dyscalculia is a general deficit of the MNL, children with dyscalculia should be impaired in placing non-symbolic numerosities, as well Arabic and spoken symbolic numbers on a physical number line. On the other hand, if dyscalculia rather pertains to a MNL access deficit from symbolic (Arabic and spoken) numbers, children with dyscalculia should be impaired in placing Arabic and spoken symbolic numbers on a number line, but not with non-symbolic numerosities.

## **MATERIAL AND METHODS**

### **PARTICIPANTS**

Seventy-six 8 or 9-years-old third grade French-speaking children were recruited for this study. They had no history of sensory, physical, neurological, language and/or psychiatric illness. All these children were recruited from eleven French schools in Quebec City, Canada. Of these schools, one was classified as being in a poor socioeconomic environment, nine as average, and one as being in an advantageous environment, according to the socioeconomic index published by Québec's Ministère de l'Éducation, du Loisir et du Sport (2014).

The initial research sample included 37 children with typical development and 39 children with mathematics difficulties, as identified whether by the child's teacher, special education teacher or speech-language pathologist. These 39 children with mathematics difficulties met the DSM-V (2013) criterion according to which the affected academic skills cause significant interference with academic or occupational performance for more than six months. According to the DSM-V (2013), the affected academic skills in dyscalculia are substantially and quantifiably below those expected for the individual's chronological age, as confirmed by

individually administered standardized achievement measures and comprehensive clinical assessment. Compliance with this criteria was examined with the Zareki-R (Dellatolas & Von Aster, 2006), a “paper-and-pencil” French battery designed to assess number processing and calculation in children aged 6 to 11 years old. This test battery comprises the following eleven subtests: 1) counting dots, 2) backward oral counting, 3) dictation of numbers, 4) mental calculation (additions, subtractions, multiplications), 5) number reading, 6) number positioning on an analog scale, 7) magnitude comparison on spoken numbers, 8) estimation of sets of dots, 9) contextual estimation of quantities, 10) spoken problem-solving, and 11) magnitude comparison of Arabic numbers. The selection of participants in the current study was based on recent Quebec-French normative data for third grade (Lafay, St-Pierre, & Macoir, in press). Thirty-seven typically developing children (21 girls and 16 boys) scored above -1.5 standard deviations (SD) on the Zareki-R test and formed the group of typically developing (TD) children. Of the children presenting mathematic difficulties, 11 scored above -1.5 SD of the average on the total score of the Zareki-R test and were excluded from the present study. Four children were excluded because they had to reattempt a grade. Finally, 24 children (20 girls and 4 boys) who scored -1.5 SD below the average on the total score of the Zareki-R test formed the group of children with developmental dyscalculia (DD).

In summary, there were 37 TD children (mean age in months = 107.3, SD = 3.8) and 24 children with MD (mean age = 108.2, SD = 4.3). An ANOVA (analysis of variance) was performed on the mean age with the variable Mathematic Group (Group: TD vs. MD). The result showed no Mathematic Group effects ( $F(1, 55) = .058, p = .810, \eta_p^2 = .001$ ), indicating that the groups did not differ significantly in mean age. There were 21 girls (57 %) and 16 boys (43 %) in the TD group and 20 girls (83 %) and 4 boys (17 %) in the MD group and the difference in gender distribution between the two groups was significant ( $\chi^2(1) = 4.666, p = .031$ ). The two groups (TD: 31 right-handers (84 %) and 6 left-handers (16 %); MD: 19 right-handers (79 %) and 5 left-handers, 21 %) were equivalent in terms of handedness distribution ( $\chi^2(1) = 0.210, p = .647$ ). Finally, the repartition of children according to the socioeconomic environment was significantly different ( $\chi^2(2) = 10.364, p = .006$ ) in the two groups (TD: 23 children from an advantaged socioeconomic environment (62 %), 8 children from an average socioeconomic environment (22 %), and 6 children from a poor socioeconomic environment (16 %) ; MD: 7 children from an advantaged socioeconomic environment (29 %), 15 children from an average socioeconomic environment (63 %), and 2 children from a poor socioeconomic environment, 8%).

An ANOVA (Group: TD vs. DD) on the total score of the Zareki-R showed a Group effect, indicating that the performance of children with DD was significantly poorer than the one of TD children with regards to general mathematical abilities (see Table 11). Furthermore, a Multivariate analysis of variance (MANOVA) (Group: TD vs. DD) on each subtest score (11) of the Zareki-R showed a Group effect (DD lower than TD) on the following eight subtests: backward oral counting, number dictation, mental calculation, number reading, number

positioning on an analog scale, oral magnitude comparison on spoken numbers, contextual estimation of quantities, and problem-solving. A marginal Group effect (DD lower than TD) was observed for three subtests: dot counting, estimating sets of dots, and magnitude comparison of Arabic numbers.

**Table 11. Participants' general cognitive abilities: TD and DD (mean (SD) and statistics)**

	TD	DD	ANOVAs (Group: TD vs. DD)		
	( <i>n</i> = 37)	( <i>n</i> = 24)	<i>F</i> (1, 59)	<i>p</i>	$\eta_p^2$
Mathematic abilities (/163)	140.8 (9.3)	112.7 (9.8)	127.687	2.169E-16*	.684
Dot counting (/6)	5.7 (0.5)	5.4 (0.8)	3.350	.072	.054
Backward oral counting (/4)	3.5 (0.9)	2.6 (1.2)	11.838	.001*	.167
Number dictation (/16)	15.4 (1.0)	13.4 (2.4)	20.238	3.264E-5*	.255
Mental calculation (/44)	37.1 (4.8)	26.8 (5.9)	55.762	4.368E-10*	.486
Number reading (/16)	15.4 (0.9)	14.2 (1.8)	12.931	.001*	.180
Number positioning on an analogic scale (/24)	17.9 (3.3)	14.2 (3.7)	17.055	1.159E-4*	.224
Magnitude comparison on spoken numbers (/16)	14.7 (1.3)	12.2 (2.1)	34.272	2.254E-7*	.367
Estimation of sets of dots (/5)	4.2 (0.8)	3.8 (1.2)	3.409	.070	.055
Contextual estimation of quantities (/10)	7.9 (2.5)	5.4 (2.9)	13.413	.001*	.185
Spoken problem-solving (/12)	9.1 (2.0)	5.3 (2.3)	46.907	4.873E-9*	.443
Magnitude comparison of Arabic numbers (/10)	9.8 (0.5)	9.5 (0.7)	3.683	.060	.059
Neuropsychological abilities					
Non-verbal reasoning (/36)	28.4 (3.2)	25.6 (3.0)	10.461	.002*	.151
Processing speed (/126)	39.5 (7.4)	34.9 (5.4)	6.686	.012*	.102
Visuospatial short-term memory (/16)	7.0 (1.6)	6.3 (1.3)	3.344	.072	.054
Visuospatial working memory (/14)	6.3 (2.0)	5.4 (1.3)	3.935	.052	.063
Verbal short-term memory (/12)	9.1 (2.0)	8.2 (2.5)	2.614	.111	.042
Verbal working memory (/12)	6.9 (2.1)	5.2 (1.4)	12.776	.001*	.178
Linguistic abilities					
Reading and spelling (/90)	77.9 (6.8)	66.0 (10.0)	30.499	7.889E-7*	.341
Word comprehension and production (/80)	53.2 (3.8)	50.7 (2.9)	7.367	.009*	.111
Reaction time (in ms)	513.9 (135.9)	634.9 (203.3)	10.022	.002*	.145

Note.

SD = Standard Deviation

\* These ability scores were significantly lower than those of TD children ( $p < .05$ )

## TASKS AND MATERIALS

### Neuropsychological and linguistic abilities

A high comorbidity of dyscalculia and other developmental deficits such as dyslexia has been demonstrated (Gross-Tsur et al., 1996), leading some researchers (e.g., Geary, 1993) to propose that dyscalculia could result from a general deficit affecting cognitive functions such as working memory. Thus, all children first underwent a general neuropsychological assessment tapping the cognitive domains sensitive to number processing. Neuropsychological abilities assessed were the non-verbal reasoning (Raven's Coloured Progressive Matrices (CPM); Raven, 1977), the visuospatial and verbal short-term and working memory (Corsi block test; Corsi, 1972; Isaacs & Vargha Khadem, 1989); forward and backward digit repetition subtests of the Zareki-R (Dellatolas & Von Aster, 2006). The linguistic abilities were assessed with the Reception (spoken word-to-picture matching) and Production subtests (picture naming) of the 'Évaluation du Langage Oral' (ELO) battery (Khomsi, 2001) and with the two subtests Reading and Spelling of the Batterie Analytique du Langage Écrit (BALE) battery (Cogni-science, 2010).

### **Experimental tasks**

The access to the MNL and its integrity per se were assessed with two experimental tasks consisting of: a) locating on a physical number line the magnitude of a symbolic number or an analogic numerosity (i.e. number-to-position transcoding) and, b) producing a symbolic or an analogic numerosity corresponding to the magnitude specified on a physical number line (i.e. position-to-number transcoding).

Children were tested individually in a quiet room of their school. Testing took place from February to June of the school year. Each child was tested during one session lasting between 45 min. to one hour. The presentation order of the experimental tasks was randomized between children. All the stimuli were presented on a computer screen with DMDX (Forster & Forster, 2003), a method which allows controlling the presentation time of stimuli. Children were asked to answer by writing on a sheet of paper with a pencil or by producing spoken response.

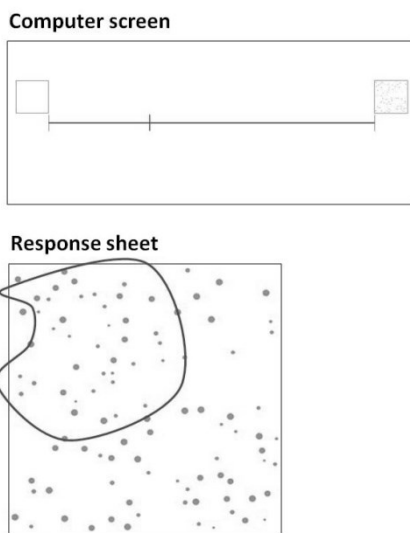
#### *Non-symbolic tasks*

In the number-to-position transcoding task, an analogic number was presented to the children who were asked to estimate and locate the corresponding magnitude on a physical number line. The analogic number consisted in a set of dots (blue circles of various sizes, randomly distributed in a 10 cm square). The dots size was controlled (various dots of various sizes distributed over an identical surface area) with a program developed by Price, Palmer, Battista, & Ansari (2012). Children were given a pencil and a sheet of paper on which was drawn a 20-cm horizontal number line from 0 to 100. The start (an empty square) and the end (a square with 100 circles) points of the line were marked with analogic numerosities. Children were asked to quickly and approximately estimate the magnitude of each numerosity by putting a mark across the line.

In the position-to-number transcoding task, a 20-centimeter horizontal number line from 0 to 100 with a mark corresponding to a specific magnitude was presented on the computer screen. Children were given a response sheet comprising hundred dots randomly displayed in a 10-centimeter square and were asked to quickly surround with a pencil (without counting), the approximate number of dots corresponding to the magnitude of the mark (see Figure 6).

The following twenty numerosities were randomly presented in each task: 1, 4, 5, 8, 11, 19, 24, 27, 33, 36, 47, 53, 58, 62, 65, 76, 84, 89, 93, and 96 in the number-to-position task; 1, 3, 6, 8, 13, 18, 22, 29, 31, 34, 45, 52, 57, 63, 67, 74, 86, 88, 91, and 95 in the position-to-number task).

Five practice trials were proposed to allow children to familiarize with the tasks. Each trial started with the presentation of the target numerosity, which remained on the screen until response or until 7000 milliseconds, and followed by 1000 milliseconds delay.



**Figure 6. Illustration of the position-to-analogic number transcoding task**

### *Symbolic tasks*

The same transcoding tasks were used to assess the MNL access from symbolic numbers presented in Arabic and spoken forms.

In the number-to-position transcoding tasks, a symbolic number was presented to the children who were asked to estimate and locate that number on a number line. In the Arabic modality, an Arabic number (Calibri, 22 millimeters) was presented in the center of the computer screen. In the spoken modality, an earphone picture was presented on the computer screen and children were presented with a spoken number through earphones

at an intensity of 70 db. Children were given a pencil and a sheet of paper on which was drawn a 20-cm horizontal number line from 0 to 100. The start and end points were marked with Arabic numbers in the Arabic modality (0 and 100) and with verbal written numbers in the spoken modality (zero 'zero' and cent 'hundred'). Children were asked to quickly and approximately estimate the magnitude of the symbolic number by putting a mark across the line.

In the position-to-number transcoding tasks, a 20-cm horizontal number line from 0 to 100 with a mark corresponding to a specific magnitude was presented on the computer screen. Children were asked to estimate this magnitude by writing the corresponding Arabic number on a sheet of paper (Arabic modality) or by producing the corresponding spoken number (spoken modality).

The following twenty numerosities were randomly presented in each task and in each modality: 2, 4, 7, 9, 12, 17, 21, 28, 32, 35, 46, 56, 59, 61, 64, 73, 85, 88, 92, and 97 in number-to-position with Arabic numbers and in position-to-number with spoken numbers transcoding; 1, 3, 6, 8, 13, 18, 22, 29, 31, 34, 45, 52, 57, 63, 67, 74, 86, 88, 91, and 95 in spoken number-to-position transcoding; 1, 4, 5, 8, 11, 19, 24, 27, 33, 36, 47, 53, 58, 62, 65, 76, 84, 89, 93, and 96 in position-to-Arabic number transcoding.

Five practice trials were proposed to allow children to familiarize with each task. Each trial started with the presentation of the target number, which remained on the screen until response or until 7000 milliseconds, followed by 1000 milliseconds delay.

#### *Data analysis*

The two experimental tasks consisted in magnitude estimation and exact responses were not expected (i.e. there was no right or wrong response). Therefore, similarly to studies in which such estimation tasks were used (e.g., Siegler & Opfer, 2003), initial analyses involved comparisons of the fit of linear, logarithmic, and exponential models to the median estimates for numerical values of each groups, for each task, each modality, and each of the 20 numbers. Medians rather than means were used to minimize the effect of outliers. More particularly, we compared the fit of linear and logarithmic models to the median estimates in the number-to-position transcoding task and the fit of linear and exponential models to the median estimates in the position-to-number transcoding task in accordance to Siegler & Opfer (2003). T-tests were then computed in each modality on the percentages of variance ( $r^2$ ) which accounted for linear function in TD and DD children. Regarding the response analyses, we calculated the percent absolute error (PAE) to score the children's performances for each estimated number (Siegler & Booth, 2004):  $PAE = [(child's\ estimate - number\ to\ be\ estimated) / number\ line\ scale]$ , as it was also conducted in Hornung, Schiltz, Brunner, & Martin (2014). For example, in the number-to-position task with non-symbolic numerosities, if the magnitude of the stimuli was 20,

and the child marked a position corresponding to 40 on the physical mental line, the PAE would be 0.20 [i.e.,  $(40-20)/100 = 0.20$ ; corresponding to 20% of absolute error]. From these calculations, mean PAE scores were computed.

## RESULTS

### NEUROPSYCHOLOGICAL AND LINGUISTIC ABILITIES

A multivariate analyse of variance (MANOVAs) was first performed and revealed a main group effect on overall neuropsychological and linguistic abilities ( $F(8, 52) = 5.600, p = 3.977E-05$ ; Pillai's trace = .463,  $\eta_p^2 = .463$ ). Given this group effect, univariate main effects were then examined and impairment in the following tests were identified: Raven's CPM, Coding subtest of the WISC IV, and the backward digit repetition subtest of the Zareki-R (see Table 11), indicating that the performance of the DD group was significantly poorer than the one of the TD group for non-verbal reasoning, processing speed, and verbal working memory. Furthermore, the results showed a marginal Group effect (TD > DD) in tasks measuring visuospatial memory (forward and backward Corsi block test). Finally, the analysis did not showed a Group effect in the forward digit repetition subtest of the Zareki-R, that the two groups did not differ significantly for verbal short-term memory. With regards to linguistic abilities, an ANOVA (Group: TD vs. DD) showed a Group effect in the total number of correct responses for both Reception and Production subtests of the ELO and for both Reading and Spelling subtests of the BALE, indicating that the performance of the DD group was significantly poorer than the one of the TD group with respect to word comprehension and word production abilities as well as reading and spelling abilities. In summary, compared to TD children, children with DD were significantly less successful for non-verbal reasoning, processing speed, verbal working memory, word comprehension and production, and reading and spelling. These data were entered as covariates in the results analyses of the experimental tasks.

