Université CLAUDE BERNARD LYON1
INSTITUT DES SCIENCES et TECHNIQUES DE READAPTATION **N° 1810**

MEMOIRE présenté pour l'obtention du

CERTIFICAT DE CAPACITE D'ORTHOPHONISTE

Par

COMBE Lucie
VIEUX Mathilde

Automatisation des procédures arithmétiques dans la dyscalculie

Directeur de Mémoire

PRADO Jérôme

Membres du Jury

GONZALEZ Sibylle
CHOSSON Christelle
LEVY Hagar

Date de Soutenance
30 Juin 2016

ORGANIGRAMMES

1. UNIVERSITÉ CLAUDE BERNARD LYON 1

Président
Pr. FLEURY Frédéric

Président du Conseil Académique
Pr. BEN HADID Hamda

Vice-président CA
Pr. REVEL Didier

Vice-président CFVU
Pr. CHEVALIER Philippe

Vice-président CS
M. VALLEE Fabrice

Directeur Général des Services
M. HELLEU Alain

1.1 Secteur Santé :

U.F.R. de Médecine Lyon Est
Directeur **Pr. ETIENNE Jérôme**

U.F.R de Médecine et de maïeutique - Lyon-Sud Charles Mérieux
Directeur **Pr. BURILLON Carole**

Comité de Coordination des Etudes Médicales (C.C.E.M.)
Pr. ETIENNE Jérôme

U.F.R d'Odontologie
Directeur **Pr. BOURGEOIS Denis**

Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques
Directeur **Pr. VINCIGUERRA Christine**

Institut des Sciences et Techniques de la Réadaptation
Directeur **Dr. PERROT Xavier**

Département de Formation et Centre de Recherche en Biologie Humaine
Directeur **Pr. SCHOTT Anne-Marie**

1.2 Secteur Sciences et Technologies :

U.F.R. de Sciences et Technologies
Directeur **M. DE MARCHI Fabien**

U.F.R. de Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (S.T.A.P.S.)
Directeur **M. VANPOULLE Yannick**

Institut des Sciences Financières et d'Assurance (I.S.F.A.)
Directeur **M. LEBOISNE Nicolas**

Observatoire Astronomique de Lyon
Directeur **Mme DANIEL Isabelle**

Ecole Supérieure du Professorat et de l'Education
Directeur **M. MOUGNIOTTE Alain**

POLYTECH LYON
Directeur **M. PERRIN Emmanuel**

Ecole Supérieure de Chimie Physique Electronique de Lyon (ESCPE)
Directeur **M. PIGNAULT Gérard**

IUT LYON 1
Directeur **M. VITON Christophe**

2. INSTITUT DES SCIENCES ET TECHNIQUES DE LA RÉADAPTATION

Directeur ISTR : Dr Xavier PERROT

FORMATION ORTHOPHONIE

Directeur de la formation
Agnès BO
Professeur Associé

Responsable des mémoires de recherche
Agnès WITKO
M.C.U. en Sciences du Langage

Responsables de la formation clinique
Claire GENTIL
Fanny GUILLON

Chargées de l'évaluation des aptitudes aux études
en vue du certificat de capacité en orthophonie
Anne PEILLON, *M.C.U. Associé*
Solveig CHAPUIS

Responsable de la formation continue
Maud FERROUILLET-DURAND

Secrétariat de direction et de scolarité
Bertille GOYARD
Ines GOUDJIL
Delphine MONTAZEL

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier chaleureusement toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail de recherche.

Comment ne pas commencer ces remerciements par notre Directeur de Mémoire Jérôme Prado sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour. Nous le remercions sincèrement pour son accueil au sein de l'équipe, pour sa disponibilité, pour son soutien et ses conseils précieux. De l'Institut des Sciences Cognitives nous remercions également Romain pour son écoute sans faille et son implication : tu nous auras sauvées de bien des faux pas ! Nous remercions, bien entendu, toute l'équipe : Justine, Jessica, Auriane, Flora, Xavier et Ludivine.

Par ces quelques mots nous adressons un merci tout particulier à tous les enfants qui ont accepté de donner de leur temps pour notre travail. Sans eux, rien n'aurait été possible, nous leur souhaitons bonne route pour leur avenir. Nous adressons également une pensée à leurs familles qui nous ont fait confiance et se sont investies dans ce projet. Nous mesurons la chance d'avoir pu rencontrer des familles qui ont parfois même accepté de nous ouvrir leurs portes : Merci… Infiniment !

Pour nous avoir permis de rencontrer ces familles et ces enfants, un merci haut en couleur à toutes les orthophonistes qui ont pris le temps, qui nous ont insufflé des vagues d'encouragement et de motivation. Merci pour votre investissement qui nous a permis d'y voir plus clair dans certains moments de doutes. A Magali Thirion pour son implication sans faille ; merci de nous avoir ouvert si naturellement les portes de ton cabinet et pour ton accueil si chaleureux. A Armelle Picard-Gallet pour son intérêt et son aide à la constitution de notre population. Egalement un grand merci à Anne Lafay pour ses idées, ses conseils, sa motivation qui traverse les écrans.

Un merci tout spécial à Lucie Beauvais. Vos interventions pertinentes, votre intérêt, votre écoute et votre accompagnement tout au long de cette dernière année nous aurons été d'un grand secours !

A vous, Papa et Maman, mes soutiens de tous les instants, mes piliers. Merci pour votre patience, pour vos conseils, pour tout ce que vous m'apportez au quotidien et depuis toujours. Plus que de vous dire merci, je préfère utiliser les bons mots : Je vous aime.

A Toi, un merci infini pour ta présence, ton soutien de tous les instants. Les mots que tu m'adresses au quotidien qui me permettent d'avancer toujours d'un pas plus grand. Merci de marquer, toi aussi, de ton empreinte, ce beau projet accompli…en attendant les autres.

Encore une douce pensée pour Coralie, toujours présente, dans les bons moments comme les plus délicats. Merci à toi de ton soutien. Maintenant, en avant pour la grande aventure !

Une belle dédicace pour la Garde Rapprochée : Alice, Gab' et Andréa. Si vous saviez combien vous comptez pour moi…depuis toujours !

A ma famille toute entière, pour votre patience et votre confiance. Je vous adresse mille mercis pour vos appels, vos messages et votre affection constante. A mes amis de toujours : Julien, Laura et Lucie. Votre présence est une richesse infinie. A Léa, merci de m'avoir accompagnée, bientôt ce sera toi ! Aux copines de promo, Esther, Julie, Raph et toutes les autres, un grand merci pour votre soutien, nos éclats de rire et nos conversations sans fin. Je suis ravie de commencer ce voyage professionnel avec vous.

Enfin, comment ne pas saluer notre binôme qui a su tenir la barre durant ces deux années de travail intensif. Ce travail restera une grande fierté.

SOMMAIRE

SUMMARY

A recent study suggests that adults use automated procedures to solve single-digit addition and subtraction problems (Mathieu et al. 2016). These counting strategies would be associated with very rapid horizontal shifts of attention along a mental number line. In the present study, we examined the development of these attention shifts in children, and we looked for differences in the development of these shifts between typically developing children and children with Mathematics Disabilities (MD). We asked 8 to 14 years old children (24 MD and 32 controls) to solve single-digit addition and subtraction problems. The first operand and the arithmetic sign were presented sequentially in the center of the computer screen whereas the second operand appeared either to the left or to the right visual field. For the addition problems, we did not find any effect of the position of the second operand neither for MD nor for control children, regardless of age. However, we found that from the age of 12-13, our control children were faster to solve subtraction problems when the second operand appeared in the left visual field, while MD children were never influenced by the position of the second operand. These results suggest that in typically developing children, subtraction solving is associated with leftward spatial shifts of attention. We think that these attention shifts might emerge with arithmetic practice: practicing arithmetic may generate an automatization of movements to the left of the mental line. We did not find this automatization in our population of MD children. This suggests that MD children may present a deficit of automatization of calculation procedures involved in subtraction. This data provides a new insight on the procedures at play during the solving of small subtraction problems. It also contributes to understanding the cognitive functioning of MD. Investigating this automatization procedure could be interesting to adapt the diagnosis and management of MD children.

KEY-WORDS

Mathematics Disabilities – Arithmetic – Procedure – Retrieval – Attention shift – Mental number line – Arithmetic sign – Response time

INTRODUCTION

« Les mathématiques sont le langage avec lequel Dieu créa l'Univers » Galilée.

Galilée, ou l'une des premières figures dans la connaissance des mathématiques, n'était pas si loin du compte concernant leur importance, tant les mathématiques sont présentes dans notre vie et rythment notre quotidien : lire l'heure, rendre la monnaie, suivre une recette de cuisine, se déplacer d'un point à un autre, réaliser des travaux chez soi…

Imaginons alors une personne présentant des difficultés pathologiques dans le domaine des mathématiques, face à ces situations : inverser les chiffres sur le cadrant d'une montre et ne pas pouvoir retrancher des minutes, ne pas faire de différence entre 2 euros et 20 centimes, ne pas pouvoir mesurer une quantité dans une recette, être en grande difficulté pour planifier un déplacement géographique, ne pas pouvoir mesurer la superficie d'une pièce… Autant d'exemples qui illustrent de manière non exhaustive le quotidien des personnes dyscalculiques.

Nous parlerons dans ce mémoire de dyscalculie et non de trouble logico-mathématiques. Bien que les termes dyscalculie et troubles logico-mathématiques s'opposent en apparence, ils ne représentent qu'une divergence théorique et non une différenciation clinique. Alors que la notion de trouble logico-mathématique fait appel au modèle de Jean Piaget, la notion de dyscalculie renvoie aux modèles neuropsychologiques, c'est-à-dire à des « modules cognitifs » (ou capacités cognitives) qui seraient atteints. Etant donné que la recherche tend à explorer les causes cognitives de la dyscalculie, nous parlerons ici uniquement de dyscalculie au sens neuropsychologique. Il est également important de noter que le terme de trouble logico-mathématique semble être restreint au milieu clinique francophone et n'est, à notre connaissance, pas retrouvé dans la littérature internationale sur la dyscalculie. Malgré cette divergence de conception théorique, dans la clinique, ces termes renvoient aux mêmes manifestations symptomatiques.

La dyscalculie se définit actuellement comme un déficit spécifique d'apprentissage avec un trouble en mathématique ou en arithmétique, de degré de sévérité variable (American Psychiatric Publishing, 2015).

Pourquoi se pencher sur la dyscalculie dans la cadre de l'orthophonie, spécialité de la parole et de la communication ? De nombreuses orthophonistes rapportent se sentir démunies face à ce type de pathologie, faute de matériel, d'éléments de compréhension concrets et récents et surtout, faute de matériel adéquat pour le diagnostic.

L'objectif de ce travail de recherche est d'apporter un éclairage sur les causes de la dyscalculie pour développer une prise en soin et un matériel orthophonique de pertinent.

Actuellement, quelques symptômes cliniques significatifs de la dyscalculie sont identifiables en orthophonie. Mais qu'en est-il au niveau cognitif ? Quel module semble atteint ? Quel mécanisme cognitif diffère par rapport à un enfant tout-venant ? Ces questionnements ont permis la formulation de nos hypothèses théoriques. Ainsi, pour tenter de faire suite aux récents projets de recherche sur la dyscalculie, cette étude aura pour objectif d'analyser l'automatisation des procédures arithmétiques chez les enfants dyscalculiques.