### EXPERIMENTAL TASKS

#### Non-symbolic tasks

As shown on Table 12, the best fit was the linear equation for the TD and DD groups in the two non-symbolic tasks.

Further analysis was performed in order to examine the linear curve fit in DD and TD children. Therefore, *t*-tests (Group: TD vs. DD) were performed for each task on the percentage of variance ( $r^2$ ) accounting for linear function. The results showed that children with DD had a marginally lower  $r^2$  than TD children for the number-to-position transcoding ( $t(59) = 2.025, p = .052$ ) and for the for position-to-number transcoding tasks ( $t(59) = 1.983, p = .054$ ), suggesting similar linear curve fits in DD and TD children. An ANalysis of COVariance

(ANCOVA) was then performed on the percentage of variance ( $r^2$ ) accounting for linear function with each general cognitive measure as covariates. The results showed that the marginal Group effect disappeared for the number-to-position transcoding task ( $F(1, 51) = 1.956, p = .168, \eta_p^2 = .037$ ) as well as for the position-to-number transcoding task ( $F(1, 51) = 1.836, p = .181, \eta_p^2 = .035$ ).

T-tests (Group: TD vs. DD) were also performed on the percent absolute error (PAE) in each task. As presented in Table 13, the results showed that the PAE of children with DD was as large as the one of TD children in the number-to-position transcoding task, but larger than the one of TD children in the position-to-number transcoding task. An ANCOVA, including scores on cognitive measures as covariates, was then performed for each task. The analyses showed that the Group effect remained significant when each cognitive variable was entered as a covariate one at a time, but disappeared when they were processed together.

**Table 12. Fit of linear and logarithmic or exponential models to the median estimates of children on experimental tasks for TD and DD.**

Number codes	Tasks	TD ( $n = 37$ )			DD ( $n = 24$ )		
		Log/Exp*	Linear	T-tests	Log/Exp*	Linear	T-tests
Analogic	Number-to-position	84.7 %	96.7 %	$t(18) = 22.830, p = 9.695E-15$	83.4 %	95.5 %	$t(18) = 19.440, p = 1.572E-13$
	Position-to-number	76.2 %	98.7 %	$t(18) = 30.514, p = 5.938E-17$	79.4 %	93.5 %	$t(18) = 16.104, p = 3.905E-12$
Arabic	Number-to-position	82.8 %	99.4 %	$t(18) = 53.159, p = 3.032E-21$	85.1 %	99.1 %	$t(18) = 44.431, p = .007$
	Position-to-number	80.4 %	99.5 %	$t(18) = 59.498, p = 4.035E-22$	82.3 %	99.3 %	$t(18) = 50.493, p = 7.610E-21$
Spoken	Number-to-position	77.5 %	99.5 %	$t(18) = 60.530, p = 2.965E-22$	80.0 %	98.9 %	$t(18) = 40.451, p = 3.985E-19$
	Position-to-number	84.8 %	99.8 %	$t(18) = 91.487, p = 1.792E-25$	86.3 %	99.2 %	$t(18) = 45.993, p = 4.034E-20$

\* In according to Siegler & Opfer (2003), we compared the fit of linear and logarithmic models to the median estimates for numerical values for the *number-to-position* transcoding task. The exponential model did not show a good fit in this task. We compared the fit of linear and exponential models to the median estimates for numerical values for the *position-to-number* transcoding task. The logarithmic model did not show a good fit in this task.

**Table 13. Mean PAE (SD) in each experimental task for TD and DD**

Number codes	Tasks	TD	DD	T-tests	ANCOVAs
		( $n = 37$ )	( $n = 24$ )	(Group : TD vs. DD)	
Analogic	Number-to-position	14.00 (3.72)	15.00 (4.48)	$t(59) = -0.945, p = .349$	$F(1, 51) = 0.227, p = .636, \eta_p^2 = .004$
	Position-to-number	15.05 (5.59)	19.58 (5.71)	$t(59) = -3.063, p = .003$	$F(1, 51) = 3.447, p = .069, \eta_p^2 = .063$
Arabic	Number-to-position	6.89 (2.60)	10.25 (4.76)	$t(59) = -3.560, p = .003$	$F(1, 51) = 2.862, p = .097, \eta_p^2 = .053$
	Position-to-number	6.86 (3.71)	10.71 (4.66)	$t(59) = -3.574, p = .001$	$F(1, 51) = 5.776, p = .020, \eta_p^2 = .102$
Spoken	Number-to-position	8.73 (3.45)	13.88 (6.74)	$t(59) = -3.928, p = .002$	$F(1, 51) = 8.687, p = .005, \eta_p^2 = .146$
	Position-to-number	6.22 (3.24)	9.42 (3.19)	$t(59) = -3.791, p = 3.548E-4$	$F(1, 51) = 4.458, p = .040, \eta_p^2 = .080$

## Symbolic tasks

The same analyses were performed on symbolic tasks. First, the best fit for the TD and DD groups in each modality and each task was the linear equation, (see Table 12).

Second, children with DD had a lower  $r^2$  than TD children for number-to-position ( $t(59) = 3.015, p = .006$ ) and position-to-number transcoding tasks ( $t(59) = 2.056, p = .042$ ) in Arabic modality, as well as for number-to-position ( $t(59) = 2.411, p = .022$ ) and position-to-number transcoding tasks ( $t(59) = 2.546, p = .014$ ) in spoken modality. Overall, children with DD showed less linear curve fit than TD children for symbolic numbers. An ANCOVA was then performed for each task and each modality on the percentage of variance ( $r^2$ ) accounting for linear function with each general cognitive measure as covariates. The results showed that the Group effect remained significant for the number-to-position task in Arabic modality ( $F(1, 51) = 6.566, p = .013, \eta_p^2 = .114$ ). However, the Group effect disappeared for the position-to-number transcoding task in Arabic modality ( $F(1, 51) = 2.833, p = .098, \eta_p^2 = .053$ ), as well as for the number-to-position ( $F(1, 51) = 1.721, p = .195, \eta_p^2 = .033$ ) and position-to-number transcoding tasks ( $F(1, 51) = 2.401, p = .127, \eta_p^2 = .045$ ) in spoken modality.

Finally, the PAE of children with DD was larger than that of TD children for number-to-position and position-to-number transcoding tasks in Arabic modality, as well as for number-to-position and position-to-number transcoding tasks in spoken modality (see Table 13). An ANCOVA was then performed for each task and each modality on the PAE with each general cognitive measure as covariates. The Group effects remained significant in the two modalities when each cognitive variable was entered as a covariate one at a time. When all the cognitive variables were processed together, the Group effect became marginal for the number-to-position task in Arabic modality, but remained significant for the other tasks.

## DISCUSSION

In the present study, we investigated the integrity of the MNL in children with dyscalculia through the assessment of their abilities to place symbolic numbers and non-symbolic numerosities on a physical number line (number-to-position transcoding task) and to produce symbolic numbers and non-symbolic numerosities from a physical number line (position-to-number transcoding task). These tasks were designed to answer the following research questions: 1) does dyscalculia originate from a deficit of the MNL per se, supporting the number sense deficit hypothesis or, b) does dyscalculia come from a deficit in the MNL access from symbolic numbers, rather supporting the number access deficit hypothesis?

In summary, results showed that, with respect to MNL acuity, the best fit was the linear equation for both TD and DD groups in each non-symbolic and symbolic task. Children with DD showed a less linear curve fit than

TD children in the two transcoding tasks involving Arabic and spoken symbolic numbers, while no difference in the linear curve was observed in the two groups for non-symbolic numbers. Moreover, the PAE was larger in children with DD compared to TD children for both Arabic and spoken numbers. With regards to analogic numbers, the PAE was not different in children of the two groups in the number-to-position transcoding task, while the PAE of children with DD was larger than TD children in the position-to-number transcoding task.

Until now, researchers showed that, with respect to the MNL acuity, children with DD had a logarithmic curve fit for 1-100 spoken numbers at 6-8 years old, whereas children without mathematics difficulties had already got a linear curve fit (Geary et al., 2008). Children aged 9-10 years old with DD showed a linear curve fit for Arabic numbers from 1 to 100 as children without mathematics difficulties (Landerl et al., 2009). However, they showed a logarithmic curve fit for Arabic numbers from 1 to 1000, whereas children without mathematics difficulties had already got a linear curve fit (Landerl et al., 2009). Finally, children aged 11-12 showed less linear curve fit than children without mathematics difficulties for Arabic numbers from 1 to 1000 (Andersson & Östergren, 2012). To our knowledge, the study that we have performed is the first to show that the MNL acuity in children with DD of 8-9 years old fits the linear curve, no matter the symbolic or non-symbolic nature of numbers from 0 to 100. Based on these data solely, one could conclude that the MNL is preserved in children with DD. However, the analyses conducted to measure the acuity of the MNL showed that the portrait is not so clear-cut.

In our study, children with DD did not present any difficulties (i.e., their curve fitted the linear model and their PAE were similar to that of TD children) to place non-symbolic numerosities on a physical mental line, a result suggesting that the MNL per se was not impaired. These results suggested the preservation of the number sense in children with DD. They ran counter the results of Van Viersen et al. (2013) who were the only researchers reporting an impairment to place analogic numbers on a number line in a single case study of a 9-year-old girl with DD. However, in the opposite direction (i.e. position-to-number transcoding task with analogic numerosities), the performance of children with DD was also similar to that of TD children regarding the linear curve fit, but not for the PAE which was larger. In our opinion, the dissociation observed in children with DD between the success in the number-to-position and their impairment in the position-to-number transcoding task could be explained by inherent characteristic of the two tasks and by the fact that the two transcoding tasks did not seem to reflect the same processes. In the number-to-position transcoding task performed with Arabic numbers, children 7-8 years showed a logarithmic model of the objective number stimulus before showing a more mature and precise linear model at 11-12 years old. However, they initially showed an exponential model in the reverse position-to-number transcoding task (Ashcraft & Moore, 2012; Siegler & Opfer, 2003). A possible explanation could be that the number-to-position simply requires to spatially and globally match the perceived non-symbolic numerosities to the physical number line. As explained by luculano & Butterworth

(2011), using such a task encouraged a direct mapping onto a defined physical space, so that children could access and represent (i.e., linearly) the real value of numerosities and process them in a holistic way. Inversely, the position-to-number transcoding task required to transcode a position on a physical number line to non-symbolic numerosities, or, in other words, to transcode a continuous input to a discontinuous output, a process that could require greater effort. This interpretation is compatible with the idea that when allowed or encouraged by the task, the use of analytic strategies, such as a symbolic mediation, might be preferred to the access to numerosities because of the input difficulty consisting in a continuous, non directly perceived number (Luculano & Butterworth, 2011). Given the fact that, in our study, children with DD presenting impairment in the MNL access from Arabic and spoken numbers, such a "symbolic mediation" would explain the difficulty they presented with analogic numerosities in the position-to-number transcoding task. Further studies are needed to confirm this hypothetical interpretation.

Pertaining to the second research question, our results showed a deficit to MNL access from symbolic numbers in children with DD. Compared to TD children, they were impaired in the two tasks with the physical mental line involving the transcoding of Arabic and spoken numbers. In these tasks, they showed a less linear curve fit (i.e., a lower percentage of variance,  $r^2$ ) and produced a larger PAE than TD children. Our results were consistent with those reported by Andersson & Östergren (2012) who also showed that, in 10-12-years-old children with DD, the Arabic representations of numbers from 1 to 1000 were less linear in the TD children. They were also in line with the case study of a 9-year-old girl with DD (Van Viersen et al., 2013) who was impaired (i.e. her MNL corresponded to logarithmic representations and her PAE was larger than those of her pairs) to place Arabic numbers on a physical number line. To our knowledge, only one study (Geary et al., 2008) explored the transcoding of spoken numbers on a physical mental line and showed an impairment in children with DD of 6 to 8 years old.

Given our results, we suggested that children with DD did not present a general deficit of the MNL, but rather a specific deficit to access it from symbolic numbers, therefore affecting the capacity to place symbolic numbers on a physical number line and to produce symbolic numbers from a physical number line. Furthermore, our results highlighted the importance of symbolic numbers in mathematical development, as already demonstrated in many studies. For example, it has been shown that the ability to place spoken numbers on a physical number line was critical for mathematical development in children aged 7-8 (Praet & Desoete, 2014). Also, the capacity to place Arabic numbers on a physical number line was predictive of the exact calculation abilities of young 5-6-year old children in kindergarten (Xenidou-Dervou et al., 2014). Moreover, Purpura, Baroody, & Lonigan (2013) showed that the relation between informal (e.g., non-symbolic comparison) and formal (e.g., calculation) mathematical knowledge was fully mediated by the ability to process Arabic numbers and to connect them to their corresponding quantities. This study has thus demonstrated that success in

calculation abilities was directly linked to the comprehension of the relations between the number sense and the Arabic numbers. Our results did not support the number sense deficit proposed by Dehaene (1992, 2010) or the MNL deficit proposed by Von Aster & Shalev (2007) to account for DD in children. However, they strongly supported the interpretation made by Noël & Rousselle (2011) who suggested that dyscalculia is a specific deficit in the access to number sense from Arabic numbers. In our study, we also showed the presence of such an access deficit from spoken numbers.

The triple-code model (Dehaene, 1992, 2010) and the developmental model of the number acquisition (Von Aster & Shalev, 2007) join a more general debate about the MNL being an innate or an acquired ability (see Everett (2013) for a review). Some authors claimed that innate numerical abilities are found in infants (Antell & Keating, 1980; Starkey & Cooper, 1980; Wynn, 1992), in adults without mathematic language and education (Butterworth, Reeve, Reynolds, & Lloyd, 2008; Frank, Everett, Fedorenko, & Gibson, 2008; Gordon, 2004), and even in animals (e.g., Brannon, 2005). In this respect, the triple-code model (Dehaene, 1992, 2010), also postulates that the MNL is innate, while, according to the developmental model of the number acquisition by Von Aster & Shalev (2007), the development of a mature MNL depends on the prior development of three numerical abilities : 1) an inherited basic number sense based on a core-system representation of magnitude, 2) the acquisition of number words during preschool, 3) the primary school learning of Arabic symbols. Therefore, the impairment observed in children with DD of the present study to place Arabic and spoken numbers on a physical number line could simply reflected their problems to process symbolic numbers. This result combined to the preservation of their ability to process analogic numbers thus seemed to confirm the triple-code model (Dehaene, 1992, 2010), and to challenge the developmental model of the number acquisition (Von Aster & Shalev, 2007).

Some limitations of the present study warrant consideration. First, the neuropsychological evaluation showed that children with DD also presented non numerical deficits (e.g., verbal working memory), suggesting a general cognitive deficit. According to Geary (1993, 2010), mathematical difficulties could be explained by a cognitive deficit affecting general and basic functions such as working memory. Further studies should assess children with mathematic difficulties only to disentangle what is related to numerical processing and what rather resort to cognitive deficits. Second, the present study used bounded physical number line to assess the integrity of the MNL. Nonetheless, Reinert, Huber, Nuerk, & Moeller (2015) suggested that using such a number line assess more strategies like proportion-based estimation (Barth & Paladino, 2011) and not specific numerical estimations. According to these authors, an unbounded physical number line might measure numerical estimation more “purely”. Hence, further studies should rather use unbounded number line to more specifically assess the integrity of the MNL in children with MD.

The present study had implications for clinicians working with children living with DD. Results of our study showed that children with DD did not have a general deficit of the MNL, but rather a specific access deficit to the MNL from symbolic numbers. Therefore, our study suggests that the assessment of mathematical capacities cannot be limited to calculation skills or in solving problems, but should also include an extensive investigation of numerical abilities, involving the ability to place Arabic and spoken numbers on a physical number line.

This study also opens up to new research perspectives. Further studies are needed to confirm our results. Other studies should also address the specific development of the MNL in children with and without dyscalculia. Their abilities to access the MNL with non-symbolic and symbolic numbers at various ages of development could inform about the exact learning sequence of numerical abilities as well as the relationship between symbolic numbers, analogic numbers and the MNL. Furthermore, an investigation of the involvement of symbolic number deficits in mathematics difficulties in children is essential. More precisely, it is important to analyze the role of Arabic number processing and the one of spoken number processing in symbolic number processing. For example, studies with younger children in a longitudinal paradigm could be useful to examine these questions.

## **Ethics**

The present study was approved by the Ethics Committee of the Research for the Institut Universitaire en Santé Mentale de Québec.

## **Acknowledgements**

We would like to thank the following participating schools for their collaboration: La Mosaïque, St Fidèle, La Farandole, St Pierre et St Laurent de l'île d'Orléans, Sous bois, St Jean Baptiste, Cap Soleil et St-Pierre, L'Orée des bois, Trivent, et Institut Saint-Joseph.

## **References**

- American Psychiatric Association (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-5)*. Arlington, VA: APA.
- Andersson, U., & Östergren, R. (2012). Number magnitude processing and basic cognitive functions in children with mathematical learning disabilities. *Learning and Individual Differences*, 22(6), 701–714. <http://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.05.004>
- Antell, S. E., & Keating, D. P. (1980). Perception of numerical invariance in neonates. *Child Development*, 54, 695–701.

- Ashcraft, M. H., & Moore, A. M. (2012). Cognitive processes of numerical estimation in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 111(2), 246–67. <http://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.08.005>
- Badian, N. (1999). Persistent Arithmetic, Reading, or Arithmetic and Reading Disability. *Annals of Dyslexia*, 49, 45–70.
- Barbarelli, W. J., Katusic, S. K., Colligan, R. C., Weaver, A. L., & Jacobsen, S. J. (2005). Math learning disorder: incidence in a population-based birth cohort. *Minn. Ambulatory Pediatrics*, 5(5), 281–9. <http://doi.org/10.1367/A04-209R.1>
- Barth, H. C., & Paladino, A. M. (2011). The development of numerical estimation: Evidence against a representational shift. *Developmental Science*, 14(1), 125–135. <http://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.00962.x>
- Berteletti, I., Lucangeli, D., Piazza, M., Dehaene, S., & Zorzi, M. (2010). Numerical estimation in preschoolers. *Developmental Psychology*, 46(2), 545–551. <http://doi.org/10.1037/a0017887>
- Booth, J. L., & Siegler, R. S. (2006). Developmental and individual differences in pure numerical estimation. *Developmental Psychology*, 42(1), 189–201. <http://doi.org/10.1037/0012-1649.41.6.189>
- Booth, J. L., & Siegler, R. S. (2008). Numerical magnitude representations influence arithmetic learning. *Child Development*, 79(4), 1016–31. <http://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2008.01173.x>
- Brannon, E. M. (2005). *What animals know about numbers*. In J.I.D. Campbell (Ed.), *Handbook of mathematical cognition* (pp.85–107). New-York: Hove Psychology Press.
- Butterworth, B., Reeve, R., Reynolds, F., & Lloyd, D. (2008). Numerical thought with and without words: Evidence from indigenous Australian children. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(35), 13179–84. <http://doi.org/10.1073/pnas.0806045105>
- Cirino, P. T., Fuchs, L. S., Elias, J. T., Powell, S. R., & Schumacher, R. F. (2015). Cognitive and Mathematical Profiles for Different Forms of Learning Difficulties. *Journal of Learning Disabilities*, 48(2), 156–175. <http://doi.org/10.1177/0022219413494239>
- Cogni-science. (2010). *BALE Batterie Analytique du Langage Ecrit*. Grenoble : France.
- Corsi, P. M. (1972). *Human memory and the medial temporal region of the brain*. Montréal, Canada: McGill University.
- Cowan, R., & Powell, D. (2014). The Contributions of Domain-General and Numerical Factors to Third-Grade Arithmetic Skills and Mathematical Learning Disability. *Journal of Educational Psychology*, 106(1), 214–229. <http://doi.org/10.1037/a0034097>
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1–42.
- Dehaene, S. (2010). *La bosse des maths, 15 ans après*. Paris: Odile Jacob.
- Dellatolas, G., & Von Aster, V. (2006). *Zareki-R, Batterie pour l'évaluation du traitement des nombres et du calcul chez l'enfant*. Paris: ECPA.

- Devine, A., Soltész, F., Nobes, A., Goswami, U., & Szűcs, D. (2013). Gender differences in developmental dyscalculia depend on diagnostic criteria. *Learning and Instruction, 27*, 31–39. <http://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2013.02.004>
- Dirks, E., Spyer, G., van Lieshout, E. C. D. M., & de Sonneville, L. (2008). Prevalence of combined reading and arithmetic disabilities. *Journal of Learning Disabilities, 41*(5), 460–73. <http://doi.org/10.1177/0022219408321128>
- Everett, C. (2013). Independent cross-cultural data reveal linguistic effects on basic numerical cognition. *Language and Cognition, 5*(1), 99–104. <http://doi.org/10.1515/langcog-2013-0005>
- Forster, K. I., & Forster, J. C. (2003). DMDX: a windows display program with millisecond accuracy. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers, 35*(1), 116–24. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12723786>
- Frank, M. C., Everett, D. L., Fedorenko, E., & Gibson, E. (2008). Number as a cognitive technology: evidence from Pirahã language and cognition. *Cognition, 108*(3), 819–24. <http://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.04.007>
- Friso-van den Bos, I., Kroesbergen, E. H., Van Luit, J. E. H., Xenidou-Dervou, I., Jonkman, L. M., Van der Schoot, M., & Van Lieshout, E. C. D. M. (2015). Longitudinal development of number line estimation and mathematics performance in primary school children. *Journal of Experimental Child Psychology, 134*, 12–29. <http://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.02.002>
- Geary, D. C. (1993). Mathematical disabilities: Cognitive, neuropsychological, and genetic components. *Psychological Bulletin, 114*(2), 345–362. <http://doi.org/10.1037/0033-2909.114.2.345>
- Geary, D. C. (2010). Mathematical Disabilities: Reflections on Cognitive, Neuropsychological, and Genetic Components. *Learning and Individual Differences, 20*(2), 130–133. <http://doi.org/10.1016/j.lindif.2009.10.008>
- Geary, D. C., Hoard, M. K., Nugent, L., & Byrd-craven, J. (2008). Developmental Neuropsychology Development of Number Line Representations in Children With Mathematical Learning Disability. *Developmental Neuropsychology, 33*(3), 277-299.
- Gordon, P. (2004). Numerical cognition without words: evidence from Amazonia. *Science, 306*(5695), 496–9. <http://doi.org/10.1126/science.1094492>
- Gross-Tsur, V., Manor, O., & Shalev, R. S. (1996). Developmental dyscalculia: prevalence and demographic features. *Developmental Medicine and Child Neurology, 38*(1), 25–33. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8606013>
- Hornung, C., Schiltz, C., Brunner, M., & Martin, R. (2014). Predicting first-grade mathematics achievement: The contributions of domain-general cognitive abilities, nonverbal number sense, and early number competence. *Frontiers in Psychology, 5*, 1–18. <http://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00272>
- Isaacs, E. B., & Vargha Khadem, F. (1989). Differential course of development of spatial and verbal memory span: a study normative. *British Journal of Developmental Psychology, 7*, 377–380.
- Iuculano, T., & Butterworth, B. (2011). Understanding the real value of fractions and decimals. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology, 64*(11), 2088–2098. <http://doi.org/10.1080/17470218.2011.604785>

- Khomsi, A. (2001). *Evaluation du Langage Oral*. Paris: ECPA.
- Lafay, A., St-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (2014). Revue narrative de littérature relative aux troubles cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale : déficit du sens du nombre ou déficit de l'accès aux représentations numériques mentales. *Canadian Psychology / Psychologie Canadienne*, 56(1), 96–107.
- Lafay, A., St-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (in press). Performances moyennes des enfants franco-qubécois de 8-9 ans au test mathématique Zareki-R, *Glossa*.
- Landerl, K., Fussenegger, B., Moll, K., & Willburger, E. (2009). Dyslexia and dyscalculia: two learning disorders with different cognitive profiles. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(3), 309–24. <http://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.03.006>
- Laski, E. V., & Siegler, R. S. (2007). Is 27 a big number? Correlational and causal connections among numerical categorization, number line estimation, and numerical magnitude comparison. *Child Development*, 78(6), 1723–43. <http://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.01087.x>
- Lewis, C., Hitch, G. J., & Walker, P. (1994). The prevalence of specific arithmetic difficulties and specific reading difficulties in 9- to 10-year-old boys and girls. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 35(2), 283–92. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8188799>
- Ministère de l'Éducation, des Loisirs et du Sport (2014). *Indices de défavorisation*. Montréal : Canada.
- Noël, M.-P., & Rousselle, L. (2011). Developmental Changes in the Profiles of Dyscalculia: An Explanation Based on a Double Exact-and-Approximate Number Representation Model. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5, 165. <http://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00165>
- Noël, M.-P., Rousselle, L., & De Visscher, A. (2013). La dyscalculie développementale : à la croisée de facteurs numériques spécifiques et de facteurs cognitifs généraux. *Développements*, 15, 24–31.
- Opfer, J. E., & Siegler, R. S. (2007). Representational change and children's numerical estimation. *Cognitive Psychology*, 55(3), 169–95. <http://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2006.09.002>
- Praet, M., & Desoete, A. (2014). Number line estimation from kindergarten to grade 2: A longitudinal study. *Learning and Instruction*, 33, 19–28. <http://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2014.02.003>
- Price, G. R., Palmer, D., Battista, C., & Ansari, D. (2012). Nonsymbolic numerical magnitude comparison: reliability and validity of different task variants and outcome measures, and their relationship to arithmetic achievement in adults. *Acta Psychologica*, 140(1), 50–7. <http://doi.org/10.1016/j.actpsy.2012.02.008>
- Purpura, D. J., Baroody, A. J., & Lonigan, C. J. (2013). The transition from informal to formal mathematical knowledge: Mediation by numeral knowledge. *Journal of Educational Psychology*, 105(2), 453–464. <http://doi.org/10.1037/a0031753>
- Raven, J. C. (1977). *Standard Progressive Matrices. Manuel PM47*. Issy-les-Moulineaux, France : Editions Scientifiques et Psychologiques.
- Reeve, R. a., Paul, J. M., & Butterworth, B. (2015). Longitudinal changes in young children's 0–100 to 0–1000 number-line error signatures. *Frontiers in Psychology*, 6, 1–9. <http://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00647>

- Reinert, R. M., Huber, S., Nuerk, H.-C., & Moeller, K. (2015). Strategies in unbounded number line estimation? Evidence from eye-tracking. *Cognitive Processing*. <http://doi.org/10.1007/s10339-015-0675-z>
- Share, D. L., Moffitt, T. E., & Silva, P. a. (1988). Factors Associated with Arithmetic-and-Reading Disability and Specific Arithmetic Disability. *Journal of Learning Disabilities*, 21(5), 313–320. <http://doi.org/10.1177/002221948802100515>
- Siegler, R. S., & Booth, J. L. (2004). Development of numerical estimation in young children. *Child Development*, 75(2), 428–44. <http://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2004.00684.x>
- Siegler, R. S., & Opfer, J. E. (2003). The Development of Numerical Estimation: Evidence for Multiple Representations of Numerical Quantity. *Psychological Science*, 14(3), 237–250. <http://doi.org/10.1111/1467-9280.02438>
- Starkey, P., & Cooper, R. G. (1980). Perception of numbers by human infants. *Science*, 210, 1033–1035.
- van Viersen, S., Slot, E. M., Kroesbergen, E. H., van't Noordende, J. E., & Leseman, P. P. M. (2013). The added value of eye-tracking in diagnosing dyscalculia: a case study. *Frontiers in Psychology*, 4, 679. <http://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00679>
- Von Aster, M., & Shalev, R. S. (2007). Number development and developmental dyscalculia. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 49, 868–873.
- Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, 358, 749–750.
- Xenidou-Dervou, I., van der Schoot, M., & van Lieshout, E. C. D. M. (2014). Working memory and number line representations in single-digit addition: Approximate versus exact, nonsymbolic versus symbolic. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 68(6), 1–20. <http://doi.org/10.1080/17470218.2014.977303>

# Chapitre 7. Discussion générale

## 7.1. Synthèse des résultats principaux

L'objectif général de cette thèse était d'évaluer les déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie chez des enfants franco-québécois âgés entre huit et neuf ans, scolarisés en troisième année (1<sup>ère</sup> année du 2<sup>e</sup> cycle). Plus spécifiquement, l'étude 1 consistait en une recension des écrits concernant les déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie. Ensuite, la thèse visait à étudier les capacités de traitement des quantités non symboliques (étude 2), les capacités de traitement des nombres symboliques arabe et oral (étude 3), et, enfin, l'intégrité de la ligne numérique mentale (étude 4) des enfants dyscalculiques en les comparant aux performances d'enfants sans difficulté mathématique. Une synthèse des quatre études précédemment décrites est présentée afin d'en discuter par la suite les principaux résultats.

L'étude 1 documentait les déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie par le biais d'une recension des écrits scientifiques. Cette recension de la littérature a ainsi permis d'établir qu'il n'existait aucun consensus quant aux déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie. Deux hypothèses cognitives numériques ont été identifiées dans la littérature pour expliquer la dyscalculie : l'hypothèse du déficit du sens du nombre (Wilson & Dehaene, 2007) selon laquelle la dyscalculie résulte d'un déficit du traitement des représentations non symboliques du nombre et d'une altération des représentations numériques mentales, impliquant par exemple des difficultés à comparer des quantités non symboliques ; l'hypothèse du déficit d'accès au sens du nombre (Noël & Rousselle, 2011) selon laquelle la dyscalculie est caractérisée par la présence de difficultés à accéder au sens des quantités à partir des nombres arabes, impliquant par exemple des difficultés à comparer des nombres arabes, mais non des quantités non symboliques.

L'étude 2 portait sur les habiletés des enfants dyscalculiques à traiter des nombres non symboliques. En d'autres mots, elle interrogeait le module analogique du modèle du Triple Code (Dehaene, 1992) et la première étape du modèle développemental de l'acquisition numérique (Von Aster & Shalev, 2007), à savoir le système - quasi-inné - de représentation numérique non symbolique utile pour le traitement des quantités d'objets, dans le but d'évaluer la présence ou non d'un déficit du sens du nombre qui serait impliqué dans la dyscalculie développementale. Un groupe d'enfants dyscalculiques a été comparé à un groupe d'enfants sans difficulté pour étudier leurs habiletés à comprendre (tâches de jugement d'adéquation et comparaison de nombres analogiques) et produire des nombres non symboliques (tâche de transcodage d'un nombre analogique à un nombre analogique). Les résultats ont montré que les enfants dyscalculiques ont des performances aussi bonnes que celles des enfants sans difficulté pour la comparaison de nombres analogiques, alors qu'elles sont plus faibles lors de la tâche de jugement d'adéquation de deux nombres analogiques. Concernant la production de nombres non symboliques, les enfants dyscalculiques ont montré

de plus faibles performances que les enfants sans difficulté pour produire des nombres de petite (1-4) et moyenne (5-9) magnitude, mais des performances tout à fait préservées quant à la production des grandes numérosités (10-99). Ces résultats suggèrent donc l'absence d'un déficit général de traitement des nombres non symboliques et ne confortent donc pas l'hypothèse d'un déficit général du sens du nombre à l'origine de la dyscalculie (Dehaene, 1992, 2010; Von Aster & Shalev, 2007). Cependant, ils suggèrent davantage que les enfants dyscalculiques présentent un déficit de traitement des nombres non symboliques lorsque le coût cognitif associé à la tâche est élevé. En effet, alors que leur performance dans la comparaison de nombres analogiques est préservée, elle est altérée dans la tâche de jugement d'adéquation qui requiert une implication soutenue de la mémoire de travail et un contrôle important de l'inhibition (Dietrich, Huber, & Nuerk, 2015). Compte-tenu des résultats obtenus à cette tâche de jugement d'adéquation ainsi qu'à la production des numérosités, une atteinte du Système Numérique Précis pour traiter les petites quantités et une préservation du Système Numérique Approximatif pour traiter les grandes quantités peuvent être suggérées. En revanche, les quantités moyennes, de part leur position ordinale (i.e., supérieures à 4), dépendraient du Système Numérique Approximatif (Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004). Cependant, elles pourraient aussi relever du Système Numérique Précis qui permettrait alors qu'elles soient traitées de manière précise, grâce à un processus de subitizing appris/acquis par exposition répétée (Clements, 1999). De ce fait, deux explications pourraient être données pour expliquer les difficultés observées dans la production des numérosités de magnitude moyenne (5-9) : soit les enfants dyscalculiques ne parviennent pas à utiliser le système numérique adéquat pour réussir la tâche, soit ils ne parviennent pas à apprendre et à utiliser les patrons canoniques des quantités de magnitude moyenne, perçus par subitizing.