Pour cela et dans un premier temps, le terme de dyscalculie sera défini et la pathologie sera présentée sous tous ses aspects (cliniques, neurologiques, prévalence…). Les hypothèses causales qui s'affrontent, issues des différentes recherches seront également présentées : un déficit spécifique (Butterworth, 2005) et le déficit global (Bull, 2001). Par la suite, seront exposées en détail les théories autour de l'arithmétique, qui sous-tendent la réflexion de cette étude: le modèle de récupération (Ashcraft, 1992) en opposition au modèle procédural (Baroody, 1983, 1984, 1994). Un point sera également consacré à la compréhension des opérations mentales mises en œuvre dans une tâche spécifique de calcul. Enfin, certaines notions ayant un impact direct sur les processus cognitifs arithmétiques seront abordées.

La problématique, les objectifs ainsi que les hypothèses de cette étude, qui découlent de la lecture approfondie d'une grande partie de la littérature scientifique sur la cognition mathématique seront formulées.

Une troisième partie permettra de présenter le protocole expérimental ainsi que les modalités de passation des expérimentations proposées dans cette étude.

Les résultats statistiques issus de l'analyse des données recueillies auprès des participants seront présentés dans une partie dédiée.

Pour finir, la discussion proposera une interprétation des résultats présentés précédemment. De plus, ce sera l'occasion de réfléchir aux limites de ce travail de recherche mais également à son intérêt scientifique, clinique et théorique. Ceci permettra la suggestion de nouvelles perspectives de recherche en droite lignée de cette étude dans le but d'améliorer toujours plus notre compréhension de la dyscalculie.

Chapitre I

PARTIE THEORIQUE

I Dyscalculie

Notre mémoire aborde la dyscalculie, qui est une pathologie entrant dans le champ d'intervention de l'orthophonie. Afin de présenter cette pathologie, nous allons tout d'abord donner les définitions officielles du trouble et les enjeux de la recherche dans ce domaine. Puis nous verrons les bases neurologiques sous tendant cette pathologie, ainsi que l'aspect clinique et diagnostique. Enfin, nous finirons sur la problématique de la variété des hypothèses causales de la dyscalculie

1 Définitions et généralités :

La dyscalculie (ou dyscalculie développementale) est un trouble neurodéveloppemental affectant les facultés arithmétiques d'un individu. Bien que les aspects cliniques et les symptômes concrets soient identifiés, sa définition reste variable en fonction de la classification utilisée. Dans ce mémoire, nous nous référons principalement à la définition donnée dans le DSM V (American Psychiatric Publishing, 2015). Il décrit la dyscalculie comme un déficit spécifique d'apprentissage avec un trouble en mathématique, ayant plusieurs niveaux de sévérité. Il s'agit d'une atteinte résultant d'un désordre neurodéveloppemental d'origine biologique, qui confère à l'individu un niveau inférieur au niveau prévu à son âge. De plus, les difficultés doivent s'inscrire dans la durée et ne pas être supérieures à celles attendues en cas de présence d'un autre trouble (notamment de déficience intellectuelle).

Les autres classifications apportent quelques nuances à cette définition que nous prenons en référence. La Classification Internationale des Maladies 10 (OMS, 2006) ajoute que les difficultés doivent être non imputables exclusivement à un retard mental global ou une scolarisation inadéquate, et que l'altération concerne la maitrise des éléments de base du calcul. La Classification Française des Troubles Mentaux de l'Enfant et de l'Adolescent (CFTMEA) reprend les mêmes éléments que ceux de la CIM 10 (Misès et al., 2012).

La notion stipulant que la dyscalculie altère les éléments de base du calcul peut être nuancée. En effet, il existe un débat sur le fait que la dyscalculie est un trouble homogène ou hétérogène (Kaufmann, 2013), la littérature nous poussant à croire que l'ensemble des apprentissages mathématiques peuvent être atteints. Plusieurs auteurs ont tenté de classifier les dyscalculies, en fonction des troubles observés. Ainsi, Rosselli et Matute (2005) proposent une division entre les dyscalculies liées à des difficultés de langage écrit et les dyscalculies relevant d'une atteinte non-verbale. Noël (2005) oppose quant à elle les dyscalculies touchant les faits arithmétiques et leurs procédures, aux dyscalculies liées à l'utilisation des codes arithmétiques (arabe et oral). Enfin, Geary (1994) affirme que les difficultés pourraient concerner spécifiquement les opérations arithmétiques, les procédures, ou les capacités spatiales de représentation des faits.

Comme précisé plus haut, il semble que la dyscalculie soit un trouble hétérogène, ayant des signes cliniques variables en fonction des individus. D'après la revue de Kucian et von Aster (2015), plusieurs éléments peuvent être atteints, mais on retrouve principalement 3 niveaux comportementaux pouvant être lésés. Tout d'abord, les précurseurs arithmétiques sont altérés : le sens du nombre, l'estimation des quantités, les capacités de subitizing réduites. Ensuite, les capacités numériques peuvent également être atteintes : représentations numériques imprécises, problèmes de comptage et une ligne numérique mentale moins précise et moins accessible. Le troisième niveau pouvant être atteint est le niveau des compétences de calcul : on peut trouver des stratégies immatures telles que le comptage digital, une résolution des faits arithmétiques limitée, un manque de compréhension des problèmes (aux différents degrés de difficulté), une compréhension des procédures et concepts de calculs altérée. Ces difficultés propres aux mathématiques peuvent avoir des répercussions conséquentes, tant dans les apprentissages que dans la vie quotidienne (cf. 2.2 Impacts de la dyscalculie)

2 Enjeux et place dans la recherche

2.1 Prévalences

La notion de prévalence n'est pas encore bien établie dans la dyscalculie. En effet comme le souligne Butterworth (2005) les critères discriminant la pathologie de la norme restent vagues sur le plan quantitatif. Il est à noter qu'aucune étude n'a été menée en France à ce sujet, ce qui illustre la méconnaissance de cette pathologie dans notre pays. De plus, il n'existe pas de seuil statistique précis à utiliser systématiquement lors d'un test normalisé pour poser le diagnostic. Néanmoins, on estime que ce seuil se trouve entre le 25ème et le 10ème percentile, selon les études. Ainsi, les prévalences peuvent varier entre 3 et 10% comme le présente le tableau (cf. Annexe I). Cet écart révèle le flou autour du diagnostic de la dyscalculie.

Butterworth (2005) propose l'utilisation d'un critère qualitatif, même si cette démarche rend le diagnostic plus empirique. Le diagnostic de dyscalculie ne pourrait alors être posé qu'en cas d'écart significatif à la norme dans les tâches arithmétiques, mais il faudrait également que les difficultés soient responsables d'une situation de handicap, professionnel, personnel ou quotidien.

2.2 Impacts de la dyscalculie

Il est difficile d'appréhender de façon précise quelles sont les conséquences d'une dyscalculie, d'autant plus que celles-ci varient en fonction de la spécificité de la pathologie, des stratégies de compensation, du milieu, etc.

De nos jours, les études tendent à montrer que la dyscalculie est responsable d'une situation de handicap supérieure à la dyslexie tant dans la vie quotidienne que dans la vie professionnelle (Bynner et Parsons, 1997). En effet, un mauvais niveau en arithmétique amenuise grandement les perspectives dans le monde du travail. La dyscalculie influe directement sur les capacités d'embauche, ainsi que le statut économique de la personne (Parsons & Bynner, 2005). Ainsi, alors que la dyscalculie n'a été reconnue qu'en 2001 par l'éducation du Royaume-Uni (DfES, 2001), il apparait que de pauvres capacités en arithmétique sont responsables d'un handicap plus important sur le marché du travail que de faibles capacités en lecture (Butterworth, 2005).

La dyscalculie influe également sur la vie quotidienne et personnelle, notamment dans une société où les nouvelles technologies prennent une place majeure. Effectivement, les symboles et calculs arithmétiques sont présents dans de nombreuses routines, à tel point qu'il est inévitable d'y être confrontés de manière journalière. Ils sont indispensables pour gérer nos comptes, faire des courses, lire l'heure…etc.

2.3 Retentissement budgétaire des difficultés mathématiques

Si la dyscalculie occupe une place aussi importante dans la vie des individus, qu'en est-il de son coût dans la société ?

Les faibles capacités en mathématiques constituent un handicap qui a un coût important pour les Etats (Gross et al., 2009). Cette caractéristique est peu abordée mais pourtant, il apparait que les difficultés en arithmétique rendent les individus plus susceptibles à la dépression, les rendent moins employables et réduisent l'espérance de vie. Ce sont des situations qui mènent à des coûts publics importants tant au niveau du chômage que de la sécurité sociale. Au Royaume-Uni, on estime que le pourcentage de personnes ayant des difficultés en mathématiques atteint 25% des adultes (Bynner & Parsons, 1997). Même si dans ce pourcentage, seule une partie est atteinte de dyscalculie, on peut penser que cette situation de flou diagnostique et de manque de prise en charge adaptée a un coût.

En outre, dans le domaine de la recherche, l'investissement n'est guère plus important. Depuis 2000, aux Etats-Unis, l'Institut National de la Santé (NIH) a consacré 107,2 millions de dollars à la recherche sur la dyslexie, contre 2,3 millions à celles sur la dyscalculie (Bishop, 2010).

3 Bases neurologiques :

Dans le domaine de l'arithmétique et de la dyscalculie, de nombreuses corrélations entre les données comportementales et les données en neuro-imagerie ont été identifiées. Les aires cérébrales sollicitées lors des tâches arithmétiques sont principalement des zones pariétales (Cipolotti & van Harskamp, 2001) et lorsque la tâche se complexifie, des régions frontales sont activées (Nieder & Dehaene, 2009; Zamarian, Ischebeck, & Delazer, 2009). En particulier, la région du sillon intrapariétal est cruciale car son activation varie en fonction de l'âge étudié, ceci étant dû à sa spécialisation dans la représentation du nombre. Bugden, Price, McLean, & Ansari (2012) montrent en effet que lors d'une tâche de comparaison de nombres symboliques, les enfants de 8 à 9 ans activent trois régions principales, associées au traitement du nombre : le gyrus frontal inférieur, le gyrus frontal gauche et le sillon intrapariétal gauche. Or, seule la différence d'activation de cette dernière région diffère significativement en fonction du groupe de niveau faible/fort en mathématiques, ce qui illustre un lien probant entre données cérébrales et comportementales. La figure 20 (Annexe II), extraite de l'article concerné, illustre les trois régions citées.

En ce qui concerne le cerveau de la personne dyscalculique, de nombreuses données ont d'ores et déjà été révélées. La zone du sillon intra-pariétal apparait ici encore comme cruciale. En effet, on observe à cet endroit une matière grise réduite (Mussolin, Mejias, & Noël, 2010; Rotzer et al., 2008; Rykhlevskaia et al., 2009) ainsi qu'une activité réduite chez les personnes dyscalculiques lors de tâches de comparaison de points, de comparaison de nombres et de tâches arithmétiques (Kucian et al., 2006; Mussolin et al., 2010; Price, Holloway, Räsänen, Vesterinen, & Ansari, 2007). Par ailleurs, Rykhlevskaia et al. (2009)

observent des différences de connexions entre les régions pariétales et entre les aires pariétales ; entre les aires pariétales et occipito-temporales.

C'est la neuropsychologie qui nous a permis de relier le rôle principal du sillon intra-pariétal droit dans le traitement des grandeurs numériques de base. Cette information est à mettre en lien avec le dysfonctionnement pariétal chez les dyscalculiques. Selon Price et al. (2007), le déficit dans le traitement du nombre et les difficultés de développement des capacités arithmétiques découle de cette anomalie neuro-anatomique. Butterworth, Varma, & Laurillard (2011) ont représenté un tableau afin de résumer les liens de causalité des troubles dans les trois niveaux biologique, cognitif et comportemental (cf. Annexe II).