L'étude 3 concernait les capacités de traitement des quantités symboliques arabe et orale des enfants dyscalculiques dans le but d'évaluer la présence ou non d'un déficit de l'accès au sens du nombre via les codes symboliques. De manière plus spécifique, cette étude portait sur l'intégrité des modules arabe et oral, ainsi que sur l'intégrité de leur connexion respective au module analogique (i.e. au sens du nombre), selon le modèle du Triple Code (Dehaene, 1992). Si l'on considère plutôt le modèle développemental de l'acquisition numérique (Von Aster & Shalev, 2007), cette étude s'intéressait aux deuxième et troisième étapes du développement, à savoir l'acquisition des mots-nombres pendant la jeune enfance et leur association aux numérosités perçues, ainsi qu'à l'apprentissage des symboles arabes et leur association aux mots-nombres et aux numérosités perçues. Le même groupe d'enfants dyscalculiques que dans l'étude 2 a été comparé au même groupe d'enfants sans difficulté dans le but d'évaluer leurs habiletés à reconnaître (tâche de décision numérique), comprendre (tâches de jugement d'adéquation entre un nombre symbolique et un nombre non symbolique; comparaison de nombres symboliques) et produire des nombres symboliques (transcodage d'un nombre non symbolique à un nombre symbolique ; transcodage d'un nombre symbolique à un nombre non symbolique). Les résultats ont montré que les enfants dyscalculiques ont de plus faibles performances que

celles des enfants sans difficulté dans toutes les tâches proposées, suggérant ainsi un déficit de reconnaissance, de compréhension et de production des nombres symboliques en code arabe et oral. Considérant à la fois ces résultats et ceux de la première étude, qui ne permettent pas d'identifier un déficit général du sens du nombre chez ces enfants dyscalculiques (mais uniquement un déficit de traitement des petites quantités), les résultats suggèrent donc la présence d'un déficit d'accès au sens du nombre, non pas seulement via le code arabe (Noël & Rousselle, 2011), mais bien via les deux codes symboliques. Les résultats de cette deuxième étude suggèrent aussi qu'avant même de pouvoir accéder au sens du nombre, les enfants dyscalculiques ont des difficultés à reconnaître les nombres symboliques, un déficit qui n'avait jamais été identifié à ce jour et qui pourrait être la source même des difficultés d'accès au sens du nombre observés chez ces enfants.

L'étude 4 portait sur l'intégrité de la ligne numérique mentale des enfants dyscalculiques. En particulier, elle visait à étudier l'acuité numérique de la ligne numérique mentale en tant que telle et l'accès à cette ligne à partir des codes numériques symboliques arabe et oral. Considérant le modèle du Triple Code (Dehaene, 1992), elle portait sur l'intégrité du module analogique dans lequel les nombres sont représentés mentalement sur une ligne numérique horizontale compressible, allant des petits nombres à gauche vers les grands nombres à droite, ainsi que sur les connexions respectives des modules arabe et oral avec cette ligne numérique mentale. L'étude 4 évaluait aussi la quatrième et dernière étape du modèle développemental de l'acquisition numérique (Von Aster & Shalev, 2007) correspondant au développement d'une ligne numérique mentale mature. Le même groupe d'enfants dyscalculiques a été comparé au même groupe d'enfants sans difficulté dans le but d'évaluer leurs habiletés à placer un nombre (analogique, arabe, oral) sur une ligne numérique allant de 0 à 100 et, inversement, à produire un nombre (analogique, arabe, oral) à partir d'une position sur une ligne numérique allant de 0 à 100. Les résultats ont montré que, lorsque l'on observe la courbe des réponses (nombre positionné) par l'enfant en fonction du nombre cible demandé, les réponses de tous les enfants s'inscrivent dans une fonction linéaire pour chacune des modalités évaluées. Ces résultats sont donc congruents avec les travaux de Landerl, Fussenegger, Moll, & Willburger (2009) qui ont montré que des enfants dyscalculiques de 9-10 ans ont des courbes de réponses linéaires dans une tâche de positionnement de nombres arabes sur une ligne numérique, aussi bien que leurs pairs sans difficulté mathématique. Toutefois, la présente étude est la première à mettre en évidence que des enfants dyscalculiques âgés de 8-9 ans ont des courbes de réponse linéaires quelle que soit la modalité non symbolique ou symbolique des nombres de 0 à 100. Cependant, comparativement aux enfants sans difficulté mathématique, les courbes de réponse des enfants dyscalculiques sont moins linéaires. En effet, les résultats ont montré que le pourcentage de variance correspondant aux courbes de réponses linéaires des enfants dyscalculiques est significativement plus faible que celui de leurs pairs sans difficulté mathématique. De plus, ils produisent significativement plus d'erreurs lorsque la tâche implique le traitement des nombres symboliques

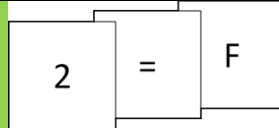

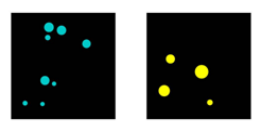
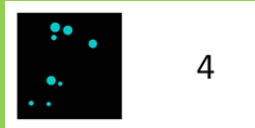
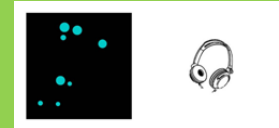
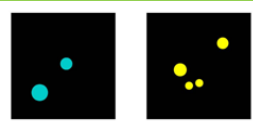
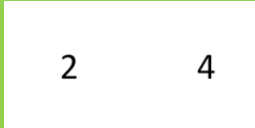
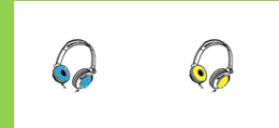
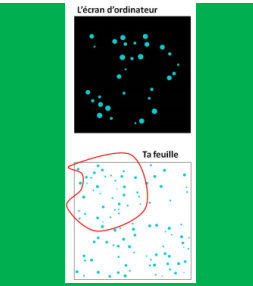
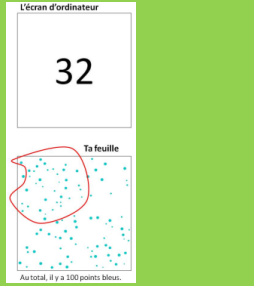
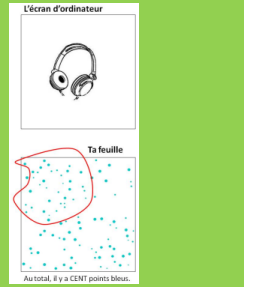
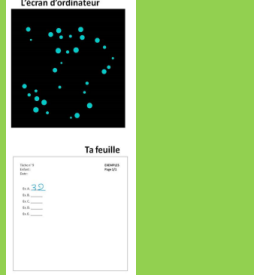
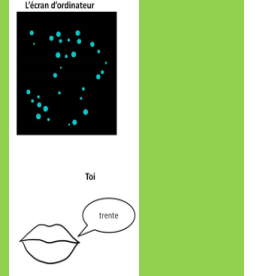
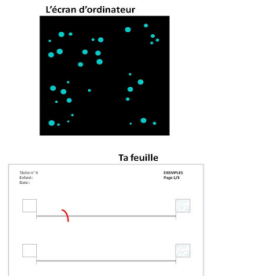

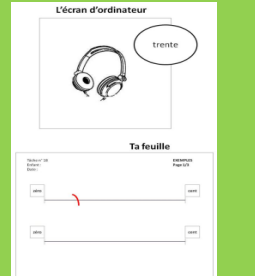
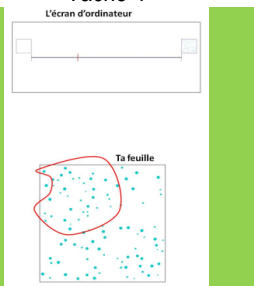
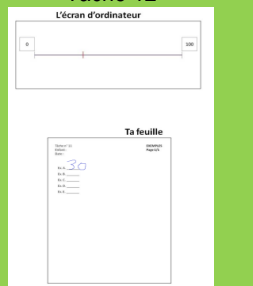
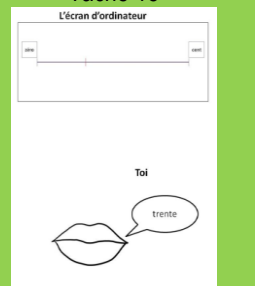
arabes et oraux. Lorsqu'elle implique plutôt le traitement des quantités analogiques, la performance (i.e., le pourcentage d'erreur) des enfants dyscalculiques est similaire à celle des enfants sans difficulté mathématique dans la tâche de placement d'un nombre analogique sur une ligne numérique, alors que le pourcentage d'erreur qu'ils produisent est supérieur à celui des enfants sans difficulté mathématique dans la tâche inverse de production d'un nombre analogique à partir d'une position sur une ligne numérique. Cette dissociation observée dans le traitement des quantités non symboliques peut s'expliquer par des caractéristiques intrinsèquement liées à la tâche et en particulier au sens du transcodage. En effet, la tâche de positionnement d'un nombre analogique vers une ligne numérique implique de percevoir une numérosité et de la positionner directement sur la ligne, favorisant ainsi une stratégie de perception visuospatiale globale (Luculano & Butterworth, 2011). En revanche, la tâche de production d'un nombre analogique à partir d'une ligne numérique impliquerait selon nous, de passer d'une quantité exprimée de façon continue à une quantité discontinue, favorisant ainsi le recours à une stratégie plus analytique telle que la médiation par un nombre symbolique, processus qui s'avère déficitaire chez ces enfants. Ainsi, ces résultats suggèrent que la dyscalculie n'est pas un déficit intrinsèque de la ligne numérique mentale, mais davantage un déficit pour accéder à celle-ci à partir des codes numériques symboliques.

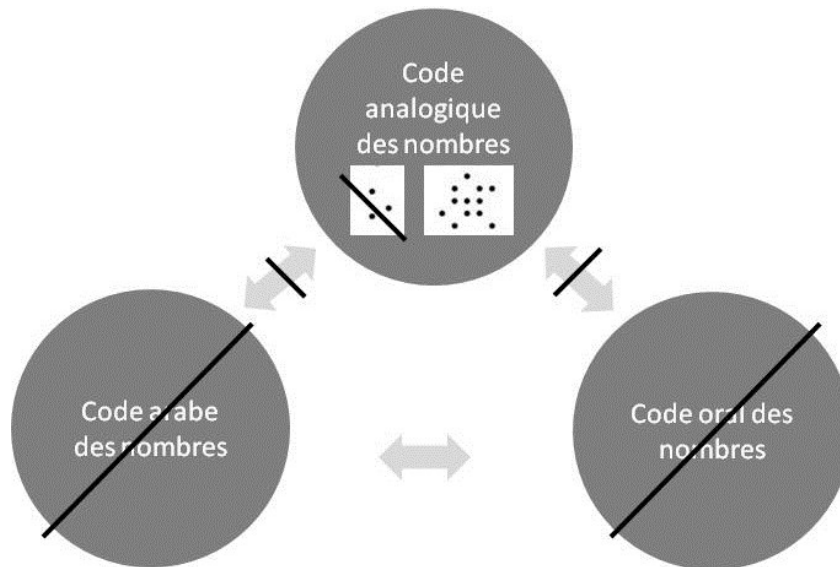
En résumé, les trois études expérimentales effectuées dans le cadre de cette thèse ont montré que les enfants dyscalculiques ne présentent pas de déficit général du sens du nombre : ils présentent un déficit de traitement précis des petites numérosités, mais une préservation des habiletés de traitement approximatif des grandes numérosités (tâches 1 et 2). De plus, ils montrent un déficit de reconnaissance des codes symboliques et un déficit d'accès au sens du nombre via les codes symboliques (voir la Figure 7). Ces déficits se manifestent par des difficultés dans les tâches de Reconnaissance de nombres en code arabe (tâche 6) et oral (tâche 7), ainsi que dans les tâches de Jugement d'association entre une numérosité et un nombre arabe (tâche 8) et oral (tâche 14), de Comparaison de nombres arabes (tâche 13) et oraux (tâche 19), de Production d'une numérosité à partir d'un nombre arabe (tâche 9) et oral (tâche 15), de Production d'un nombre arabe (tâche 10) et oral (tâche 16) à partir d'une numérosité, de Placement d'un nombre arabe (tâche 12) et oral (tâche 18) sur une ligne numérique, et de Production d'un nombre arabe (tâche 11) et oral (tâche 17) à partir d'une position sur une ligne numérique (voir le Tableau 14).

**Tableau 14. Récapitulatif des tâches expérimentales réussies et échouées par les enfants dyscalculiques**

Les cases vert clair correspondent aux tâches dans lesquelles les enfants dyscalculiques sont significativement moins performants que leurs pairs sans difficulté mathématique. La case vert foncé correspond à la tâche dans laquelle les enfants dyscalculiques sont significativement moins performants que leurs pairs sans difficulté mathématique, pour les petites et moyennes numérosités seulement. Les cases blanches correspondent aux tâches dans lesquelles les enfants dyscalculiques sont aussi performants que leurs pairs sans difficulté mathématique.

Analogique	Arabe	Oral
------------	-------	------

<p><b>Reconnaissance</b></p>	 <p>Tâche 6</p>	 <p>Tâche 7</p>	
<p><b>Compréhension Jugement</b></p>	 <p>Tâche 1</p>	 <p>Tâche 8</p>	 <p>Tâche 14</p>
<p><b>Compréhension Comparaison</b></p>	 <p>Tâche 5</p>	 <p>Tâche 13</p>	 <p>Tâche 19</p>
<p><b>Production non symbolique</b></p>	 <p>Tâche 2</p>	 <p>Tâche 10</p>	 <p>Tâche 16</p>
<p><b>Production symbolique</b></p>	 <p>Tâche 9</p>	 <p>Tâche 15</p>	
<p><b>Ligne numérique Nombre-à-Position</b></p>	 <p>Tâche 4</p>	 <p>Tâche 12</p>	 <p>Tâche 18</p>
<p><b>Ligne numérique Position-à-Nombre</b></p>	 <p>Tâche 3</p>	 <p>Tâche 11</p>	 <p>Tâche 17</p>



**Figure 7. Profil cognitif numérique des enfants dyscalculiques**

L'atteinte du module analogique représente le déficit du traitement précis des petites quantités. Les atteintes entre les modules symboliques (arabe, oral) et le module analogique représentent les déficits d'accès au sens du nombre via les codes symboliques (arabe, oral). Les atteintes des modules symboliques (arabe, oral) représentent les déficits de reconnaissance des codes symboliques (arabe, oral).

Un autre résultat important de la présente thèse est le fait que, dans chacune des trois études expérimentales, une évaluation cognitive détaillée a été effectuée auprès des enfants. Celle-ci a mis en évidence plusieurs éléments importants. Tout d'abord, individuellement, aucun enfant du groupe dyscalculique ne présentait un déficit en raisonnement, vitesse de traitement, langage oral, et mémoire. En revanche, la moitié présentait un déficit du langage écrit (i.e., lecture et orthographe), résultat cohérent avec les études de prévalence précédemment menées et montrant une forte comorbidité entre la dyscalculie et la dyslexie (ex., de 17 % (Gross-Tsur et al., 1996) à 43.3-65 % (Barbaresi et al., 2005) des enfants dyscalculiques sont également dyslexiques). Collectivement, le groupe des enfants dyscalculiques présentait des difficultés cognitives générales sur le plan du raisonnement non verbal, de la vitesse de traitement, de la mémoire de travail verbale, du langage oral et écrit. Une analyse de covariance a montré que la différence significative entre les groupes contrôle et dyscalculique quant au traitement précis des petites numérosités (étude 2), disparaissait lorsque le niveau de langage écrit était pris en considération. De même, la différence significative entre les deux groupes quant à la reconnaissance des codes symboliques et à l'accès au sens du nombre via les codes symboliques (étude 3) disparaissait également lorsque le niveau de langage écrit était pris en considération. L'ensemble de ces éléments semble ainsi en faveur de l'hypothèse explicative de la dyscalculie selon laquelle les troubles d'apprentissage mathématique résulteraient d'un déficit cognitif plus général (Geary, 1993, 2010).