Kucian et al. (2011) ajoutent que ces altérations structurelles et fonctionnelles semblent endommager la ligne numérique mentale. En effet, des données en Imagerie à Résonance Magnétique fonctionnelle (IRMf) montrent que les enfants tout-venant et les adultes ont des activations similaires au niveau fronto-pariétal, notamment au niveau du sillon intra-pariétal. Les dyscalculiques, eux, présentent une activation moindre de cette zone, et des activations frontales plus intenses. Ceci serait dû à une utilisation accrue de la mémoire de travail lorsque les représentations mentales sont altérées.

4 Diagnostic et clinique :

4.1 Comorbidités cognitives

Il est indéniable que la dyscalculie est fortement liée à nombre d'autres pathologies. Von Aster & Shalev (2007) rapportent que 20 à 60% des personnes atteintes de dyscalculie présentent également un autre trouble. Ces atteintes associées entravent tant la clinique que la recherche car il est alors difficile et non pertinent d'isoler le critère « dyscalculie » chez un individu.

Les plus fortes comorbidités de la dyscalculie semblent être le trouble du déficit de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDA(H) (Monuteaux, Faraone, Herzig, Navsaria, & Biederman, 2005; Rotzer et al., 2009; O. Rubinsten, Bedard, & Tannock, 2008; Orly Rubinsten, 2009) et la dyslexie (Gross-Tsur, Manor, & Shalev, 1996; Landerl & Moll, 2010).

Néanmoins, la question du lien entre ces troubles n'est pas résolue, et il reste complexe de savoir, dans un cas donné, ce qui relève du trouble secondaire ou du trouble primaire (Von Aster et Shalev 2007).

4.2 Dyscalculie et troubles psychopathologiques

Par ailleurs, il apparait que les enfants présentant des troubles des apprentissages sont plus fréquemment affectés par les pathologies psychiques, que les enfants tout-venant (30-50% contre 8 à 18%) (Vedi & Bernard, 2012). Plus spécifiquement, les enfants ayant une dyscalculie développent très fréquemment une anxiété liée aux mathématiques voire une phobie scolaire (Krinzinger & Kaufmann, 2006).

En effet, il est maintenant courant de parler d'anxiété liée aux mathématiques, qui se définit par un sentiment de tension, une mauvaise confiance en soi, un faible niveau de mémoire de travail, des capacités de comptage et une faiblesse de la représentation mentale des grandeurs numériques (Rubinsten, 2015).

4.3 Evaluation, traitement et persistance des troubles

Dans le domaine de l'évaluation, Rubinsten (2015) propose d'utiliser deux types de tests : ceux ciblant le niveau neurocognitif et ceux ciblant l'implicite. En effet, les tests cognitifs permettent dans un premier temps d'objectiver le trouble de la manipulation du numérique, notamment non symbolique. Il s'avère que plus le diagnostic est précoce, plus la remédiation est possible sur ce point. Ces tests objectifs sont les tests standardisés utilisés couramment pour évaluer ce domaine (exemple : ZAREKI – R). Les tests visant l'implicite permettent quant à eux d'évaluer l'anxiété, qui est souvent présente chez les dyscalculiques. Rubinsten & Tannock (2010) proposent une tâche évaluant ce domaine affectif spécifique. Face à l'hétérogénéité majeure rapportée sur le trouble dyscalculique (Kaufmann et al. 2013), le traitement et la remédiation sont des sujets complexes. Il apparait donc important d'identifier les déficits spécifiques de chaque individu afin de proposer un support adapté (Butterworth et al., 2011). Cependant, cette solution idéale de l'individualisation n'a pas été objectivée, et n'est pas réellement applicable au quotidien.

En termes de remédiation, les neurosciences proposent des tâches ayant pour but de rendre plus précises les représentations mentales des grandeurs numériques. On trouve parmi ces tâches « Number Race » de Wilson et al. (2006), ou « Linear Number Board Game » par Siegler & Ramani (2009). Ces exercices entrainent notamment la ligne numérique mentale et favorisent donc les représentations plus précises des nombres dans l'espace. Kucian et al. (2011) proposent un entrainement de ce type avec la tâche « Rescue Calcularis » et objectivent les progrès des dyscalculiques après cet entrainement, tant dans les représentations mentales que dans les tâches arithmétiques, et ce même après une période de latence post-entrainement. Ce résultat a été confirmé par des données IRMf, avec une diminution de l'activation des aires frontales chez les dyscalculiques (zones dévolues à la mémoire de travail). Les dyscalculiques s'approchaient alors du pattern d'activation des enfants tout venant et des adultes, avec une activation privilégiée du sillon intrapariétal lorsque la représentation du nombre est sollicitée. De plus, des études ont montré que les feed-back, informatifs ou non, donnent à l'enfant des motivations extrinsèques et intrinsèques intéressantes dans ce type de cas (Bruner, 1961; Dewey, 1938).

Ces premières données ne permettent pas de savoir comment « transformer » un dyscalculique en un calculateur typique. La dyscalculie se rapprocherait de la dyslexie, où les capacités peuvent être augmentées par une intervention précoce sans pour autant aboutir à un processus cognitif typique. Selon Shalev, Manor, & Gross-Tsur (2005) la persistance des difficultés est liée à la sévérité du trouble initial, un quotient intellectuel normal faible, ainsi qu'à des difficultés d'attention et d'écriture associées. Gerber (2012) et Butterworth et al. (2011), soulignent également cette persistance du trouble à l'âge adulte, notamment sans « traitement ».

5 Hypothèses causales :

Deux courants principaux sont envisagés : l'un présentant l'hypothèse d'un déficit spécifique au domaine arithmétique, et un second soutenant celle d'un déficit global des fonctions exécutives.

5.1 Déficit spécifique

Cette première hypothèse voudrait que la dyscalculie soit un déficit spécifique au nombre et au concept de numérosité (Butterworth, 2005; Shalev et al., 2005). La numérosité se définit comme le sens perceptif de la pluralité, lié à la perception immédiate globale, qui permet à l'enfant d'évaluer, dans un choix entre deux quantités, celle qui contient un nombre supérieur d'éléments (Campolini, Timmermans, & Vansteelandt, 2002). De cette hypothèse découle plusieurs idées, mais toutes excluent des difficultés dans d'autres habiletés cognitives (Landerl, Bevan, & Butterworth, 2004). Certains auteurs apportent des nuances à cette grande théorie, en précisant les troubles. Ainsi, ils détaillent un déficit des représentations du nombre (K. Kucian et al., 2011; Wilson et al., 2006), de la précision de ces représentations (Butterworth et al., 2011; Moeller, Neuburger, Kaufmann, Landerl, & Nuerk, 2009) ou de l'association entre les différents codes et les grandeurs numériques (Ansari, 2008; De Smedt & Gilmore, 2011). Piazza et al., (2010) proposent que la dyscalculie soit une faiblesse relevant d'un « daltonisme » de sorte que les personnes atteintes ne distinguent pas certaines différences entre les grandeurs numériques. Ils montrent qu'une faiblesse dans une capacité non analogique a des conséquences sur le système de calcul arithmétique.

5.2 Déficit global

La deuxième hypothèse causale fréquemment retrouvée dans la littérature avance un déficit global des fonctions exécutives (Bull & Scerif, 2001) et de mémoire de travail visuo-spatiale (Ashkenazi, Rubinsten, & Henik, 2009; Espy et al., 2004). En effet, ces capacités sont liées entre elles et ont montré des liens avec le domaine arithmétique. Par exemple, un déficit en mémoire de travail visuo-spatiale est souvent associé à des procédures arithmétiques immatures chez l'individu dyscalculique. Certains auteurs (McLean & Hitch, 1999; Sluis, Leij, & Jong, 2005) ont également montré que les dyscalculiques étaient moins performants que la norme dans les tâches requérant la mémoire d'une information visuo-spatiale dynamique. Les zones sollicitées dans la mise en place des représentations spatiales des nombres nécessitent l'intervention de celles dévolues aux fonctions exécutives et à la mémoire de travail. Les compétences exécutives sont liées, de sorte qu'un déficit gênerait l'acquisition des grandeurs numériques précises. Rotzer et al. (2009) nous montrent que les dyscalculiques présentent un déficit d'inhibition de l'information non pertinente. Morsanyi et al. (2003) ajoutent le fait que la dyscalculie peut être liée à un déficit des habiletés de raisonnement logique. Ces études nous indiquent que des dyscalculiques « purs » n'ayant pas de difficultés dans d'autres domaines, tels que la mémoire de travail, le raisonnement et les fonctions exécutives sont tellement rares qu'ils ne sont qu'exceptions à la règle (la norme étant que les dyscalculiques auraient un déficit global de l'ensemble de ces fonctions cognitives).

II Arithmétique

Tout d'abord, nous allons observer les différentes tâches et les paradigmes utilisés pour l'étude de l'arithmétique élémentaire, puis nous aborderons les stratégies mises en jeu dans la résolution des faits arithmétiques. Ceci nous permettra de développer les modèles théoriques issus de l'observation de ces stratégies. Enfin nous verrons comment le consensus dans le domaine de la résolution des faits arithmétiques a récemment été fragilisé.

1 Tâches et paradigmes utilisés pour l'étude de l'arithmétique élémentaire

1.1 Types de paradigmes : chronométrie et protocoles verbaux :

Il existe trois paradigmes permettant d'étudier la résolution des tâches arithmétiques (Fanget, 2010). On trouve tout d'abord la mesure des temps de réponse, soit sur la durée nécessaire à donner le résultat d'une opération, soit sur la durée nécessaire à déterminer si le résultat présenté est vrai ou faux. Siegler (1987, 1989) critique cette méthode en avançant que les adultes utilisant plusieurs types de stratégies, faire la moyenne des temps de latence conduit à des conclusions erronées. En effet, les données obtenues ne seraient pas représentatives d'une seule stratégie.

On trouve ensuite l'analyse des protocoles verbaux, paradigme préféré par LeFevre, Sadesky et Bisanz (1996) mais critiqué par Kirk et Ascraft (2001). Cette méthode consiste à saisir la nature des opérations cognitives mises en œuvre par la personne quand il résout une opération. Elle se décline sous deux formes : la méthode piagétienne (dite de l'entretien clinique) et la méthode utilisée par Newell et Simon (1972) où le participant décrit à voix haute sa réflexion. L'analyse des protocoles verbaux a été très utilisée dans la littérature, mais il s'avère qu'elle ne procure que les éléments conscients d'une démarche cognitive qui peut être inconsciente. De plus, la description peut également interférer avec la tâche primaire de calcul (Ericsson & Simon, 1980). Par ailleurs, ce paradigme est notamment peu applicable aux tâches de vérification.

1.2 Types de tâches : vérification ou production

Deux types de tâches ont été utilisées dans la littérature afin d'analyser la résolution des faits arithmétiques simples. On trouve des tâches de vérification, où le participant doit affirmer si le calcul présenté est vrai ou faux (e.g., 4 + 5 = 7, vrai ou faux ?). Ainsi que les tâches de production où l'individu doit donner une réponse au fait (e.g., 5 + 6 = ?). Cette distinction à priori sans importance s'avère cruciale quant aux stratégies utilisées, car celles-ci diffèrent par exemple grandement lorsque le calcul présenté est faux, en tâche de vérification. Le participant ne fait alors pas appel à ses connaissances procédurales ou mnésiques comme dans les autres conditions. Il va notamment passer par une étape de jugement de plausibilité du résultat.