## 7.2. Forces

Les travaux effectués dans le cadre de la présente thèse s'appuyaient principalement sur deux modèles théoriques du traitement cognitif des nombres, à savoir le modèle du Triple Code (Dehaene, 1992) et le modèle développemental de l'acquisition numérique (Von Aster & Shalev, 2007). D'après la recension de la littérature (étude 1), deux hypothèses cognitives numériques coexistent actuellement pour expliquer la dyscalculie, à savoir soit un déficit du sens du nombre, soit un déficit d'accès au sens du nombre. En s'appuyant sur ces deux modèles théoriques, la présente thèse a permis de documenter de manière rigoureuse le profil cognitif numérique des enfants dyscalculiques et d'évaluer ainsi l'intégrité / les déficits de 1) l'ensemble des modules analogique, arabe et oral, ainsi que les connexions entre le module analogique et les modules arabe et oral du modèle du Triple Code (Dehaene, 1992), et 2) l'ensemble des étapes du modèle développemental de l'acquisition numérique (Von Aster & Shalev, 2007) (à savoir le système quasi-inné du traitement des numérosités, les mots-nombres, les symboles arabes et la ligne numérique). La prise en compte de l'entièreté des éléments mis de l'avant dans chacun des modèles est l'une des principales contributions de la thèse sur le plan de l'avancement des connaissances. Elle a permis ainsi, par la mise en relation des différentes études effectuées, d'obtenir une vue d'ensemble des habiletés / déficits numériques impliqués dans la dyscalculie. Pour répondre à cet objectif de thèse, des aspects méthodologiques rigoureux ont d'ailleurs été mis en place.

Tout d'abord, des tâches originales ont été construites de façon à pouvoir évaluer l'ensemble des codes numériques. La plupart des études publiées à ce jour avait exploré de manière isolée le traitement du code analogique (Piazza et al., 2010 ; Price, Holloway, Räsänen, Vesterinen, & Ansari, 2007) ou le traitement des codes analogiques et arabes (Landerl, Bevan, & Butterworth, 2004; Landerl et al., 2009; Mazzocco et al., 2011; Mussolin, Mejias, & Noël, 2010) ou encore le lien entre code arabe et ligne numérique (les travaux de Siegler; Siegler & Opfer, 2003). Avant la présente thèse, aucune étude n'avait encore exploré le traitement du code oral et la connexion entre le code oral et le code analogique. De même, aucune étude n'avait exploré l'ensemble des codes numériques et des connexions chez un même groupe d'enfants.

De plus, les tâches expérimentales ont été construites dans le but d'étudier différents processus des traitements numériques (i.e. reconnaissance, compréhension et production de nombres) de façon à circonscrire l'origine fonctionnelle de l'atteinte chez les enfants dyscalculiques. Les précédentes études relatives aux processus numériques impliqués dans la dyscalculie avaient principalement exploré la compréhension des nombres par des tâches de comparaison (par exemple, Piazza et al., 2010) ou de production de nombres en code oral à partir de numérosités (par exemple, Schleifer & Landerl, 2011). Avant cette thèse, aucune étude n'avait encore exploré conjointement chez un même groupe d'enfants dyscalculiques l'ensemble des processus cognitif de traitement des nombres. Ainsi, les tâches expérimentales

développées dans cette thèse ont permis d'évaluer les processus de production (Production d'un nombre analogique à partir d'un nombre analogique (tâche 2), arabe (tâche 10) et oral (tâche 16); Production d'un nombre arabe (tâche 9) et oral (tâche 15) à partir d'un nombre analogique ; Placement d'un nombre analogique (tâche 4), arabe (tâche 12) et oral (tâche 18) sur une ligne numérique ; Production d'un nombre analogique (tâche 3), arabe (tâche 11) et oral (tâche 17) à partir d'une position sur une ligne numérique), de compréhension (Jugement de numérosités non symboliques (tâche 1), entre une numérosité et un nombre arabe (tâche 8) ou un nombre oral (tâche 14) ; Comparaison de numérosités non symboliques (tâche 5), de nombres arabes (tâche 13) et oraux, tâche 19) ; et de reconnaissance (Reconnaissance du code arabe (tâche 6) et oral, tâche 7) des nombres dans les trois codes numériques. Les résultats obtenus dans les trois études ont donc permis de préciser l'origine fonctionnelle de la dyscalculie et d'établir des comparaisons avec les résultats publiés à ce jour dans la littérature scientifique relative au traitement des nombres.

Ainsi, les aspects méthodologiques tels que le développement de tâches expérimentales originales basées sur des modèles théoriques ayant permis une évaluation cognitive générale et une évaluation détaillée du traitement numérique sont des forces de la présente thèse. La méthodologie adoptée a ainsi permis d'obtenir un portrait complet des habiletés des enfants au regard de l'intégrité des fonctions cognitives et de l'ensemble des codes et des processus numériques impliqués dans le traitement cognitif des nombres.

### **7.3. Limites**

Une première limite est relative à l'échantillon des participants des études. Bien que le nombre de vingt-quatre enfants dyscalculiques recrutés et évalués dans les études de cette thèse soit tout à fait conforme à ce qui se retrouve dans les écrits scientifiques pour ce type d'étude, il n'en reste pas moins relativement restreint. En particulier, la taille d'échantillon du présent projet était inférieure à celle des études de Ferreira et al. (2012) (53 enfants dyscalculiques), de Landerl et Kölle (2009) (51 enfants dyscalculiques) et de Schleifer et Landerl (2011) (52 enfants dyscalculiques). Toutefois, elle était supérieure à celle de Desoete, Ceulemans, De Weerd, et Pieters (2012) (16 enfants dyscalculiques) et de Price et al. (2007) (7 enfants dyscalculiques) et très comparable à la plupart des études répertoriées (par exemple : 20 enfants dyscalculiques (Andersson & Östergren, 2012) ; 22 enfants dyscalculiques (Ashkenazi, Mark-Zigdon, & Henik, 2013) ; 30 enfants dyscalculiques (Desoete & Grégoire, 2006) ; 19 enfants dyscalculiques (Geary et al., 2008) ; 20 enfants dyscalculiques (Landerl et al., 2009) ; 20 enfants dyscalculiques (Mazzocco et al., 2011) ; 23 enfants dyscalculiques (Mejias et al., 2011) ; 23 enfants dyscalculiques (Piazza et al., 2010)). La difficulté principale du recrutement a résidé dans le fait qu'aucun diagnostic de dyscalculie n'est posé au Québec et qu'un enfant dyscalculique ne bénéficie pas systématiquement d'une intervention par un professionnel (par exemple, orthopédagogue, orthophoniste, neuropsychologue). Pour contourner cette difficulté, le recrutement a été effectué directement dans les classes, sur la base de l'appréciation par les enseignants et les

orthopédagogues (ou orthophonistes) des difficultés mathématiques des enfants. Cependant, un bon nombre de ceux ayant été identifiés comme présentant des difficultés mathématiques ne correspondait pas à tous les critères diagnostiques de la dyscalculie tels que définis dans le DSM-V et ont dû être exclus (38.5 %). De plus, un critère important du DSM-V (2013) quant à la définition de la dyscalculie a trait à la persistance des troubles pendant au moins six mois. Pour répondre parfaitement à ce critère, il aurait fallu évaluer les habiletés mathématiques des enfants à deux temps différents séparés de plusieurs mois. Cela n'a pas pu être fait pour des contraintes temporelles liées à la réalisation de la thèse. Les enseignants et les orthopédagogues (ou orthophonistes) ont cependant été invités à confirmer ou non la persistance dans le temps des difficultés mathématiques pour chacun des enfants. Enfin, alors que le groupe d'enfants sans difficulté mathématique était constitué d'autant de filles (57 %) que de garçons (43 %), le groupe d'enfants dyscalculiques présentait une plus grande proportion de filles (83 %) que de garçons (17 %), une différence ne correspondant pas à ce qui est habituellement rapporté dans la littérature. En effet, Gross-Tsur et al. (1996) et Lewis et al. (1994) montraient une même proportion de filles et de garçons dyscalculiques, alors que Badian (1983) mettait en évidence un nombre plus important de garçons que de filles dyscalculiques. Aucune étude n'a cependant été réalisée quant au ratio fille / garçon chez les enfants franco-québécois. Des facteurs sociaux pourraient expliquer la réussite mathématique selon le genre. Huguet & Régner (2007, 2009) expliquaient en effet la différence mise en évidence entre les performances mathématiques des filles et des garçons français par l'existence de stéréotypes sociaux forts présents dans la société. D'ailleurs, selon l'étude PISA (2009), Programme International pour le Suivi des Acquis des élèves, réalisée par les pays membres de l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE), les filles canadiennes, anglophones et francophones de 15 ans ont indiqué avoir une moins grande confiance en leurs capacités mathématiques, des niveaux moins élevés quant à la perception qu'elles ont de leurs compétences mathématiques et des niveaux d'anxiété plus élevés relativement à cette matière. Il se pourrait ainsi que les filles franco-québécoises en difficulté mathématique aient plus de plainte et soient plus souvent repérées par les enseignants et orthopédagogues (ou orthophonistes).

Une seconde limite a trait à l'utilisation du Zareki-R, batterie pour l'évaluation du traitement des nombres et du calcul (Dellatolas & Von Aster, 2006), pour la mesure du niveau mathématique des enfants et la constitution des deux groupes d'enfants sans difficulté mathématique et dyscalculiques. Le Zareki-R avait préalablement fait l'objet d'une étude sur les performances des enfants franco-québécois âgés entre huit et neuf ans scolarisés en troisième année de primaire dans le but d'obtenir des normes de référence et d'identifier les enfants dyscalculiques (Lafay, St-Pierre, & Macoir, sous presse). Toutefois, plusieurs limites concernent tout de même l'utilisation de ce test. Premièrement, contrairement aux performances démontrées par l'échantillon décrit dans le manuel français du Zareki-R, les enfants franco-québécois âgés entre huit et neuf ans montrent de très bonnes performances, au point même d'observer un effet plafond tel que dans le sous-test

Dénombrement (moyenne de 5.6/6, écart-type de 0.6). De ce fait, bien que les performances totales au Zareki-R respectaient la loi normale et permettaient d'identifier les enfants en difficulté, les sous-tests en question se sont avérés parfois trop faciles pour les enfants franco-québécois âgés entre huit et neuf ans.

La troisième limite est relative aux critères d'inclusion / exclusion, et plus particulièrement au seuil qui a été utilisé (performances inférieures ou supérieures à -1.5 écarts-types de la moyenne) lors de l'évaluation mathématique des enfants avec le Zareki-R (Dellatolas & Von Aster, 2006) pour décider si un enfant présentait ou non des difficultés mathématiques. Il s'agit d'une méthode classique dans l'interprétation des tests standardisés et la sélection des enfants les plus faibles. Initialement, 37 enfants ont été identifiés sans difficulté et cela a été confirmé par les résultats au test mathématique (i.e. aucun score sous le seuil de -1.5 écarts-types). Cependant, un groupe de 8 enfants (21.6 %) a obtenu un score faible se situant entre -1 et -1.5 écarts-types. De même, parmi les 39 enfants identifiés par les enseignants comme ayant des difficultés mathématiques, seuls 24 (61.5 %) ont été retenus car ils présentaient effectivement un score mathématique sous le seuil de -1.5 écarts-types. Onze (28.2 %) d'entre eux ont cependant été exclus parce que leur score se situait au-dessus de ce seuil, dont 4 (10.3 %) avec un faible score se situant entre -1 et -1.5 écarts-types. Il aurait ainsi pu être pertinent de constituer un groupe d'enfants sans difficulté mathématique (29 enfants), un groupe d'enfants dyscalculiques (20 enfants), mais aussi un groupe d'enfants faibles (12 enfants), pour identifier les troubles du traitement numérique à l'origine de la dyscalculie ou de faibles performances mathématiques. D'ailleurs, Wong, Ho, et Tang (2015) ont tout récemment mis en évidence des profils cognitifs numériques distincts, à savoir un déficit du sens du nombre chez les enfants dyscalculiques (performances mathématiques sous le percentile 10) mais un déficit d'accès au sens du nombre via le code arabe des nombres chez les enfants faibles en mathématiques (performances entre le 11<sup>ème</sup> et le 25<sup>ème</sup> percentile). Il est donc envisageable que des analyses différenciées auprès de tels groupes auraient pu mener à affiner les résultats de la présente thèse. Considérer ainsi un groupe d'enfants faibles aurait pu être une avenue intéressante pour affiner les résultats. Cette distinction entre les enfants sans difficulté mathématique, les enfants faibles et les enfants dyscalculiques semble être une direction tout à fait pertinente pour la suite des études.

Enfin, une dernière limite concerne les tâches développées dans les études pour étudier les processus numériques de base que sont le subitizing des petites quantités et l'estimation des grandes quantités. Dans les tâches de production symbolique, le temps alloué étant de sept secondes, il était attendu que les petites quantités puissent être traitées et réussies par dénombrement. Dans les tâches de comparaison ou jugement, le temps alloué était plus court et l'enfant avait un maximum de quatre secondes pour répondre. Dans ces tâches, des précautions ont été mises en place pour faciliter une perception rapide des quantités et empêcher leur dénombrement. En effet, il était demandé explicitement à l'enfant dans la consigne de répondre le plus

vite possible. De plus, plusieurs exemples étaient prévus pour chacune des tâches pour l'inciter à procéder le plus rapidement possible et l'empêcher de dénombrer. Enfin, les analyses mettaient en évidence des temps de réponse très courts (environ 1200 ms dans la tâche de comparaison non symbolique) qui ne permettaient pas à l'enfant d'utiliser des stratégies externes tel que le dénombrement. Les temps observés dans notre étude étaient d'ailleurs en accord avec ceux observés par Mandler & Shebo (1982). Toutefois, le temps de présentation des quantités n'était pas limité à un temps très court (tel que 500 millisecondes par exemple) et il n'est donc pas absolument certain que les enfants (dyscalculiques, tout comme ceux sans difficulté) étaient impliqués dans de réels processus de perception quasi-instantanée des quantités sans aucun dénombrement des quantités de manière très rapide. De plus, une limite toute particulière a trait à la présentation des nombres oraux. En effet, alors que les nombres analogiques et arabes étaient présentés simultanément dans les tâches de comparaison, les nombres oraux étaient nécessairement présentés séquentiellement. Sur le plan cognitif, une présentation séquentielle auditive requiert une plus forte implication de la mémoire de travail qu'une présentation visuelle simultanée, à laquelle les participants peuvent se référer pour soutenir le traitement cognitif tout au cours de son déroulement. Or, l'évaluation cognitive dans la présente thèse a montré que le groupe des enfants dyscalculiques n'a pas uniquement des difficultés mathématiques mais aussi des difficultés cognitives générales sur le plan de la mémoire à court terme et de travail verbal. Une autre limite était relative aux ratios utilisés dans les tâches de comparaison et jugement non-symbolique et symbolique. Ces tâches comprenaient des nombres dont les ratios entre les deux quantités étaient de 1/2, 2/3 et 3/4, sans doute trop faciles pour les enfants étudiés compte tenu de leur âge. En effet, des enfants de 3-4 ans semblent tout à fait capables de discriminer deux quantités dont le ratio est de 1/2, 2/3 ou 3/4 (Halberda & Feigenson, 2008). Les futurs travaux devront ainsi considérer les ratios correspondant parfaitement à l'âge des enfants sans difficulté mathématique.

#### **7.4. Retombées**

La dyscalculie est un déficit d'apprentissage des mathématiques dont la prévalence s'étend jusqu'à 10 % selon certaines études. Par exemple, 6.2 % des enfants franco-québécois âgés de 8-9 ans au test mathématique Zareki-R présentent des difficultés avérées en mathématiques (Lafay, St-Pierre, & Macoir, en révision). De plus, selon les résultats d'une série d'études (Gross-Tsur et al., 1996; Shalev, Manor, Auerbach, & Gross-Tsur, 1998; Shalev, Manor, & Gross-Tsur, 2005), les difficultés mathématiques sont persistantes. Ainsi, 47% des enfants identifiés dyscalculiques à l'âge de 9-10 ans l'étaient toujours trois et six ans plus tard. Plus important encore, 95 % d'entre eux étaient toujours en difficulté mathématique à 15-16 ans et se situaient dans le quartile inférieur de leur classe d'âge. La faible performance en mathématique est également un des facteurs de risque de décrochage scolaire chez les élèves en école secondaire (Fortin, Royer, Potvin, Marcotte, Yergeau, 2004), pouvant donc entraîner des difficultés d'insertion professionnelle future. La

présente thèse s'inscrivait clairement dans une démarche qui vise à mieux comprendre les troubles cognitifs impliqués dans les difficultés mathématiques rencontrées dans le cadre de la dyscalculie. Les retombées de ce projet sont deux ordres : théorique et clinique.

#### 7.4.1. Retombées théoriques

Cette thèse avait pour objectif de mieux comprendre les troubles cognitifs impliqués dans les difficultés d'apprentissage des mathématiques. Ainsi la première retombée est naturellement d'apporter des données fondamentales permettant de mieux définir et caractériser les troubles cognitifs numériques dans la dyscalculie. Les explications cognitives numériques de la dyscalculie développées jusqu'à présent se situent dans un débat entre la présence d'un déficit du sens du nombre et la présence d'un déficit d'accès au sens du nombre via le code arabe chez les enfants dyscalculiques. La présente thèse permet donc d'alimenter ce débat et de montrer que les enfants dyscalculiques ne présentent pas de déficit général du sens du nombre, mais une atteinte limitée aux capacités de traitement précis des petites et moyennes quantités, ainsi qu'un déficit d'accès au sens du nombre via le code arabe quelle que soit la taille des quantités. De plus, elle permet, pour la première fois, de montrer que les enfants dyscalculiques ont également un déficit d'accès au sens du nombre via le code oral, suggérant ainsi la présence d'un déficit général d'accès au sens du nombre via les codes symboliques. Ces résultats sont confirmés par l'absence d'un déficit général de la ligne numérique mentale, mais la présence d'un déficit pour accéder à celle-ci à partir des codes numériques symboliques. Enfin, les résultats mettent également en évidence un déficit de reconnaissances des nombres symboliques (arabe et oral). Ainsi, la dyscalculie serait caractérisée par un déficit de traitement des nombres symboliques qui se manifeste par un trouble de la reconnaissance, ainsi que par un déficit d'accès au sens du nombre au départ des deux modules de traitement cognitif des nombres symboliques. La présente thèse s'appuyait principalement sur deux modèles théoriques du traitement cognitif des nombres, à savoir le modèle du Triple Code (Dehaene, 1992) et le modèle développemental de l'acquisition numérique (Von Aster & Shalev, 2007). En s'appuyant sur ces deux modèles, la présente thèse a permis de mettre en évidence des atteintes impliquant différents modules ou étapes de traitement cognitif des nombres. Si l'on considère tout d'abord le modèle du Triple Code (Dehaene, 1992), les résultats mis en évidence dans la présente thèse permettent d'identifier l'origine fonctionnelle de la dyscalculie développementale, soit une atteinte du module de traitement des nombres analogiques (déficit du traitement précis des petites et moyennes quantités) ainsi qu'une atteinte des modules de traitements des nombres symboliques (arabe et oral) et des connexions entre ces modules de traitements des nombres symboliques et le module de traitement des nombres analogiques. Si l'on considère le modèle développemental de l'acquisition numérique (Von Aster & Shalev, 2007), les résultats mis en évidence dans la présente thèse permettent d'identifier dans la dyscalculie développementale une atteinte partielle de la première étape du développement numérique, soit le système, quasi-inné, de

représentation numérique non symbolique utile pour le traitement des quantités d'objets (déficit du traitement précis des petites et moyennes quantités mais préservation du traitement approximatif des grandes quantités), une atteinte des deuxième et troisième étape du développement numérique, soit l'acquisition des mots-nombres dans l'enfance et l'apprentissage des symboles arabes à l'école, de même qu'un déficit dans l'accès à la ligne numérique mentale (quatrième étape) par les mots-nombres et les symboles arabes.

En étudiant les déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale, la présente thèse permet ainsi d'apporter un élément supplémentaire à la question de l'importance du Système Numérique Précis et du Système Numérique Approximatif dans le développement mathématique de l'enfant (voir Feigenson et al., 2004 pour une revue). En effet, certains auteurs (Chen & Li, 2014 ; Feigenson, Libertus, & Halberda, 2013 ; Libertus, 2015) considèrent que les fondements mathématiques sont davantage liés au Système Numérique Approximatif et à la capacité de discriminer approximativement des grandes quantités. Ce système est reconnu comme étant le sens du nombre et les fondements mathématiques que l'on retrouve chez l'humain sans culture ni langage mathématique, chez le bébé, et même chez l'animal. Cependant, d'autres auteurs (Butterworth, 1999; Carey, 2001, 2004) attribuent un rôle primordial au Système Numérique Précis et à la capacité à identifier précisément les petites quantités. Les résultats de la présente thèse, et en particulier ceux du chapitre 4, qui montrent que les enfants dyscalculiques étaient moins performants que les enfants sans difficulté mathématique pour traiter précisément des petites quantités, viennent soutenir l'idée de l'importance du Système Numérique Précis dans le développement mathématique de l'enfant. Ce système a en effet un rôle essentiel dans le développement mathématique, et plus particulièrement dans le développement des habiletés de traitement des nombres symboliques et la construction de représentations numériques précises (Chen & Li, 2014; Fazio, Bailey, Thompson, & Siegler, 2014; Libertus, 2015). En effet, le Système Numérique Précis aurait un rôle de médiateur entre le Système Numérique Approximatif et les nombres symboliques dans le sens où il permettrait la mise en correspondance entre les symboles (mots-nombres et arabe) et leur magnitude, la compréhension de la cardinalité, la compréhension de l'ordinalité, et la compréhension conceptuelle des opérations arithmétiques (Libertus, 2015).

La présente thèse permet, de manière plus générale, d'apporter des éléments de réponse supplémentaires à la question de la cognition numérique en tant que construit culturel, et notamment au débat quant à la possibilité que les compétences mathématiques et leur développement puissent être dépendantes de facteurs innés d'une part, mais aussi de facteurs acquis tels que l'acquisition des mots-nombres ou l'apprentissage des symboles arabes. D'ailleurs, dans le modèle développemental de l'acquisition numérique (Von Aster & Shalev, 2007), outre les aspects numériques non symboliques innés, le développement des représentations numériques s'effectue aussi par l'acquisition, très tôt dans la jeune enfance, des mots-nombres et leur association aux numérosités perçues et par l'apprentissage des symboles arabes qui ont donc tous deux une

place primordiale. Les résultats de la présente thèse ont montré que les enfants dyscalculiques présentent un déficit du traitement précis des petites et moyennes quantités, un déficit de traitement des nombres symboliques se manifestant à la fois par un déficit d'accès au sens du nombre et une acuité plus faible de la ligne numérique via les codes symboliques, et un déficit de reconnaissance des codes symboliques. Ainsi, ces résultats replacent au cœur du débat l'importance du traitement précis des petites quantités dépendant du Système Numérique Précis (i.e., subitizing) et de l'acquisition des mots-nombres et de l'apprentissage des symboles arabes dans le développement, la réussite et les troubles mathématiques. Ces résultats sont cohérents avec le modèle de Carey (2001, 2004) qui attribue une importance primordiale au subitizing et au langage dans le développement du concept de nombre : en effet, si les enfants perçoivent presque instantanément et de manière quasi innée les toutes petites quantités, ils deviennent capables d'associer une quantité précise à un mot-nombre précis grâce à l'acquisition des mots-nombres.

#### 7.4.2. Retombées cliniques

Mieux comprendre les troubles cognitifs impliqués dans les difficultés mathématiques engendre aussi tout naturellement des retombées cliniques importantes. En effet, une meilleure compréhension du fonctionnement numérique cognitif permet de mieux identifier les enfants dyscalculiques. Le débat entourant le déficit du sens du nombre et le déficit d'accès au sens du nombre via le code arabe a déjà été discuté dans les chapitres précédents. Néanmoins, nos résultats montrent l'importance de considérer ces déficits dans la dyscalculie, mais aussi la présence d'un déficit d'accès au sens du nombre via le code oral, de même que la présence d'un déficit à reconnaître les codes symboliques (arabe et oral) avant même d'y associer du sens numérique dans la démarche clinique d'évaluation et d'intervention. Il semble tout à fait pertinent d'intégrer l'évaluation du traitement des nombres dans l'évaluation mathématique, tant en compréhension qu'en production et en reconnaissance de nombres, pour cibler les habiletés et déficits de chaque enfant évalué par les professionnels et dresser un profil représentatif et complet de l'enfant dans ce domaine de compétences. À cet effet, les tâches de Reconnaissance de code arabe (tâche 6) et oral (tâche 7), ainsi que les tâches de Jugement d'association entre une numérosité et un nombre arabe (tâche 8) et oral (tâche 14), de Comparaison de nombres arabes (tâche 13) et oraux (tâche 19), de Production d'une numérosité à partir d'un nombre arabe (tâche 10) et oral (tâche 16), de Production d'un nombre arabe (tâche 9) et oral (tâche 15) à partir d'une numérosité, de Placement d'un nombre arabe (tâche 12) et oral (tâche 18) sur une ligne numérique, et de Production d'un nombre arabe (tâche 11) et oral (tâche 17) à partir d'une position sur une ligne numérique (voir Tableau 14), développées dans le cadre de la présente thèse s'avèrent pertinentes à intégrer dans une batterie d'évaluation des habiletés mathématiques étant donné que les déficits observés chez les enfants dyscalculiques se manifestent par des difficultés de traitement des nombres symboliques arabe et oral.

Par extension, une évaluation appropriée et bien menée permettra, sans nul doute, une intervention plus ciblée et plus adaptée aux troubles cognitifs numériques qui caractérisent chaque enfant dyscalculique. Par exemple, si l'évaluation d'un enfant X présentant des difficultés de calcul menait à conclure qu'il ne présente aucun déficit du sens du nombre pour les grandes quantités analogiques mais un déficit à traiter précisément les petites quantités analogiques, ainsi qu'un déficit d'accès au sens du nombre via les codes symboliques arabe et oral, les moyens d'intervention devraient être adaptés à ce profil cognitif numérique particulier. En effet, il serait tout à fait inutile d'intervenir au niveau du traitement approximatif des grandes quantités analogiques, alors qu'il serait pertinent de cibler le traitement cognitif précis des petites quantités analogiques, ainsi que des nombres en code arabe et oral, et plus exactement encore le lien entre le symbole et son sens. Par exemple, des entraînements basés sur des jeux axés sur le lien entre le nombre arabe et la quantité à laquelle il réfère pourraient être développés. Bien qu'encore très rares, les études portant sur l'intervention mathématique sont tout à fait prometteuses. Par exemple, Fischer, Königter, et Hartnegg (2008) ont montré chez des enfants dyscalculiques de 7-9 ans qu'un entraînement à une tâche de production de nombres en code oral à partir de nombres analogiques, d'une durée de dix à vingt minutes quotidiennement pendant trois semaines, améliore non seulement cette capacité à produire des nombres oraux, mais également les performances en arithmétique. En particulier, ces auteurs ont montré d'abord qu'un groupe d'enfants dyscalculiques s'améliore autant qu'un groupe sans difficulté mathématique, bien qu'ils restent plus faibles ; puis qu'un groupe d'enfants dyscalculiques ayant bénéficié de cet entraînement s'améliore, alors que les enfants dyscalculiques non traités ne s'améliorent pas. Malheureusement, aucune mesure de maintien dans le temps n'a été réalisée dans cette étude. Link, Moeller, Huber, Fischer, et Nuerk (2013) ont comparé deux types d'entraînements portant sur le positionnement de nombres arabes sur une ligne numérique d'une durée de quinze à vingt minutes trois fois par semaine pendant trois semaines : un groupe d'enfants suivait un entraînement classique consistant à placer des nombres sur une ligne via une tablette numérique ; et un autre groupe d'enfants suivait un entraînement sensori-moteur pendant lequel l'enfant devait se déplacer en marchant sur une ligne numérique au sol jusqu'à la position voulue. Les auteurs ont montré que les deux groupes d'enfants améliorent leur capacité d'estimation de nombres sur ligne numérique ainsi que leurs performances arithmétiques, mais que le groupe d'enfants ayant suivi l'entraînement sensori-moteur s'améliore davantage. Cependant, ces deux entraînements ont été réalisés avec des enfants en apprentissage et sans difficulté mathématique ; aucune comparaison avec un groupe sans entraînement n'a été effectuée et aucune mesure de maintien des acquis dans le temps n'a été réalisée. Cela dit, ces résultats sont tout de même prometteurs quant à ce qui pourrait être proposé à des enfants dyscalculiques. Par exemple, une étude intéressante pourrait être de comparer ces mêmes entraînements classique et sensori-moteur chez des enfants dyscalculiques, tout en prenant le soin d'intégrer dans l'étude un groupe contrôle sans entraînement ainsi que des mesures de maintien des acquis dans le temps. On s'attendrait à une

amélioration des deux groupes ayant suivi un entraînement dans le cadre d'une intervention numérique ciblée s'améliorent en comparaison au groupe contrôle qui n'a suivi aucun entraînement. En revanche, en s'appuyant sur la théorie de la cognition incarnée stipulant que les processus cognitifs sont profondément liés aux expériences sensori-corporelles (Wilson, 2002), on s'attendrait à une amélioration plus importante du groupe ayant suivi un entraînement sensori-moteur. De futures études devraient être menées pour vérifier ces hypothèses. De manière générale, de futures études devront être menées dans le but d'évaluer l'efficacité de méthodes thérapeutiques destinées à améliorer les habiletés numériques et mathématiques des enfants dyscalculiques.

## **7.5. Perspectives futures**

### **7.5.1. Perspectives fondamentales**

Compte-tenu des recherches antérieures et des résultats portés par le présent projet, des perspectives futures peuvent être dégagées. La thèse doctorale ouvre des issues intéressantes quant aux déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale. En effet, elle a permis par exemple de mettre en évidence des difficultés pour le traitement précis des petites quantités analogiques, pour les codes numériques symboliques et pour l'ensemble des processus de traitement numérique (reconnaissance, compréhension, production). Des études supplémentaires doivent poursuivre dans cette voie pour confirmer les résultats du présent projet.

Dans une perspective développementale, le modèle de Von Aster & Shalev (2007) décrit quatre étapes d'acquisition numérique, soit le système quasi-inné de perception des quantités, l'acquisition des mots-nombres, l'apprentissage des symboles arabes, la ligne numérique mentale mature. Le présent projet doctoral s'est intéressé à l'ensemble de ces étapes et a montré que les enfants dyscalculiques de 8-9 ans ne présentent pas de déficit général de perception des quantités mais un déficit spécifique de traitement précis des petites quantités (étape 1), ainsi qu'un déficit de traitement des nombres symboliques oral (étape 2) et arabe (étape 3), de même qu'un déficit à accéder à la ligne numérique mentale via les nombres symboliques (étape 4 qui pourrait être une conséquence directe d'un déficit des étapes 2 et 3). Toutefois, il semble nécessaire d'étudier la trajectoire développementale des habiletés / déficits numériques des enfants dyscalculiques car plusieurs questions restent en suspens. Par exemple, il est légitime de se demander si le déficit de traitement des nombres arabes est indépendant ou au contraire lié au déficit de traitement des nombres oraux, étape préalable selon le modèle développemental de l'acquisition numérique (Von Aster & Shalev, 2007). Une manière appropriée d'étudier ces aspects pourrait être un design d'étude comparative consistant à évaluer des groupes d'enfants dyscalculiques d'âges différents ayant un enseignement similaire en mathématique, ou un design longitudinal consistant à évaluer un même groupe d'enfants dyscalculiques à

plusieurs moments de leur développement. Considérant l'importance même de l'acquisition des mots-nombres, l'étude pourrait commencer avec des enfants de 5 ans scolarisés en maternelle. Une possibilité pourrait être d'étudier un large groupe d'enfants très jeunes, à partir de 2-3 ans recrutés en garderie par exemple et d'évaluer à plusieurs reprises leurs habiletés numériques. Un tel design longitudinal permettrait de répondre à la question du développement des habiletés numériques chez les enfants dyscalculiques, mais aussi à la question des éléments prédicteurs de réussite mathématique ou de dyscalculie.