Ainsi, il s'avère que malgré la variété des tâches et paradigmes à notre disposition pour étudier les faits arithmétiques simples, tous comportent des biais, notamment quant à l'identification des stratégies utilisées par les personnes testées. Ces biais sont à l'origine des différents modèles ultérieurement exposés, et des résultats parfois incohérents entre les différentes études. Néanmoins, ces outils méthodologiques, certes imparfaits, nous ont permis d'identifier deux grands types de stratégies de résolution, que nous allons maintenant développer.

2 Stratégies de résolution

Les stratégies de résolution des tâches arithmétiques simples ont donné lieu à plusieurs courants théoriques opposés (cf. 3. Modèles théoriques et perspective développementale). Cette divergence vient du fait que ces stratégies ne sont pas directement appréhendables lors des tâches proposées car elles font l'objet d'inférences. Dans la littérature, on distingue deux grands types de stratégies. Les stratégies de récupération (ou déclaratives), faisant appel à la mémoire à long terme et les stratégies de comptage (ou procédurales). Cette dichotomie n'est pas spécifique au domaine de l'arithmétique mais apparait dans l'ensemble du fonctionnement cognitif humain, notamment mnésique (Anderson 1983 ; Anderson et Lebière 1998). Les deux types de stratégies dans l'arithmétique (déclarative et procédurale) sont pour la première fois ébauchées dans l'article de Groen et Parkman en 1972.

2.1 Stratégies de récupération

Les stratégies de récupération ne peuvent pas être utilisées dès le début de l'apprentissage de l'arithmétique, car l'enfant n'a pas encore stocké le résultat en mémoire à long terme et ne peut donc s'y référer. Ces stratégies font relativement consensus - chez l'adulte - dans la recherche s'intéressant à ce domaine d'investigation (Ashcraft, 1992 ; Barrouillet & Fayol, 1998 ; Campbell & Oliphant, 1992 ; Fayol, 2012 ; Lemaire, Barrett, Fayol, & Abdi, 1994 ; Siegler, 1996 ; Widaman et Little, 1992). Les différents effets observés ont donné lieu à des interprétations allant renforcer l'existence de ces stratégies, qui chez l'adulte, seraient privilégiées car moins coûteuses. En effet, l'individu utilisant cette stratégie n'a alors pas à manipuler les opérandes, mais à les relier au résultat stocké. Ashcraft (1982, 1987) et Siegler (1989) affirment ainsi que les adultes n'emploieraient que la récupération car il s'agit de la méthode la plus performante. L'accès est alors décrit comme « automatique » (Jackson et Coney 2005, Lefevre et al. 1988). Parmi les études voulant attester de l'existence des stratégies de récupération, on trouve Ashcraft (1982) et Ashcraft & Fierman (1982) qui établissent que les premières stratégies de comptage, employées lors de l'apprentissage de l'arithmétique, laissent place aux stratégies de récupération à partir du CE2. Seyler, Kirk et Ascraft (2003) montrent dans leur étude une augmentation du temps de réponse et du taux d'erreurs lorsque les opérandes des soustractions augmentent. Les résultats des petites soustractions seraient ainsi récupérés en mémoire, tandis que les résultats des plus grandes (plus petit opérande supérieur ou égal à 11) seraient calculés à l'aide de stratégies de comptage, moins efficaces. Ces résultats sont corrélés aux réponses des protocoles verbaux qu'ils utilisent par la suite. En effet, les participants affirment récupérer le résultat en mémoire dans 97% des petites soustractions, contre 67% des grandes (aucune indication n'est donnée sur la résolution des calculs intermédiaires). De plus, 30% des participants disent n'utiliser que la stratégie de récupération pour les petites soustractions. Néanmoins, dans l'étude de LeFevre, DeStefano, Penner-Wilger et Daley (2006), les participants affirment qu'ils résolvent 81% des petites soustractions par récupération contre 42% des grandes seulement. Egalement, 6% des participants disent n'utiliser qu'exclusivement la récupération pour résoudre des soustractions. Campbell et Xue (2001) obtiennent des résultats proches de cette dernière étude. Les participants affirment alors qu'ils utilisent la récupération afin de résoudre 73% des petites soustractions contre 42% des grandes. Ces incohérences s'expliquent d'une part par l'établissement de la distinction « petits/grands problèmes » et d'autre part par les biais induits par les différentes méthodologies de recueil de résultats (cf. 1. Tâches et paradigmes utilisés pour l'étude de l'arithmétique élémentaire). Néanmoins, l'ensemble de ces études avancent que la récupération est largement privilégiée chez les adultes.

En complément des stratégies de récupération, on trouverait les stratégies de renfort (« backup strategies ») au statut particulier. Elles sont utilisées en cas de difficultés passagères, chez l'adulte, lorsque la récupération n'est plus possible (Fuson, 1982 ; Geary & Burlingham-Dubree, 1989 ; Logan & Klapp, 1991 ; Siegler & Shrager, 1984). Dans ce modèle, elles équivalent à un retour aux stratégies procédurales utilisées au stade de l'apprentissage de l'arithmétique.

2.2 Les stratégies procédurales

Les stratégies de procédures sont inévitablement utilisées lors de l'apprentissage de l'arithmétique (Baroody 1987 ; Carpenter et Moser, 1983 ; Fuson 1982). Groen et Parkman (1972) les décrivent pour la première fois, en les opposant aux procédures de récupération. Ils distinguent parmi elles les stratégies de comptage (résoudre 5 + 4 en comptant 6, 7, 8, 9), la référence à l'opération inverse (6 – 2 = ? qui devient 2 + ? = 6) ou la transformation (4 + 5 = 4 + 4 + 1). Dans le cas de l'addition, chez les enfants, on remarque que le temps de réponse augmente proportionnellement à l'augmentation de l'opérande le plus petit (Groen et Parkman 1972). Cela correspond à la « min strategy » où la personne additionne le plus petit opérande au second utilisé comme base. Cette stratégie de comptage est décrite par Carr et Jessup (1995), Siegler (1987), Siegler et Crowley (1994). D'autres méthodes sont employées dans ces stratégies de comptage. Baroody et Ginsburg (1986) font la liste de celles répertoriées chez des enfants de 4 à 5 ans : le dénombrement concret de tous les éléments, compter en commençant par le premier opérande donné, compter à partir du premier opérande, tout compter en commençant par le plus grand opérande, compter à partir du plus grand des opérandes. Cette dernière stratégie correspond à la « min strategy » précédemment décrite. Chez l'adulte, certains auteurs défendent l'idée d'une automatisation de ces stratégies (Baroody 1984 et 1987). En effet, celles-ci s'effectueraient alors de manière inconsciente et peu coûteuse à l'âge adulte, et seraient alors privilégiées. La récupération ne serait qu'un leurre, car l'accès au résultat serait à ce point facilité que le « calculateur » a l'impression de le retrouver en mémoire. La théorie de cette automatisation est soutenue par l'effet d'amorçage trouvé dans Fayol et Thevenot (2012), ainsi que l'effet du côté d'apparition du second opérande (Mathieu, Gourjon, Couderc, Thevenot, & Prado, 2016).

2.3 Dissociations entre opérations

Dans notre protocole, nous nous sommes uniquement intéressées aux additions et aux soustractions, que nous allons donc développer ici. Ce choix s'explique par le fait que les différentes opérations n'impliquent pas les mêmes stratégies de résolution. Nous avons donc écarté les multiplications et les divisions dont l'apprentissage apparait plus tard dans le développement et qui ont des résolutions spécifiques à leur nature. Par exemple, les multiplications semblent être résolues par récupération dès le début de l'apprentissage, étant donné que nous apprenons par cœur les tables et que c'est ce processus qui nous permet de restituer les résultats.

2.3.1 Les additions

Les auteurs s'accordent sur le fait que dans le cas de l'addition, la première phase stratégique en matière de résolution est nécessairement le comptage. En effet, les enfants apprennent à additionner deux quantités grâce à des stratégies de procédures apprises ou intuitives. Plusieurs stratégies de procédures ont été précédemment citées (cf. 2.2. Stratégies procédurales), issues de Baroody et Ginsburg (1986). L'enfant en cours d'apprentissage utilise donc la stratégie qu'il maitrise le mieux, ou la stratégie la plus efficace, afin de résoudre des petites additions.

Ensuite, deux théories s'opposent suivant les modèles suivis. D'une part, on trouve la théorie en faveur de la récupération du résultat, une fois que l'individu est « expert ». En effet, au cours du développement, les additions, notamment les petites, deviennent familières. Nombre d'auteurs, (parmi eux Ashcraft (1992), Ashcraft et Guillaume (2009), Barouillet et Fayol (1998), Campbell et Oliphant (1992), Geary (1994) et Widaman et Little (1992)) suggèrent que les individus sont tellement exposés aux faits arithmétiques qu'ils font l'objet d'un apprentissage. Cet apprentissage relie les opérandes au résultat correspondant comme expliqué dans le modèle de récupération. Ainsi, au bout d'un certain temps de pratique, l'individu est capable de résoudre l'addition en récupérant le résultat stocké dans sa mémoire à long terme. Cette théorie est appuyée par certains faits empiriques comme l'effet de taille du problème (cf. 4.2. De quelle nature seraient les procédures automatisées ?). Cette stratégie a longtemps fait consensus, tout comme le modèle qui y est lié, car la récupération parait moins coûteuse cognitivement pour les personnes, que la procédure qui serait peu à peu abandonnée.

D'autre part, on trouve la théorie voulant que les adultes continuent à utiliser les procédures afin de résoudre les petites additions, qui sous-tend le modèle procédural (cf. 3. Modèles théoriques et perspective développementale). Cette théorie est défendue par Baroody (1984), Carr & Jessup (1995), Mathieu et al. (2016) et Seigler & Crowler (1994) mais n'a jamais été réellement entendue. Selon ces auteurs, une fois l'apprentissage des principes de résolution des additions, les individus continuent à utiliser les stratégies de procédures, et notamment la « min-strategy » décrite par Baroody & Ginsburg (1986). Néanmoins, ces stratégies ne sont plus coûteuses, ni conscientes ; elles sont alors automatisées et permettent la résolution des petites opérations de façon efficace.

2.3.2 Les soustractions

Concernant les soustractions, la dichotomie reste globalement la même. Néanmoins, beaucoup plus d'auteurs sont en faveur des stratégies procédurales. On trouve parmi eux Dehaene & Cohen (1997), Cohen & Dehaene (2000), Thevenot & Barouillet (2006) et Mathieu et al. (2016). Les soustractions seraient, d'après ces auteurs, résolues par des procédures de comptage, peu importe la valeur des opérandes. Aux prémices de l'apprentissage des soustractions ces procédures sont lentes et coûteuses, puis elles deviennent par la suite efficaces et automatisées. L'individu pourrait ainsi résoudre rapidement et facilement les petites soustractions, de manière automatique.

D'autres auteurs sont en faveur d'une résolution des soustractions par récupération, mais de manière plus limitée que pour les additions. Après la phase d'apprentissage (où la stratégie procédurale est inévitablement privilégiée), l'individu utiliserait les soustractions jusqu'à une certaine taille des opérandes. La limite se situerait approximativement à un résultat supérieur ou égal à 11. En-dessous de cette limite, les stratégies de récupération seraient employées ; au-dessus on aurait recours aux stratégies procédurales. Cette limite et cette théorie se retrouvent dans les études de Seyler et al. (2003) et Campbell & Xue (2001). Néanmoins, les études testant cette limite entre les deux stratégies afin de résoudre les soustractions, proposent des résultats hétérogènes, ce qui est principalement dû aux différences méthodologiques.

Grâce à l'observation de ces différentes stratégies, les chercheurs ont proposé des modèles théoriques visant à expliquer l'acquisition et le développement de l'arithmétique élémentaire.

3 Modèles théoriques et perspective développementale

La littérature s'est depuis longtemps penchée sur la question de la résolution des tâches arithmétiques simples. Nous allons ici décrire brièvement les modèles théoriques qui ont émergé de cette réflexion

3.1 Modèle prédominant : le modèle de récupération

Ce modèle est celui qui fait consensus actuellement dans l'ensemble de la littérature traitant de la résolution des tâches arithmétiques. Il suggère que les enfants utilisent dans un premier temps des stratégies de comptage, afin de résoudre les faits arithmétiques (Geary & Brown, 1991; Geary, Hoard, Byrd-Craven, & DeSoto, 2004; Wu et al., 2008). Ces premières résolutions, qui nécessitent un coût cognitif important ainsi qu'un temps de résolution conséquent, constituent également les conditions *sine qua non* d'une acquisition de ces faits. L'enfant, au moyen de supports tels que les doigts, les bouliers ou la ligne numérique, parvient à résoudre ses premiers faits arithmétiques, et construit par là même une solide structure en mémoire à long terme.

En effet, au cours du développement, l'individu délaisserait peu à peu les procédures de comptage, au profit de stratégies de récupération en mémoire à long terme (Ashcraft, 1983; Ashcraft & Battaglia, 1978; Ashcraft & Fierman, 1982; Ashcraft, 1992; Siegler & Shrager, 1984; Stazyk, Ashcraft, & Hamann, 1982; Svenson & Broquist, 1975). Il stockerait peu à peu les résultats rencontrés afin de pouvoir utiliser cette stratégie déclarative, moins coûteuse et plus efficace. Ainsi, durant cette deuxième partie du développement, l'individu résout les faits arithmétiques au moyen d'une table ou d'un réseau stocké en mémoire à long terme, qui relient les opérandes à un résultat. Il est stipulé que le temps nécessaire afin de résoudre l'opération dépend de la longueur du chemin à parcourir afin de rencontrer ces opérandes, ce qui rejoint l'effet de taille du problème (Ashcraft et Guillaume 2009). Récemment, Cho, Ryali, Geary, & Menon (2011) ont tenté de corroborer ce modèle à des résultats de neuro-imagerie. Il s'avère, dans leur étude que selon la stratégie, les zones activées ne varient pas, mais on constaterait néanmoins des micros différences en termes de degré d'activation.

Parmi les modèles de récupération, on trouve deux types distincts de structures. La première structure proposée est celle d'une table interne (Ashcraft & Battaglia, 1978; Geary, Widaman, Little, & Cormier, 1987). Les faits arithmétiques y sont stockés à la manière d'un tableau à double entrée, reliant les deux opérandes (ligne ou colonne) au résultat (à l'intersection). On récupèrerait ainsi le résultat grâce à l'activation diffusante, décrite par Anderson (1983). Cette première proposition de structure a été peu à peu délaissée car le stockage ne semblait pas nécessiter une si grande organisation. Ainsi, les modèles en réseaux associatifs se sont peu à peu développés. Dans cette deuxième hypothèse de structure, l'organisation est dite « en réseau », c'est-à-dire que les deux opérandes sont reliés à différents résultats par des nœuds. Le résultat correct voit son lien se renforcer au fur et à mesure des expositions au fait. Ce modèle considère les confusions associatives présentées par Stazyk et al. (1982), Winkelman et Schmidt (1974), Zbrodoff et Logan (1986), également appelées interférences par J. I. Campbell (1987 a et b) et Campbell & Graham (1985).

Pourtant, ces modèles présentent une limite considérable. Ils ne sont pas dynamiques et ne tiennent pas compte du développement en proposant une modélisation qui ne peut s'appliquer que chez l'adulte.

3.2 Un modèle alternatif peu considéré : le modèle procédural

Le modèle procédural a été beaucoup moins soutenu dans la littérature. Il a été envisagé pour la première fois lors de l'étude de Groen et Parkman (1972), qui l'ont écarté au profit du modèle déclaratif qui leur semblait plus probant. A l'inverse des modèles de récupération, le modèle procédural propose l'existence d'un compteur mental interne. Ainsi, les enfants apprendraient à résoudre les faits arithmétiques via des procédures, et ils conserveraient cette stratégie de résolution par la suite. L'existence du compteur mental permettrait notamment l'automatisation des procédures, qui à force d'expérience, deviendraient plus rapides et moins coûteuses. Cette automatisation permet d'aborder la perspective développementale de ces modèles.

Le principal défenseur de ce modèle est Baroody, qui décrit sa plausibilité dans nombre d'écrits (Baroody, 1983, 1984, 1994) et notamment via une correspondance avec Aschraft. S'il était peu suivi pendant de nombreuses années, de nouvelles études semblent soutenir cette théorie. Parmi eux, nous trouvons Fayol et Thevenot (2012), qui mettent en exergue le fait que montrer le signe quelques millisecondes avant les opérandes permet une résolution plus rapide du fait, chez des calculateurs experts. Ce résultat irait dans le sens que la présentation du signe active « quelque chose » qui serait de l'ordre de la procédure. Lépine, Roussel, & Fayol (2003) envisagent l'automatisation de ces procédures, montrant qu'elles sont toujours employées chez l'adulte pour les additions (contrairement aux multiplications qui seraient toujours résolues par récupération), au moyen d'un effet d'amorçage également. Enfin, Mathieu et al. (2016), montrent que chez les adultes, la place du deuxième opérande (à gauche ou à droite) joue un rôle dans le temps de réponse, en fonction du type d'opérations. Cet effet montrerait que les additions et soustractions seraient résolues par procédures, car elles feraient appel à des conceptions spatiales de représentations des nombres et des faits arithmétiques.

3.3 Modèles mixtes

Ce dernier type de modèles part principalement des modèles de récupération, en y ajoutant quelques nuances. On trouve tout d'abord le modèle de distribution des associations de Siegler (R. Siegler & Jenkins, 2014; R. S. Siegler, 1988; R. S. Siegler & Shrager, 1984). Ce modèle présente un réseau associatif tenant compte de la fréquence de rencontres des faits. Il ajoute également que le choix de la stratégie de résolution est variable (procédure ou récupération). Néanmoins, il ne précise pas les facteurs jouant dans ce choix, notamment les éléments permettant la sélection d'une procédure en particulier. Il n'est pas non plus développé comment les procédures deviennent tout aussi efficaces que la récupération à un moment donné.

Le dernier modèle théorique envisagé dans la littérature est le modèle de l'adaptation des choix stratégiques (Adaptative strategy choice model, ASCM) décrit par Siegler & Shipley (1995). Ce modèle complète le précédent en y ajoutant les facteurs à l'origine du choix et de la résolution procédurale. La résolution par procédures permettrait en effet de stocker le résultat en mémoire à long terme, mais également des informations telles que la vitesse et la précision de la stratégie procédurale choisie. Ainsi, face à un nouveau problème arithmétique, l'individu se sert de ces données sur les performances passées afin de déterminer quelle stratégie utiliser.

4 Un consensus récemment fragilisé

4.1 Des résultats récents en faveur de procédures de calcul automatisées chez l'adulte ?

4.1.1 Effet de taille

L'effet de taille du problème, aussi appelé « effet de difficulté du problème » montre une hausse du temps de réponse et une hausse du nombre d'erreurs avec l'augmentation de la taille de l'opérande. Cet effet est significatif dans de nombreuses études, mais il est particulièrement étudié dans Ashcraft & Battaglia (1978), Ashcraft & Guillaume (2009), Barouillet & Thevenot (2013), Parkman (1972), Siegler (1988a et b) et enfin Zbrodoff (1995). Dans la littérature, il est interprété de deux façons. D'une part, il a longtemps été considéré en faveur du modèle de récupération : les enfants faisant les procédures mettent un temps de résolution proportionnel à la complexité du problème. Les adultes ayant recours à la récupération mettrait également plus de temps à résoudre les grands problèmes car ceux-ci sont moins stables dans leur mémoire à long terme, ou plus longs à être retrouvés. D'autre part, il a récemment été considéré comme soulignant les stratégies procédurales, car cet effet est présent chez l'adulte et chez l'enfant (celui-ci utilisant inévitablement des stratégies procédurales). La différence est que chez l'enfant, les temps de réaction sont conséquents, mais chez l'adulte ils sont nettement moindres. L'effet reste significatif dans les deux cas, ce qui signifierait que l'adulte a également recours aux stratégies procédurales, mais que celles-ci sont automatisées (Barouillet et Thevenot, 2005). Il met donc aussi plus de temps pour répondre lorsque les nombres sont élevés, mais ce laps de temps est amoindri.

4.1.2 Effet d'amorçage

L'effet d'amorçage, ou « priming effet » est significatif dans Campbell (1987a, 1987b, 1991) et Fayol et Thevenot (2012). Lorsqu'un calcul est présenté en partie, il est alors résolu plus rapidement. De la même manière que pour l'effet de taille du problème, ce deuxième effet est interprété de façon différente selon les articles. Certains articles interprètent cet effet comme étant une conséquence de l'utilisation de la stratégie de récupération avec un réseau associatif. En effet, certaines parties du réseau pré-activées par l'amorçage nous permettraient de retrouver plus rapidement le résultat stocké en mémoire à long terme (Ashcraft & Guillaume 2009). Récemment, Fayol et Thevenot (2012) avance que montrer une partie de l'opération, comme le signe, permet au cerveau d'activer « quelque chose » permettant de résoudre plus facilement le calcul. On peut ainsi interpréter l'effet d'amorçage comme étant une conséquence de l'utilisation de stratégies procédurales

4.2 De quelle nature seraient les procédures automatisées ?

4.2.1 Nombres et espace : ligne numérique mentale

On trouve de nombreux liens entre les nombres et l'espace dans la littérature. D'un point de vue cérébral, il est avéré que le traitement des nombres active la région intrapariétale, et avec elle, des régions voisines. Parmi ces régions, on trouve celles qui sont les supports de la représentation de l'espace, l'attention, et les mouvements oculaires (Dehaene, 2010). Ces données ne sont qu'un versant de la proximité entre les nombres et l'espace. Nous allons donc développer les liens, entre ces deux domaines, auxquels s'intéresse notre mémoire.

a Effet SNARC :

L'effet Spatial-Numerical Association of Response codes (SNARC) est une interaction entre la taille du nombre et la localisation de la réponse par rapport à la ligne numérique mentale (Dehaene, Bossini, & Giraux, 1993). On trouve cet effet notamment dans les tâches de parité, les participants répondent plus vite de la main gauche pour les petits nombres et plus vite de la main droite pour les grands nombres. Cet effet relie donc directement les nombres et l'espace, même s'il n'utiliserait pas directement la ligne numérique mentale (Santens & Gevers, 2008).

Depuis sa découverte, l'effet SNARC a suscité beaucoup de questions et d'études. Berch, Foley, Hill, & Ryan (1999) ont mis en évidence son moment d'apparition dans le développement qui se situerait vers le CE2 ; leurs résultats indiquent également qu'il serait accentué par la suite. En 2008, Van Galen et Reitsma se sont également intéressés au développement de l'effet SNARC. A partir de tâches de jugement de grandeurs et de détection, ils trouvent respectivement un effet SNARC présent à partir de 7 ans dans la première tâche, à partir de 9 ans dans la seconde. Ils concluent ainsi que les enfants, à 7 ans, se représentent les grandeurs numériques de la même manière que les adultes, en faisant une association spatiale de leur magnitude. A 9 ans, les enfants seraient capables d'avoir un accès direct et automatique aux informations de grandeur lorsqu'ils perçoivent un nombre arabe.