Certaines études ont montré que les enfants dyscalculiques présentent un déficit du sens du nombre (ex. Davidse, De Jong, Shaul, & Bus, 2014). La présente thèse montre également un déficit spécifique du sens du nombre affectant le traitement des petites quantités. D'autres études (ex. Rousselle & Noël, 2007), dont la présente thèse, suggèrent que les enfants dyscalculiques présentent un déficit à accéder au sens du nombre via les codes symboliques. De plus, une évaluation cognitive générale a permis de mettre en évidence des déficits cognitifs non numériques (ex. lecture, mémoire). À partir de ces constats, il est possible d'envisager qu'il n'existe pas un seul type de dyscalculie et une unique cause à son apparition, mais divers profils dyscalculiques probablement engendrés par diverses causes cognitives. De futures études sont alors nécessaires pour répondre à cette hypothèse. A cet égard, plusieurs avenues sont envisageables.

Tout d'abord, il semble indispensable de réaliser des études supplémentaires avec des plus grands groupes d'enfants pour confirmer les profils cognitifs numériques observés chez les enfants dyscalculiques. Dans un même ordre d'idée, il serait intéressant de poursuivre l'étude des processus numériques chez des enfants dyscalculiques, dyscalculiques-dyslexiques et dyslexiques de manière à préciser la contribution respective des processus linguistiques et numériques à l'acquisition des habiletés mathématiques. Dans cette thèse, nous avons montré que les enfants dyscalculiques présentent un niveau moindre de lecture, ainsi qu'un déficit de reconnaissance des codes symboliques (arabe et oral). Il est alors logique de se demander si les enfants dyslexiques présentent aussi ces mêmes difficultés de reconnaissance des nombres ou s'ils présentent uniquement des difficultés de reconnaissance des lettres et des mots.

La présente thèse était exclusivement un projet portant sur des données comportementales. Toutefois, elle ouvre la porte à des perspectives dans le domaine des neurosciences cognitives. En effet, des anomalies cérébrales structurelles dans le sillon intrapariétal droit (Rotzer et al., 2008), ainsi que des anomalies fonctionnelles telles qu'un déficit d'activation du sillon intrapariétal dans des tâches numériques (Kucian et al., 2011; Price et al., 2007) ont été précédemment mises en évidence chez des enfants dyscalculiques, suggérant que ces anomalies neurologiques reflètent le déficit de traitement des nombres observé au niveau comportemental. De plus, l'équipe de Dehaene a récemment identifié une région ainsi nommée l'aire de la forme visuelle des nombres (ou Number Form Area) qui jouerait un rôle particulier dans la reconnaissance des

nombres visuels (Hannagan, Amedi, Cohen, Dehaene-lambertz, & Dehaene, 2015), tout comme l'aire de la forme visuelle des mots (ou Visual Word Form Area) et l'aire de la forme auditive des mots (ou Auditory Word Form Area) jouent respectivement un rôle dans la reconnaissance des lettres et des mots entendus. Plusieurs études mettent en évidence des anomalies au niveau de l'aire de la forme visuelle des mots chez les enfants dyslexiques (voir Richlan, Kronbichler, & Wimmer (2009) pour une revue). Cependant, aucune étude n'a jusqu'à présent exploré les aspects structurels et fonctionnels de l'aire de la forme visuelle des nombres chez les enfants dyscalculiques. De même, aucune étude ne semble avoir étudié l'intégrité de l'aire de la forme auditive des mots à l'écoute de mots-nombres chez les enfants dyscalculiques. Considérant l'ensemble de ces connaissances neurologiques et l'ensemble de nos résultats, nous pourrions supposer que les enfants présentant une dyscalculie pourraient présenter des anomalies au niveau du sillon intrapariétal compte-tenu de la présence d'un déficit spécifique du traitement des petites quantités analogiques et un déficit d'accès au sens du nombre via les codes symboliques arabe et oral, ainsi que des anomalies supplémentaires au niveau des aires de la forme visuelle des nombres, et de la forme auditive des mots entendus (spécifiquement sur les nombres éventuellement même) compte-tenu des déficits observés de reconnaissance des nombres. Ces hypothèses nécessitent d'être vérifiées par des études à la fois comportementales – pour réitérer les résultats de la présente thèse – et neuro-anatomiques pour étudier leurs corrélats neuronaux.

Une autre possibilité pour étudier l'origine cognitive de la dyscalculie serait de proposer des études dans lesquelles on évalue, non pas uniquement l'origine cognitive numérique de la dyscalculie, mais aussi l'origine cognitive générale de la dyscalculie et l'impact qu'un déficit cognitif général aurait sur les habiletés / déficits cognitifs numériques et sur le développement mathématique. En particulier, la mémoire de travail et les fonctions exécutives semblent impliquées dans ces processus (Geary, 1993, 2010), mais il reste à définir quelles sont les implications exactes de chacune de ces fonctions. Autrement dit, cela permettrait de comprendre comment le développement mathématique est influencé par les habiletés / déficits cognitifs numériques, eux-mêmes influencés par les habiletés / déficits cognitifs généraux. De même, cela permettrait de répondre plus largement à la question d'une dyscalculie spécifique, primaire, numérique, et isolée de l'atteinte des autres fonctions cognitives ou s'il existe des dyscalculies non spécifiques qui résultent de l'atteinte d'autres fonctions cognitives.

D'autres perspectives relatives au recrutement des enfants pourraient être considérées dans les études futures. Dans cette thèse, les enfants ont été recrutés sur la base de leur niveau mathématique général (dénombrement, calcul, lecture et dictée de nombres, résolution de problèmes, etc.). Or, développer des capacités de dénombrement ou des aptitudes à résoudre des problèmes verbaux ne dépend certainement pas des mêmes habiletés cognitives. De la même manière, présenter des difficultés en dénombrement ou des difficultés à résoudre des problèmes verbaux ne résulte vraisemblablement pas de déficits cognitifs identiques.

Ainsi, une perspective de recherche intéressante serait non pas de recruter les enfants sur la base de leur niveau mathématique global, mais davantage sur la base de leur niveau dans une habileté spécifiquement ciblée. Un tel mode de sélection permettrait ainsi de répondre non seulement à la question des déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale, mais à la question des habiletés cognitives impliquées dans les activités mathématiques spécifiques telles que le dénombrement ou la résolution de problèmes. C'est d'ailleurs la démarche adoptée tout récemment par De Visscher, Szmalec, Van Der Linden, et Noël (2015) qui ont étudié un groupe d'enfants présentant des difficultés mathématiques globales ainsi qu'un groupe d'enfants présentant spécifiquement des difficultés de récupération des faits arithmétiques pour évaluer leur profil d'habiletés en mémoire. Les résultats ont mis en évidence des profils différents : alors que les enfants avec des difficultés mathématiques globales présentaient un déficit d'apprentissage sériel (par exemple, apprendre la comptine numérique), les enfants avec des difficultés centrées sur le calcul présentaient une hypersensibilité à l'interférence mnésique (par exemple, production d'erreurs issues de la même table de multiplication (répondre 24 au lieu de 27 pour  $3 \times 9$  car 24 fait partie de la table de 3) que d'une autre table de multiplication) (voir Noël et al., 2013 pour une revue). Une démarche similaire pourrait permettre de circonscrire plus précisément les profils cognitifs numériques. Cette démarche permettrait donc de répondre à la question de la possibilité de profils divers de dyscalculie, à celle de l'origine cognitive de ces divers profils de dyscalculie, et plus largement à celle de l'implication des habiletés cognitives dans le développement d'une habileté mathématique spécifiquement ciblée.

Une autre façon de poursuivre l'étude des déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie pourrait être d'utiliser des protocoles de rééducation. Un paradigme classique développé dans plusieurs études consiste par exemple à établir un protocole d'éducation avec des enfants sans difficulté (par exemple Siegler & Ramani, 2008, 2009). Une issue similaire consisterait donc à établir un protocole de rééducation avec des enfants dyscalculiques en se basant sur leur profil cognitif numérique particulier. En effet, évaluer l'impact sur le développement mathématique d'un protocole portant spécifiquement sur un aspect donné reviendrait à évaluer l'implication causale de cet aspect sur le développement mathématique. Prenons le cas des enfants dyscalculiques de la présente thèse. Les résultats ont montré qu'ils présentaient un déficit spécifique du sens du nombre à traiter précisément les petites quantités analogiques et un déficit pour accéder au sens du nombre via les codes numériques arabe et oral. Ainsi, développer un protocole de rééducation spécifiquement axé sur les habiletés de traitement précis des petites quantités analogiques ou des nombres symboliques arabe et/ou oral et évaluer si ces protocoles ont un impact sur le développement mathématique (sur les habiletés de calcul, par exemple) serait un paradigme intéressant pour étudier la relation entre les deux habiletés.

### 7.5.2. Perspectives cliniques

La présente thèse permet d'envisager des perspectives cliniques à l'attention des professionnels pour évaluer et prendre en charge les difficultés mathématiques de l'enfant dyscalculique. En effet, très peu d'outils d'évaluation mathématique valides, standardisés et normalisés sont actuellement disponibles pour la population francophone (Lafay, St-Pierre, & Macoir, 2014). Encore plus rares sont les outils pour la population francophone québécoise. De même, la plupart sont des outils d'évaluation des habiletés mathématiques générales comme la lecture ou dictée de nombres, le calcul ou encore la résolution de problèmes mathématiques, mais très rares sont ceux qui évaluent les habiletés cognitives du traitement du nombre (sens du nombre, accès au sens du nombre via les codes symboliques, reconnaissance des codes symboliques, etc.). Les tâches développées dans le présent projet pourraient être utilisées pour construire, standardiser et valider un outil destiné à l'évaluation des habiletés numériques adapté à la population francophone québécoise des enfants de primaire.

Il a été évoqué plus haut l'idée de développer des études portant sur des interventions spécifiques afin de répondre au questionnement fondamental des déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie. Cependant, le but ne serait pas uniquement de mieux comprendre ce trouble, mais également d'évaluer l'efficacité d'interventions particulières avec des enfants dans une perspective d'application clinique. La plupart des études menées chez les enfants sans difficulté ont porté sur le développement mathématique et plus particulièrement sur les habiletés de subitizing (Barendregt, Lindström, Rietz-leppänen, Holgersson, & Ottosson, 2012) ou sur un entraînement à la ligne numérique (Fischer, Moeller, Bientzle, Cress, & Nuerk, 2011; Siegler & Ramani, 2009). Plus rares sont les travaux effectués avec des enfants diagnostiqués dyscalculiques. Par exemple, se sont montrés tous deux efficaces un entraînement au subitizing chez un groupe d'enfants dyscalculiques de 7 à 14 ans (Fischer, Köngeter, & Hartnegg, 2008) et un entraînement à la ligne numérique chez un groupe d'enfants dyscalculiques de 8 à 10 ans (Kucian et al., 2011) et chez un groupe de jeunes enfants à risque de dyscalculie (Friso-van den Bos et al., 2015). Des études supplémentaires sont donc nécessaires pour mesurer l'efficacité sur le développement mathématique d'une intervention relative aux traitements numériques chez des enfants dyscalculiques chez lesquels serait identifiée très précisément l'origine fonctionnelle du déficit numérique.

## 7.6. Conclusion

Cette thèse doctorale avait pour objectif principal de spécifier les déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale. Les résultats ont montré que les enfants dyscalculiques ne présentent pas de déficit général du sens du nombre, mais un déficit spécifique à traiter précisément les petites quantités analogiques, ainsi qu'un déficit de traitement des nombres symboliques (arabe et oral) se manifestant à la fois

par un déficit d'accès au sens du nombre via les codes symboliques, mais également un déficit de reconnaissance des codes symboliques, et une plus faible acuité de la ligne numérique lorsqu'elle implique le traitement des nombres symboliques.

Cette thèse constitue donc une avancée de plus dans le débat sur l'origine fonctionnelle de la dyscalculie et participe à une meilleure identification des enfants dyscalculiques. Davantage de recherches sont nécessaires pour mieux comprendre les différents profils repérables dans le but ultime d'améliorer et d'adapter au mieux les diagnostics et les interventions (ré)éducatives des enfants présentant des difficultés mathématiques.



## Bibliographie

- American Psychiatric Association (2013). *Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders (DSM-5)*. Arlington, VA: APA.
- Andersson, U., & Östergren, R. (2012). Number magnitude processing and basic cognitive functions in children with mathematical learning disabilities. *Learning and Individual Differences, 22*(6), 701–714. <http://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.05.004>
- Antell, S. E., & Keating, D. P. (1980). Perception of numerical invariance in neonates. *Child Development, 54*, 695–701.
- Ashcraft, M. H., & Kirk, E. P. (2001). The relationships among working memory, math anxiety, and performance. *Journal of Experimental Psychology, 130*(2), 224–237. <http://doi.org/10.1037/0096-3445.130.2.224>
- Ashkenazi, S., Mark-Zigdon, N., & Henik, A. (2013). Do subitizing deficits in developmental dyscalculia involve pattern recognition weakness? *Developmental Science, 16*(1), 35–46. <http://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2012.01190.x>
- Badian, N. (1983). Dyscalculia and nonverbal disorders of learning. In *Progress in Learning Disabilities* (Grune and , Vol. 5). New-York: H.R. Myklebust.
- Badian, N. (1999). Persistent Arithmetic, Reading, or Arithmetic and Reading Disability. *Annals of Dyslexia, 49*, 45–70.
- Barbarese, W. J., Katusic, S. K., Colligan, R. C., Weaver, A. L., & Jacobsen, S. J. (2005). Math learning disorder: incidence in a population-based birth cohort, 1976-82, Rochester, Minn. *Ambulatory Pediatrics, 5*(5), 281–289. <http://doi.org/10.1367/A04-209R.1>
- Barendregt, W., Lindström, B., Rietz-leppänen, E., Holgersson, I., & Ottosson, T. (2012). Development and Evaluation of Fingu: A Mathematics iPad Game Using Multi-touch Interaction. *IDC, 204–207*.
- Blanc, D., & Camos, V. (2006). Les prémices du nombre. In *La cognition mathématique chez l'enfant*, pp. 45–70. Marseille: Solal.
- Brannon, E. M. (2005). *What animals know about numbers*. In J.I.D. Campbell (Ed.), *Handbook of mathematical cognition* (pp.85–107). New-York: Hove Psychology Press.
- Butterworth, B. (1999). *The mathematical brain*. MacMillian.
- Butterworth, B., Reeve, R., Reynolds, F., & Lloyd, D. (2008). Numerical thought with and without words: Evidence from indigenous Australian children. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 105*(35), 13179–84. <http://doi.org/10.1073/pnas.0806045105>
- Carey, S. (2001). Cognitive Foundations of Arithmetic : Evolution and Ontogenesis. *Mind & Language, 16*(1), 37–55.
- Carey, S. (2004). Bootstrapping & the origin of concepts. In *Doedalus*, 59–68.
- Chen, Q., & Li, J. (2014). Association between individual differences in non-symbolic number acuity and math