D'autres auteurs se sont posé la question du caractère inné de cet effet. En effet, on peut se demander si cette progression de gauche à droite est acquise culturellement ou innée, et notamment le rôle du sens de lecture par rapport à cet effet. Shaki, Fischer, & Petrusic, (2009) ont ainsi proposé une tâche à des personnes ayant différents sens de lecture. L'effet est significatif lorsque le sens de lecture des mots et des nombres est le même (pour les Canadiens qui lisent chiffres et mots de gauche à droite). En revanche, l'effet est significatif et inversé si ce sens est de la droite vers la gauche (pour les Palestiniens qui lisent chiffres et mots de droite à gauche). Il n'est cependant pas significatif chez les Israéliens qui lisent les mots de gauche à droite et les nombres de droite à gauche. Cette étude révèle donc que le sens de la lecture influe très fortement sur l'effet SNARC, même si le lien entre les nombres et l'espace y reste établi. Afin d'avérer ou non son caractère inné de la gauche vers la droite ou de la droite vers la gauche, Rugani, Vallortigara, Priftis, & Regolin (2015) ont donc choisi de tester cet effet chez les poussins. Dans environ 70% des essais, les poussins suivent l'ordre croissant de gauche à droite, ce qui impliquerait que cet effet est inné et sans doute commun à nombre d'espèces. Le fait qu'il apparaisse inversé chez les Palestiniens de l'étude de Shaki et al. (2009) serait donc le fruit d'un apprentissage, alors qu'il est dans son sens inné chez les Canadiens. Cet effet reste néanmoins une preuve du lien entre les nombres et l'espace.

b Attention visuo-spatiale

On retrouve une autre influence mêlant nombres et espace. Celle-ci est découverte par Fischer, Castel, Dodd, & Pratt (2003), via l'attention visuo-spatiale. Dans leur article, montrent l'existence de biais attentionnels lors de la perception de nombres. Les petits nombres impliquent un déplacement attentionnel vers l'hémi-espace gauche, tandis que les grands nombres suscitent un déplacement attentionnel vers l'hémi-espace droit. La ligne numérique mentale est alors activée dès lors que l'on perçoit un nombre. Son rôle et son exactitude ne peuvent ainsi que jouer un rôle prépondérant dans les compétences arithmétiques.

c Importance de la ligne numérique

La ligne numérique mentale est la capacité de se représenter les nombres selon une graduation croissante, allant de la gauche vers la droite (Dehaene, 2010). Cette représentation est souvent matérialisée, et manipulée de façon explicite durant le cursus scolaire des enfants français. Ce travail autour de la ligne numérique permet d'affiner les représentations des nombres, notamment en terme de magnitude (Kucian et al., 2011). Ainsi, cet entrainement est d'autant plus efficace chez les dyscalculiques qui ont des représentations initialement déficitaires. Cette ligne numérique mentale et son organisation linéaire sont corrélées positivement aux capacités arithmétiques et à la précision des représentations mentales des nombres. A l'inverse, une représentation logarithmique conduit à de faibles compétences en arithmétique chez les enfants (Booth & Siegler, 2006). Ces corrélations attestent du fait que le traitement des nombres et l'organisation spatiale sont deux domaines intriqués. Au niveau du développement, il apparait ainsi comme « inné » d'avoir une représentation logarithmique, qui est ensuite rendue linéaire jusqu'à des quantités usuellement rencontrées (Booth & Siegler, 2006; R. S. Siegler & Booth, 2004; R. S. Siegler & Opfer, 2003). Arithmétique et attention

4.2.2 Arithmétique et attention

a Operational Momentum : biais spatiaux ?

Une étude de McCrink & Wynn, (2009) montre l'existence de l'effet « operational momentum » qui serait également une illustration de l'existence de cette ligne numérique mentale. En effet, lors d'une tâche d'additions et de soustractions de quantités analogiques estimées, les participants surestiment les résultats des additions et sous-estiment les résultats des soustractions. Ce résultat nous montre que les additions et les soustractions provoquent des déplacements le long de la ligne numérique mentale.

b Shifts attentionnels pendant le calcul

L'attention est une fonction exécutive qui nous permet notamment la sélection de stimuli environnementaux pertinents. Face à un stimulus visuel, par exemple, elle donne lieu quotidiennement à des processus inconscients et automatiques. On retrouve ceci lorsque l'on présente une flèche dans une direction, qui provoque de façon involontaire et obligatoire un biais attentionnel vers la direction indiquée. De la même manière, Ranzini, Dehaene, Piazza, & Hubbard (2009) ainsi que Fisher et al. (2003), ont présenté des nombres à des participants. Si ces nombres étaient petits, ils suscitaient un biais attentionnel vers la gauche, tandis que s'ils étaient grands, ils provoquaient un biais attentionnel vers la droite. Mathieu et al. (2016) ont montré que le signe arithmétique suscite également des biais attentionnels chez l'adulte, lors de tâches de résolution de faits arithmétiques simples. Après la présentation d'un premier opérande, et d'un signe arithmétique, les participants sont plus lents à répondre si le deuxième opérande d'une addition apparait à gauche, et si le deuxième opérande d'une soustraction apparait à droite. Ceci semble indiquer que le signe « + » crée un déplacement attentionnel vers la droite car le participant se déplace vers la droite dans sa ligne numérique mentale. De la même manière, le « - » suscite un déplacement attentionnel vers la gauche. Ces déplacements gênent ou facilitent la résolution des faits arithmétiques dans la tâche présentée. Ces expérimentations montrent ainsi un lien entre l'attention visuo-spatiale et arithmétique.

Chapitre II

PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES

I Problématique

La dyscalculie est une pathologie affectant les capacités en arithmétique. Parmi elles, nous trouvons la résolution des petits faits qui semble altérée tant dans la vitesse que dans la précision. Si ce constat est évident d'un point de vue clinique, quelle pourrait être l'origine cognitive de ces difficultés comportementales ?

La recherche a jusqu'ici montré que la capacité cognitive à résoudre des opérations simples (additions et soustractions à un opérande) est sous-tendue par des processus mentaux spécifiques à ce type de tâche. L'un de ces processus identifié repose sur un déplacement attentionnel très rapide le long d'une ligne mentale numérique. En effet, une ligne numérique mentale semble à la fois supporter nos représentations des nombres (de gauche à droite dans un ordre croissant), mais également sous-tendre attentionnellement les faits arithmétiques, l'attention se déplaçant automatiquement vers la gauche lorsque nous résolvons une soustraction, et à l'inverse vers la droite lorsque nous résolvons une addition (Mathieu et al., 2016).

Récemment, les données chez l'adulte tout-venant ont montré la présence d'un biais attentionnel dans une tâche de résolution de petits calculs (McCrink, K., & Wynn, K. (2009)). Au regard de ces résultats, des interrogations développementales émergent alors : il serait possible que l'apprentissage de l'arithmétique élémentaire repose sur une automatisation de ces déplacements attentionnels. Si tel est le cas, comme le laissent penser les dernières données, qu'en est-il dans la dyscalculie ? Cette suite de questionnements nous amène à nous demander dans cette étude si un déficit d'automatisation des procédures arithmétiques spatiales participe au tableau de la dyscalculie.

Pour tenter d'apporter des éléments de réponse à cette hypothèse, nous utiliserons une tâche expérimentale similaire à celle utilisée dans le protocole de Mathieu et al., 2016 : une présentation séquentielle de faits arithmétiques simples (additions et soustractions à un opérande) sur ordinateur, que les participants devront résoudre oralement. Des épreuves préalables seront proposées à chaque participant pour établir un profil du fonctionnement cognitif de chacun. Ces dernières serviront également de références pour l'appariement des groupes. Le protocole prévoit donc de comparer deux groupes de participants âgés de 8 à 14 ans: un groupe contrôle constitué d'enfants tout-venant et un groupe expérimental constitué d'enfants dyscalculiques.

II Hypothèses

1 Hypothèse générale

Nous faisons l'hypothèse que les procédures arithmétiques reposant sur des déplacements rapides le long d'une ligne mentale numérique ne s'automatisent pas chez des enfants dyscalculiques, au contraire des enfants tout venants.

2 Hypothèses opérationnelles

Sur la base de l'hypothèse générale, nous émettons les hypothèses opérationnelles suivantes :

2.1 Hypothèse n°1

Un effet de la position du deuxième opérande par rapport au signe arithmétique (droite ou gauche) sur le temps de réaction lors de la résolution d'additions ou soustractions simples devrait émerger chez les enfants tout venants avec l'âge (contrôles) : pour les enfants les plus âgés, le temps de résolution des additions lorsque le deuxième opérande est à droite devrait être meilleur que pour les additions dont le second opérande est à gauche. A l'inverse, également pour les enfants les plus âgés le temps de résolution des soustractions lorsque le second opérande est à gauche sera meilleur que pour les soustractions dont le deuxième opérande est à droite.

2.2 Hypothèse n°2

La position du deuxième opérande par rapport au signe arithmétique (droite ou gauche) ne devrait jamais impacter significativement le temps de réaction lors de la résolution d'additions ou soustractions simples chez les enfants dyscalculiques (même les plus âgés) : le temps de résolution des additions et des soustractions, que le second opérande soit à droite ou à gauche, sera sensiblement le même.

Chapitre III

PARTIE EXPERIMENTATION

I Participants

1 Critères d'éligibilité de la population

1.1 Critères d'inclusion

Pour constituer l'échantillon de notre étude, les participants devaient observer un critère âge et un critère langue. Les enfants inclus dans l'étude devaient être âgés entre 8 ans (entrée dans l'apprentissage des faits arithmétiques d'un point de vue purement opératoire) et 14 ans (acquisition supposée du niveau expert/adulte pour les petits calculs) et leur langue maternelle devait être le français, le bilinguisme étant toléré.

1.2 Critères de non inclusion

Plusieurs critères de non inclusion étaient appliqués pendant le recrutement : une dysphasie pour éviter toute difficulté d'évocation et/ou de compréhension, un trouble de l'attention avec ou sans hyperactivité (médicamenté ou non) pour les besoins de concentration soutenue durant la passation, un trouble visuel non corrigé (port de lunettes ou lentilles toléré) et/ou un trouble neuro visuel, pour pallier toute gêne face à la fixation de l'écran d'ordinateur ainsi que la perception des chiffres présentés, un trouble neurologique autre qu'un trouble cognitif neurodéveloppemental.

2 Constitution des groupes

2.1 Groupe contrôle

Les participants du groupe contrôle ont été recrutés à l'aide d'une banque de données de familles volontaires pour la participation à des études de recherche au Laboratoire du Langage, Cerveau et Cognition (L2C2 - CNRS Université Lyon 1 UMR5304 - Institut des Sciences Cognitives). Chaque famille sollicitée pour cette étude a reçu une plaquette d'information concernant ce protocole, leur exposant les objectifs et les modalités de notre projet (cf. Annexe IV.1). Les passations du groupe contrôle se sont déroulées au laboratoire L2C2 et chaque participant a reçu un cadeau (jeux) pour le remercier de sa participation. La famille recevait également une indemnisation pour les frais de déplacement.