- performance: A meta-analysis. *Acta Psychologica*, 148, 163–172.  
<http://doi.org/10.1016/j.actpsy.2014.01.016>
- Clements, D. H. (1999). *Subitizing: What Is It? Why Teach It? Subitizing: A Long History. Teaching Children Mathematics*. Reston, VA: National Council of Teachers of Mathematics.
- Davidse, N. J., de Jong, M. T., Shaul, S., & Bus, A. G. (2014). A twin-case study of developmental number sense impairment. *Cognitive Neuropsychology*, 30, 1–16. <http://doi.org/10.1080/02643294.2013.876980>
- De Visscher, A., Szmalec, A., Van Der Linden, L., & Noël, M.-P. (2015). Serial-order learning impairment and hypersensitivity-to-interference in dyscalculia. *Cognition*, 144, 38–48.  
<http://doi.org/10.1016/j.cognition.2015.07.007>
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1–42.
- Dehaene, S. (2010). *La bosse des maths, 15 ans après*. Paris: Odile Jacob.
- Dellatolas, G., & Von Aster, V. (2006). *Zareki-R, Batterie pour l'évaluation du traitement des nombres et du calcul chez l'enfant*. Paris: ECPA.
- Desoete, A., Ceulemans, A., De Weerd, F., & Pieters, S. (2012). Can we predict mathematical learning disabilities from symbolic and non-symbolic comparison tasks in kindergarten? Findings from a longitudinal study. *Issue British Journal of Educational Psychology*, 82(1), 64–81.
- Desoete, A., & Grégoire, J. (2006). Numerical competence in young children and in children with mathematics learning disabilities. *Learning and Individual Differences*, 16(4), 351–367.  
<http://doi.org/10.1016/j.lindif.2006.12.006>
- Devine, A., Soltész, F., Nobes, A., Goswami, U., & Szűcs, D. (2013). Gender differences in developmental dyscalculia depend on diagnostic criteria. *Learning and Instruction*, 27, 31–39.  
<http://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2013.02.004>
- Dietrich, J. F., Huber, S., & Nuerk, H.-C. (2015). Methodological aspects to be considered when measuring the approximate number system (ANS) – a research review. *Frontiers in Psychology*, 6, 1–14.  
<http://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.00295>
- Dirks, E., Spyer, G., van Lieshout, E. C. D. M., & de Sonneville, L. (2008). Prevalence of combined reading and arithmetic disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, 41(5), 460–73.  
<http://doi.org/10.1177/0022219408321128>
- Donlan, C., Cowan, R., Newton, E. J., & Lloyd, D. (2007). The role of language in mathematical development: Evidence from children with specific language impairments. *Cognition*, 103(1), 23–33.  
<http://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.02.007>
- Durkin, K., Mok, P. L. H., & Conti-Ramsden, G. (2013). Severity of specific language impairment predicts delayed development in number skills. *Frontiers in Psychology*, 4, 581.  
<http://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00581>
- Everett, C. (2013). Independent cross-cultural data reveal linguistic effects on basic numerical cognition. *Language and Cognition*, 5(1), 99–104. <http://doi.org/10.1515/langcog-2013-0005>
- Fazio, L. K., Bailey, D. H., Thompson, C. A., & Siegler, R. S. (2014). Relations of different types of numerical

- magnitude representations to each other and to mathematics achievement. *Journal of Experimental Child Psychology*, 123(1), 53–72. <http://doi.org/10.1016/j.jecp.2014.01.013>
- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. S. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307–14. <http://doi.org/10.1016/j.tics.2004.05.002>
- Feigenson, L., Libertus, M. E., & Halberda, J. (2013). Links Between the Intuitive Sense of Number and Formal Mathematics Ability. *Child Development Perspectives*, 7(2), 74–79. <http://doi.org/10.1111/cdep.12019>
- Ferreira, F., Wood, G., Pinheiro-Chagas, P., Lonnemann, J., Krinzinger, H., Willmes, K., & Haase, V. (2012). Explaining school mathematics performance from symbolic and nonsymbolic magnitude processing: similarities and differences between typical and low-achieving children. *Psychology and Neuroscience*, 5(1), 37–46. <http://doi.org/10.3922/j.psns.2012.1.06>
- Fischer, B., Köngeter, A., & Hartnegg, K. (2008). Article Effects of Daily Practice on Subitizing , Visual Counting , and Basic Arithmetic Skills. *Optometry & Vision Development*, 39(1), 30–34.
- Fischer, U., Moeller, K., Bientzle, M., Cress, U., & Nuerk, H.-C. (2011). Sensori-motor spatial training of number magnitude representation. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18(1), 177–83. <http://doi.org/10.3758/s13423-010-0031-3>
- Forster, K. I., & Forster, J. C. (2003). DMDX: a windows display program with millisecond accuracy. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 35(1), 116–24. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12723786>
- Fortin, L., Royer, É., Potvin, P., Marcotte, D., & Yergeau, É. (2004). La prédiction du risque de décrochage scolaire au secondaire: Facteurs personnels, familiaux et scolaires. *Canadian Journal of Behavioural Science*, 36(3), 219–231. <http://doi.org/10.1037/h0087232>
- Frank, M. C., Everett, D. L., Fedorenko, E., & Gibson, E. (2008). Number as a cognitive technology: evidence from Pirahã language and cognition. *Cognition*, 108(3), 819–24. <http://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.04.007>
- Friso-van den Bos, I., van Luit, J. E. H., Kroesbergen, E. H., Xenidou-Dervou, I., van Lieshout, E. C., van der Schoot, M., & Jonkman, L. M. (2015). Number line development in children at-risk for dyscalculia: Predictors and mathematical proficiency. *Zeitschrift Für Psychologie*. [http://doi.org/10.1016/S0969-4765\(04\)00066-9](http://doi.org/10.1016/S0969-4765(04)00066-9)
- Geary, D. C. (1993). Mathematical disabilities: Cognitive, neuropsychological, and genetic components. *Psychological Bulletin*, 114(2), 345–362. <http://doi.org/10.1037/0033-2909.114.2.345>
- Geary, D. C. (2010). Mathematical Disabilities: Reflections on Cognitive, Neuropsychological, and Genetic Components. *Learning and Individual Differences*, 20(2), 130–133. <http://doi.org/10.1016/j.lindif.2009.10.008>
- Geary, D. C., Bailey, D. H., Littlefield, A., Wood, P., Hoard, M. K., & Nugent, L. (2009). First-Grade Predictors of Mathematical Learning Disability: A Latent Class Trajectory Analysis. *Cognitive Development*, 24(4), 411–429. <http://doi.org/10.1016/j.cogdev.2009.10.001>
- Geary, D. C., Hoard, M. K., Nugent, L., & Byrd-craven, J. (2008). Developmental Neuropsychology Development of Number Line Representations in Children With Mathematical Learning Disability. *Memory*, 37–41.

- Gordon, P. (2004). Numerical cognition without words: evidence from Amazonia. *Science*, 306(5695), 496–9. <http://doi.org/10.1126/science.1094492>
- Gross-Tsur, V., Manor, O., & Shalev, R. S. (1996). Developmental dyscalculia: prevalence and demographic features. *Developmental Medicine and Child Neurology*, 38(1), 25–33. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8606013>
- Halberda, J., & Feigenson, L. (2008). Developmental change in the acuity of the “Number Sense”: The Approximate Number System in 3-, 4-, 5-, and 6-year-olds and adults. *Developmental Psychology*, 44(5), 1457–65. <http://doi.org/10.1037/a0012682>
- Hannagan, T., Amedi, A., Cohen, L., Dehaene-lambertz, G., & Dehaene, S. (2015). Origins of the specialization for letters and numbers in ventral occipitotemporal cortex. *Trends in Cognitive Sciences*, 19(7), 1–9. <http://doi.org/10.1016/j.tics.2015.05.006>
- Huguet, P., & Régner, I. (2007). Stereotype threat among schoolgirls in quasi-ordinary classroom circumstances. *Journal of Educational Psychology*, 99(3), 545–560. <http://doi.org/10.1037/0022-0663.99.3.545>
- Huguet, P., & Régner, I. (2009). Counter-stereotypic beliefs in math do not protect school girls from stereotype threat. *Journal of Experimental Social Psychology*, 45(4), 1024–1027. <http://doi.org/10.1016/j.jesp.2009.04.029>
- INSERM. (2007). *Dyslexie, Dysorthographe, Dyscalculie. Bilan des données scientifiques*. Paris.
- Iuculano, T., & Butterworth, B. (2011). Understanding the real value of fractions and decimals. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 64(11), 2088–2098. <http://doi.org/10.1080/17470218.2011.604785>
- Jenßen, L., Dunekacke, S., Eid, M., & Blömeke, S. (2015). The Relationship of Mathematical Competence and Mathematics Anxiety. *Zeitschrift Für Psychologie*, 223(1), 31–38. <http://doi.org/10.1027/2151-2604/a000197>
- Kolkman, M. E., Kroesbergen, E. H., & Leseman, P. P. M. (2013). Early numerical development and the role of non-symbolic and symbolic skills. *Learning and Instruction*, 25, 95–103. <http://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2012.12.001>
- Kucian, K., Grond, U., Rotzer, S., Henzi, B., Schönmann, C., Plangger, F., ... von Aster, M. (2011). Mental number line training in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage*, 57(3), 782–95. <http://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.01.070>
- Lafay, A., St-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (2013). Développement des systèmes numériques non symboliques et prédicteurs de réussite mathématique. *Glossa*, 112, 1–17.
- Lafay, A., St-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (2014). L'évaluation des habiletés mathématiques de l'enfant : inventaire critique des outils disponibles. *Glossa*, 116, 33–58.
- Lafay, A., St-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (sous presse). Performances moyennes des enfants franco-québécois de 8-9 ans au test mathématique Zareki-R. *Glossa*.
- 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. <http://doi.org/10.1016/j.cognition.2003.11.004>

- Landerl, K., Fussenegger, B., Moll, K., & Willburger, E. (2009). Dyslexia and dyscalculia: two learning disorders with different cognitive profiles. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(3), 309–24. <http://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.03.006>
- Landerl, K., & Kölle, C. (2009). Typical and atypical development of basic numerical skills in elementary school. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(4), 546–65. <http://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.12.006>
- Lewis, C., Hitch, G. J., & Walker, P. (1994). The prevalence of specific arithmetic difficulties and specific reading difficulties in 9- to 10-year-old boys and girls. *Journal of Child Psychology and Psychiatry, and Allied Disciplines*, 35(2), 283–92. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/8188799>
- Libertus, M. E. (2015). The Role of Intuitive Approximation Skills for School Math Abilities. *Mind, Brain, and Education*, 9(2), 112–120.
- Link, T., Moeller, K., Huber, S., Fischer, U., & Nuerk, H.-C. (2013). Walk the number line – An embodied training of numerical concepts. *Trends in Neuroscience and Education*, 2(2), 74–84. <http://doi.org/10.1016/j.tine.2013.06.005>
- Mandler, G., & Shebo, B. J. (1982). Subitizing: an analysis of its component processes. *Journal of Experimental Psychology*, 111(1), 1–22. <http://doi.org/10.1037/0096-3445.111.1.1>
- Mazzocco, M. M. M., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Impaired acuity of the approximate number system underlies mathematical learning disability. *Child Development*, 82(4), 1224–37. <http://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2011.01608.x>
- Mejias, S., Mussolin, C., Rousselle, L., Grégoire, J., & Noël, M.-P. (2011). Numerical and nonnumerical estimation in children with and without mathematical learning disabilities. *Child Neuropsychology*, 37–41. <http://doi.org/10.1080/09297049.2011.625355>
- Moradpour, S., Rostamy-malkhalifeh, M., Behzadi, M. H., & Shahvarani, A. (2015). The Study of the Relationship between Mothers' Anxiety with the Mathematical Performance and Students' Anxiety, 2015(1), 1–6. <http://doi.org/10.5899/2015/metr-00068>
- Mussolin, C., Mejias, S., & Noël, M.-P. (2010). Symbolic and nonsymbolic number comparison in children with and without dyscalculia. *Cognition*, 115(1), 10–25. <http://doi.org/10.1016/j.cognition.2009.10.006>
- Noël, M.-P., & Rousselle, L. (2011). Developmental Changes in the Profiles of Dyscalculia: An Explanation Based on a Double Exact-and-Approximate Number Representation Model. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5, 165. <http://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00165>
- Noël, M.-P., Rousselle, L., & De Visscher, A. (2013). La dyscalculie développementale : à la croisée de facteurs numériques spécifiques et de facteurs cognitifs généraux. *Développements*, 15, 24–31.
- Passolunghi, M. C. (2011). Cognitive and Emotional Factors in Children with Mathematical Learning Disabilities. *International Journal of Disability, Development and Education*, 58(1), 61–73. <http://doi.org/10.1080/1034912X.2011.547351>
- Piazza, M., Facoetti, A., Noemi, A., 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. <http://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.03.012>

- Price, G. R., Holloway, I. D., Räsänen, P., Vesterinen, M., & Ansari, D. (2007). Impaired parietal magnitude processing in developmental dyscalculia. *Current Biology*, *17*(24), R1042–3. <http://doi.org/10.1016/j.cub.2007.10.013>
- Price, G. R., Mazzocco, M. M. M., & Ansari, D. (2013). Why mental arithmetic counts: brain activation during single digit arithmetic predicts high school math scores. *The Journal of Neuroscience*, *33*(1), 156–63. <http://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2936-12.2013>
- Richlan, F., Kronbichler, M., & Wimmer, H. (2009). Functional abnormalities in the dyslexic brain: A quantitative meta-analysis of neuroimaging studies. *Human Brain Mapping*, *30*(10), 3299–3308. <http://doi.org/10.1002/hbm.20752>
- Rotzer, S., Kucian, K., Martin, E., von Aster, M., Klaver, P., & Loenneker, T. (2008). Optimized voxel-based morphometry in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage*, *39*(1), 417–22. <http://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.08.045>
- Rousselle, L., & Noël, M.-P. (2007). Basic numerical skills in children with mathematics learning disabilities: a comparison of symbolic vs non-symbolic number magnitude processing. *Cognition*, *102*(3), 361–95. <http://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.01.005>
- Roux, M.-O. (2014). Surdit  et difficultés d'apprentissage en mathématiques, état des lieux et probl matiques actuelles. *Bulletin de Psychologie*, *4*(532), 295–307.
- Schleifer, P., & Landerl, K. (2011). Subitizing and counting in typical and atypical development. *Developmental Science*, *2*(14), 280–291. <http://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.00976.x>
- Shalev, R. S., Manor, O., Auerbach, J., & Gross-tsur, V. (1998). Persistence of developmental dyscalculia: What counts? *The Journal of Pediatrics*, *133*(3), 358–362.
- Shalev, R. S., Manor, O., & Gross-Tsur, V. (2005). Developmental dyscalculia: a prospective six-year follow-up. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *47*(2), 121–125. <http://doi.org/10.1017/S0012162205000216>
- Share, D. L., Moffitt, T. E., & Silva, P. a. (1988). Factors Associated with Arithmetic-and-Reading Disability and Specific Arithmetic Disability. *Journal of Learning Disabilities*, *21*(5), 313–320. <http://doi.org/10.1177/002221948802100515>
- Siegler, R. S., & Opfer, J. E. (2003). The Development of Numerical Estimation: Evidence for Multiple Representations of Numerical Quantity. *Psychological Science*, *14*(3), 237–250. <http://doi.org/10.1111/1467-9280.02438>
- Siegler, R. S., & Ramani, G. B. (2008). Playing linear numerical board games promotes low-income children's numerical development. *Developmental Science*, *11*(5), 655–61. <http://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00714.x>
- Siegler, R. S., & Ramani, G. B. (2009). Playing linear number board games—but not circular ones—improves low-income preschoolers' numerical understanding. *Journal of Educational Psychology*, *101*(3), 545–560. <http://doi.org/10.1037/a0014239>
- Starkey, P., & Cooper, R. G. (1980). Perception of numbers by human infants. *Science*, *210*, 1033–1035.
- Von Aster, M., & Shalev, R. S. (2007). Number development and developmental dyscalculia. *Developmental*

*Medicine & Child Neurology*, 49, 868–873.

Wilson, A. J., & Dehaene, S. (2007). Number Sense and Developmental dyscalculia. In *Human Behavior learning, and the developping brain: atypical development* (pp. 212–237). New-York: Guilford Press.

Wilson, M. (2002). Six views of embodied cognition. *Psychonomic Bulletin & Review*, 9(4), 625–636.  
<http://doi.org/10.3758/BF03196322>

Wong, T. T.-Y., Ho, C. S.-H., & Tang, J. (2015). Defective Number Sense or Impaired Access? Differential Impairments in Different Subgroups of Children With Mathematics Difficulties. *Journal of Learning Disabilities*. <http://doi.org/10.1177/0022219415588851>

Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, 358, 749–750.