2.2 Groupe expérimental

Les participants du groupe expérimental ont été recrutés essentiellement par l'intermédiaire d'orthophonistes libérales intervenant auprès d'enfants pour une « rééducation des troubles du calcul et du raisonnement logico-mathématiques » (nomenclature générale des actes professionnels en orthophonie). Pour rappel, le terme « raisonnement logico-mathématique » désigne la même réalité clinique que l'appellation « dyscalculie » ; c'est pourquoi ce critère de nomenclature correspond aux critères d'inclusion de notre recherche. Chaque professionnel contacté a reçu une lettre d'explication du projet de cette recherche (cf. Annexe V) pour prendre connaissance des objectifs et des modalités. Les orthophonistes intéressées ont établi une liste des patients volontaires pour participer à l'étude. Ces derniers ont reçu, tout comme les enfants du groupe contrôle, une plaquette d'informations vulgarisées (cf. Annexe IV.2). Chaque famille proposait alors sa participation volontaire à l'orthophoniste qui nous en faisait part.

Pour la majorité de ces enfants, les passations ont eu lieu au sein même du cabinet d'orthophonie. Pour d'autres, l'expérimentation s'est déroulée au domicile des familles ou au laboratoire L2C2. Chacun des enfants a reçu un cadeau de remerciement pour sa participation et les familles s'étant déplacées au laboratoire ont reçu une indemnisation des frais de déplacement.

Pour chaque participant, une convention était dûment signée par les parents ou le tuteur légal du participant mineur, les expérimentateurs et le département d'orthophonie de l'Institut des Sciences et Techniques de la Réadaptation (Claude Bernard LYON 1). Par ailleurs, un consentement parental établi par le laboratoire L2C2 ainsi qu'un formulaire d'assentiment à signer par le participant mineur, étaient soumis à signature en amont de la passation (cf. Annexe VI).

3 Caractéristiques de l'échantillon

Cinquante-six participants ont été testés dans ce protocole. Chacun est réparti dans le groupe contrôle ou dans le groupe expérimental en fonction de son recrutement. La répartition de chacun des participants en fonction de leur âge montre une distribution imparfaite bien que correcte entre groupe dyscalculique et groupe contrôle (cf. Figure 1).

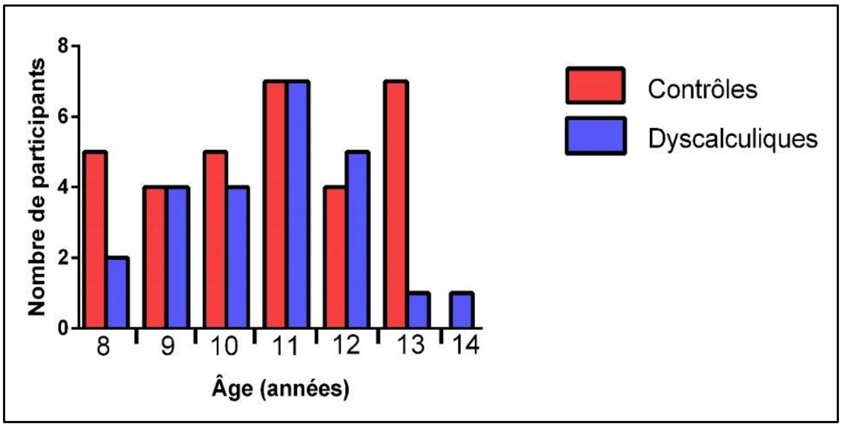


Figure 1 : Représentation graphique de la répartition de la totalité des participants testés selon leur âge et leur groupe

Dans chacun des deux groupes (contrôle et dyscalculique), des classes d'âge ont donc été déterminées de façon arbitraire au vue de la répartition imparfaite par année (cf. Figure 1). En effet, les groupes d'enfants de 9 ans, 10 ans, 11 ans et 12 ans présentent un appariement acceptable entre groupe dyscalculique et groupe contrôle. Cependant, des écarts importants sont nettement objectivés pour les groupes d'enfants de 8 ans (2 enfants dyscalculiques contre 5 contrôles) et 13 ans (1 enfant dyscalculique contre 7 contrôles). De plus, sur l'ensemble des participants (soit 56 enfants), un seul (groupe dyscalculique) avait 14 ans révolus (14,9 ans). Ce dernier ne pouvait donc être représentatif de sa classe d'âge et de son groupe et ne pourrait évidemment pas être comparé avec des enfants de 14 ans du groupe contrôle.

Ainsi, la nouvelle répartition en classes d'âge permet de regrouper les participants, dans le but de tendre au maximum vers un appariement en âge ce qui sera également nécessaire pour l'analyse des résultats intergroupes. En effet, celle-ci pourra être effectuée d'un groupe à l'autre mais aussi d'une classe d'âge à une autre au sein d'un même groupe. La figure 2 permet d'observer une répartition relativement plus équilibrée des participants.

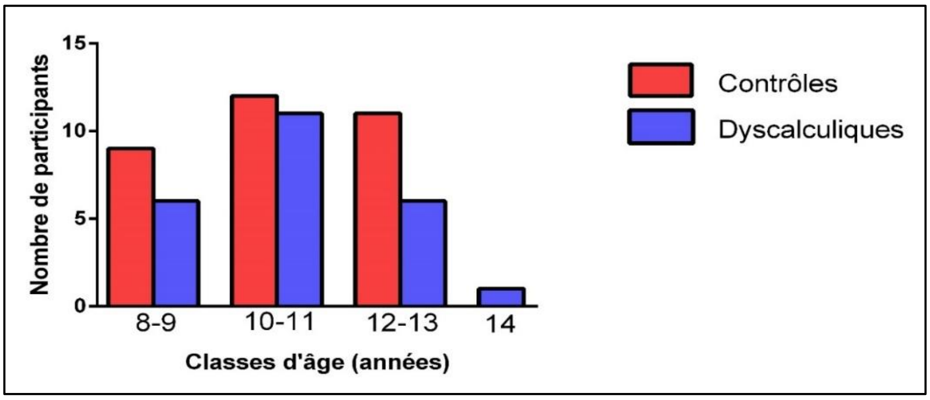


Figure 2 : Représentation graphique de la répartition en classes d'âge de la totalité des participants testés selon leur âge et leur groupe

La nouvelle répartition en classe d'âge (cf. Figure 2) montre graphiquement des écarts relativement moins importants que précédemment : 6 enfants dyscalculiques contre 9 contrôles pour les 8-9 ans ; 11 dyscalculiques contre 12 contrôles pour les 10-11 ans ; 6 dyscalculiques contre 11 contrôles, et enfin le participant de 14 ans.

Les histogrammes de répartition présentés précédemment (cf. Figure 1 et 2), permettent une vision globale de la population testée initialement. Toutefois, il convient de préciser ici la population effective sur laquelle les analyses statistiques ont été réalisées. En effet, sur le total de 56 participants, 3 ont été écartés pour différentes raisons :

- ✓ Le participant 13 (groupe dyscalculique) : il était le seul de la population à dépasser les 13 ans avec un âge de 14,9 ans. Sa tranche d'âge ne pouvait donc être représentative.

- ✓ Le participant 22 (groupe dyscalculique) : le taux de bonnes réponses de ce participant était trop faible pour pouvoir entrer dans les analyses et apporter une représentativité de sa classe d'âge.
- ✓ Le participant 36 (groupe contrôle) : des données manquantes concernant plusieurs épreuves préalables ne nous ont pas permis de comptabiliser ce participant, pour respecter une uniformité des données du groupe.

Par conséquent, la figure 3 présentée ci-dessous nous permet finalement d'avoir un aperçu de la répartition en classes d'âge de la population définitive prise en compte dans nos analyses, se séparant ainsi des trois participants cités précédemment.

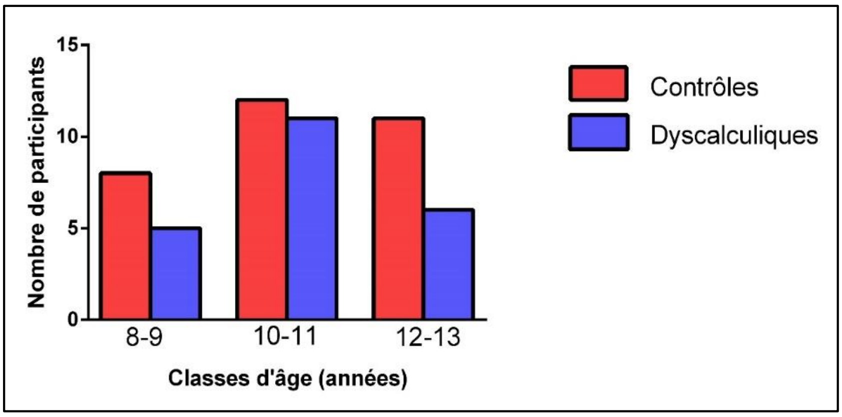


Figure 3 : Représentation graphique de la répartition en classes d'âge de la population effective testée, selon les âges et le groupe des participants

Désormais, et pour la suite de ce travail de recherche, la population analysée sera composée des effectifs présentés en figure 3 : 5 dyscalculiques contre 8 contrôles pour les 8-9 ans ; 11 dyscalculiques contre 12 contrôles pour les 10-11 ans et 6 dyscalculiques contre 11 contrôles pour le groupe 12-13 ans.

Pour terminer de présenter et qualifier la population de cette étude, le tableau 1 présenté ci-après permet d'appréhender notamment un bon appariement en âge moyen pour chaque groupe (contrôle et dyscalculique). Nous pouvons ainsi constater que ces derniers sont bien appariés en âge, bien que cet appariement soit moins pertinent entre les classes d'âge des deux groupes.

Tableau 1 : Récapitulatif des caractéristiques de la population (N = 53)

	Groupe contrôle N = 31	**Groupe expérimental N = 22**
Âge moyen	11,22 ans (134,64 mois)	11,08 ans (132,96 mois)
Sexe		
- *Féminin*	n = 22	n = 15
- *Masculin*	n = 9	n = 7

II Matériel

1 Profil cognitif et appariement des groupes : les mesures préalables

Le protocole de passation prévoit plusieurs épreuves destinées à dresser un profil global des capacités cognitives de chaque participant. Il convient dans ce protocole, d'utiliser des tests standardisés, au préalable, pour contrôler les critères de définition officielle de la dyscalculie : une efficience cognitive dans la norme et des capacités en arithmétiques inférieures à celles attendues en fonction de l'âge (American Psychiatric Association's, 2013).

1.1 Efficience cognitive

Malgré quelques divergences de contenu quant à la définition de la dyscalculie, l'ensemble des référentiels de classification des troubles/pathologies (DSM-V, CIM-10…) s'accorde sur l'intégrité de l'efficience cognitive (ou quotient intellectuel) dans la dyscalculie.

Afin d'objectiver le niveau d'efficience cognitive de chaque participant, nous avons proposé les épreuves obligatoires du test de la Nouvelle Echelle Métrique de l'Intelligence 2 ou NEMI-2 (G. Cognet, 2006) : connaissances, comparaisons, vocabulaire, matrices analogiques. Pour obtenir des éléments complémentaires d'analyse, nous avons également proposé deux épreuves complémentaires de cette même batterie : répétition de chiffres et représentations visuo-spatiales. Celles-ci nous permettaient d'objectiver les capacités normales en mémoire à court terme, mémoire de travail et compétences visuo-spatiales.

1.1.1 Fondements théoriques de la NEMI-2

La NEMI-2 est un test d'évaluation du développement intellectuel, caractérisé par sa facilité et sa rapidité d'administration. C'est un test étalonné sur une population d'enfants de 4 ans 3 mois à 12 ans 8 mois.

Il s'agit d'une révision de la NEMI (Zazzo, 1966), elle-même issue de l'Echelle Métrique de l'Intelligence du Binet-Simon (1911). Bien que la NEMI-2 ait pour but de faire évoluer les fondements théoriques de l'évaluation de l'intelligence, elle n'en est pas moins bâtit en conservant les apports de Binet (1911) et Zazzo (1966). Elle conserve notamment son approche globale des « processus mentaux supérieurs » (Binet, 1909), aujourd'hui appelés « fonctions exécutives supérieures ». Elle garde de la NEMI l'expression des résultats standards en Indice d'Efficience Cognitive (IEC). Bien que la NEMI-2 rejette l'organisation en échelle d'âge de la NEMI (âge comme continuum), elle conserve toutefois la référence à un âge de développement (AD) par épreuve. De plus, un certain nombre d'items du Binet-Simon et de la NEMI sont conservés dans la NEMI-2 de par leurs qualités métrologiques.

1.1.2 *Epreuves utilisées de la NEMI-2*

La batterie est composée de sept épreuves : quatre obligatoires qui permettent le calcul de l'Indice d'Efficience Cognitive (IEC), et trois facultatives qui permettent d'approfondir qualitativement le profil si nécessaire.

Dans ce protocole, deux épreuves facultatives sont proposées en plus des épreuves obligatoires : la répétition de chiffres et les représentations visuo-spatiales.

La partie obligatoire compte trois épreuves verbales qui font appel à l'intelligence cristallisée (organisation des connaissances, structuration des savoirs) :

- ✓ Connaissances : l'enfant doit répondre à des questions sur les connaissances concrètes du monde (Connais-tu le nom de deux poètes ? Cite moi le nom de deux insectes, pourquoi Pasteur est-il connu…).
- ✓ Comparaisons : l'enfant doit trouver la caractéristique ou la qualité commune entre deux ou trois mots (couteau-fourchette-assiette / cabane-château / oreille-oeil…).
- ✓ Vocabulaire : épreuve de définition de mots (trottoir, calendrier, roman…).

Une épreuve non verbale reflétant l'intelligence fluide (permet la résolution de problèmes nouveaux sans solutions apprises) complète la partie obligatoire du test NEMI-2:

- ✓ Matrices analogiques : trente matrices abstraites sont présentées par ordre de difficulté et l'enfant doit choisir le symbole manquant pour compléter de façon logique la matrice.

Deux épreuves facultatives ont été utilisées :

- ✓ Répétition de chiffres : l'enfant doit répéter une série de chiffres entendue oralement, à l'endroit (empan de chiffres endroit, mémoire à court terme) puis à l'envers (empan de chiffres envers, mémoire de travail).
- ✓ Représentations visuo-spatiales : selon son âge (≤ 9 ans ou > à 9 ans), le test propose à l'enfant, respectivement, soit une tâche de copie de dix figures géométriques (analyse des rapports topologiques entre les parties, des symétries et des orientations) soit une épreuve de comptage de cubes (l'enfant doit prendre en compte les cubes non visibles de la figure).

Pour chaque épreuve, le résultat (ou note brute) du participant est converti en une note standard (de 1 à 7). Toutes les notes standard des épreuves obligatoires du participant (4 notes standard) sont ensuite additionnées et cette nouvelle note est convertie en Indice d'Efficience Cognitive (IEC). L'IEC est donc défini comme une note standard normalisée (moyenne= 100 ; écart-type = 15) et est exprimé sous la forme d'un intervalle de confiance. Un niveau qualitatif est également attribué en fonction de l'IEC : inférieur, faible, moyen faible, moyen, moyen fort, fort, supérieur. Un rang percentile est également associé.

1.2 Habiletés mathématiques

Afin d'avoir un aperçu du niveau d'habiletés mathématiques de chaque participant, deux épreuves du test Zareki-R (Von Aster, 2006. Traduction française par G. Dellatolas) sont proposées. Il s'agit d'une batterie pour l'évaluation des différentes capacités nécessaires au traitement des nombres et du calcul chez l'enfant scolarisé en primaire (du CP au CM2). Cette batterie est un outil intéressant en cela qu'il est bâti sur des recherches neuropsychologiques récentes. Ces dernières objectivent un processus multifactoriel dans la capacité à utiliser des nombres chez les enfants, mais également pour la résolution des calculs élémentaires. Ainsi, le ZAREKI-R propose 12 épreuves mathématiques (la note totale du ZAREKI-R ne prend en compte que 11 épreuves): dénombrement de points, comptage oral à rebours, dictée de nombres, calcul mental oral, lecture de nombres, positionnement de nombres sur une échelle verticale, répétition de chiffres, comparaison de deux nombres présentés oralement, estimation visuelle de quantités, estimation qualitative de quantités en contexte, problèmes arithmétiques présentés oralement et comparaison de deux nombres écrits.

Dans ce protocole, seules deux épreuves de ce test sont choisies pour évaluer des notions élémentaires très précises qui forment un socle pour l'apprentissage du calcul : la compréhension des nombres et l'estimation d'une quantité. En d'autres termes, ces épreuves testent la précision des représentations mentales des nombres de l'enfant testé : compétence qui concerne particulièrement le sujet de cette étude.

1.2.1 Compréhension du nombre

L'épreuve de positionnement de nombres sur une échelle verticale permet de tester la compréhension du nombre. De manière plus générale, cette tâche permet d'évaluer la capacité à associer un nombre à sa quantité.

L'épreuve est divisée en quatre parties :

- ✓ Présentation orale : lignes marquées et lignes vierges
- ✓ Présentation écrite : lignes marquées et lignes vierges

Une échelle verticale allant de 0 à 100 (du bas vers le haut) est présentée au participant. Pour les lignes marquées, sur chaque échelle sont dessinés quatre tirets correspondant respectivement à un nombre précis entre 0 et 100. En modalité oral, l'examinateur demande au participant de montrer le tiret correspondant au nombre qu'il entend. En modalité écrite, le participant doit lire le nombre inscrit au bas de chaque échelle et montrer le tiret correspondant. Pour les lignes vierges, des échelles verticales allant de 0 à 100 sont présentées au participant, sans aucun tiret. En modalité oral, le participant doit dessiner lui-même le tiret correspondant au nombre qu'il entend. En modalité écrite, le participant doit lire le nombre inscrit au bas de l'échelle et dessiner lui-même le tiret correspondant.

1.2.2 Estimation visuelle des quantités

Dans cette tâche, le participant doit observer durant un temps limité (2 secondes ou 5 secondes), des collections d'objets dessinés sur une planche : les deux premières planches représentent deux collections de points noirs en nombre relativement petits (9 et 14). Une collection de balles est ensuite présentée, puis une collection de verres, (plusieurs dizaines chacun). Pour finir, de mémoire, l'enfant doit comparer le nombre de balles et le nombre de verres (A ton avis, il y avait plus de balles ou plus de verres ?). A chaque fois, les quantités sont telles que le participant ne peut pas compter précisément tous les items dans le temps imparti ni faire appel à la compétence du subitizing. Ce terme de « subitizing » est décrit comme le processus responsable des réponses rapides pour les petites numérosités (Kaufman, Lord, Reese & Volkmann, 1949). De cette définition, Kaufman et al. (1949) qualifie le subitizing de processus perceptif rapide et sûr d'appréhension immédiate de la numérosité sans avoir recours au comptage. Enfin, nous pouvons préciser que ce processus fait partit du système numérique précis ou SNP (il permet la perception rapide et le traitement précis des petites quantités).

L'estimation d'une quantité d'objets avec contrainte de temps qui ne permet pas le comptage un à un, comme c'est le cas ici, est une capacité qui renvoie su système numérique approximatif (SNA). Ce dernier ne nécessite pas d'apprentissage explicite, d'instruction spécifique (comme à l'école) ; le SNA (ou processus permettant la perception approximative des grandes quantités) est donc inné. C'est une capacité qui peut être spontanée même par des participants qui n'ont pas appris à compter (Deloche et al., 1999).

1.3 Les compétences arithmétiques

Les compétences arithmétiques de chaque participant ont également été évaluées grâce à la batterie de tests Woodcock-Johnson III (Woodcock, McGrew, Schrank, Mather, 2007).

1.3.1 La batterie du Woodcock-Johnson III

The Woodcock-Johnson III Normative Update (WJ III NU) correspond à la dernière version de la batterie du Woodcock-Johnson. Il s'agit d'une batterie de tests étalonnés et normés sur plus de 8700 participants de tous âges (de 2 à 90 ans). La batterie a pour volonté la mesure de l'efficience intellectuelle, des capacités cognitives spécifiques, du langage oral et des apprentissages scolaires et théoriques. Elle se compose de 31 épreuves cognitives et 22 épreuves pour le langage oral et les apprentissages.

Ce test se penche principalement sur les symboles arithmétiques (signes arithmétiques et chiffres arabes). Il vise à mesurer quantitativement l'efficience de la manipulation de ces symboles arithmétiques chez le participant. Ainsi, les résultats de ces épreuves permettent la justification objective de l'attribution du groupe contrôle ou expérimental pour chaque participant. Deux épreuves de cette batterie ont été retenues.

1.3.2 Test 5 : « Calculation »

Cette épreuve de calcul fait appel à l'accès et l'application des apprentissages et connaissances en calcul mathématiques.

Le participant a en sa possession une feuille recto-verso contenant 45 opérations numérotées de 1 à 25. La consigne proposée oralement au participant est la suivante : « *Tu* *dois répondre à autant de problème que tu peux. Tu commences au numéro 1 et tu continues dans l'ordre. Si tu n'arrives pas à résoudre un problème, tu le passes et tu fais le problème suivant. Quand tu es bloqué tu arrêtes* ». Les opérations sont proposées dans un ordre croissant de difficulté : additions et soustractions à un chiffre, additions, soustractions, multiplications et divisions de nombres, fractions, nombres décimaux, équations à une inconnue, pourcentage, équations à plusieurs inconnues, racines carrées, logarithmes, systèmes, trigonométrie et enfin des intégrales. Le participant n'a pas de contrainte de temps dans cette épreuve car l'objectif est d'avoir un aperçu relativement global du niveau d'acquisition des compétences arithmétiques scolaires.

1.3.3 Test 6 : « Math Fluency »

L'épreuve Math Fluency évalue la rapidité et la précision dans la résolution de calcul à un chiffre. Il s'agit de l'épreuve la plus couramment utilisée dans la recherche en cognition arithémtique car elle est particulièrement sensible aux difficultés et donc la détection d'un éventuel trouble du calcul. Ainsi, elle permet un argument objectif pour la répartition de chacun des participants dans le groupe contrôle ou dans le groupe expérimental.

Le Math Fluency est composé de 160 calculs à un chiffre (0 à 9) : additions et soustractions seulement pour la première moitié, puis ajout de multiplication pour la suite. La consigne proposée oralement au participant est la suivante : « *Il faut que tu résolves quelques problèmes arithmétiques simples. Tu commences au début de la ligne puis tu continues dans l'ordre. Si tu n'y arrives pas, tu peux passer l'opération et faire la suivante mais tu ne pourras pas revenir dessus. Il faut que tu essayes de travailler le plus vite possible en essayant de ne pas faire d'erreurs : il faut que tu résolves le plus d'opérations possible en 3min. Tu fais attention de bien regarder les signes* ».

Dans ce test, la contrainte de temps impose au participant d'aller le plus vite possible, donc par définition, il ne peut pas « réfléchir » au calcul. Il s'agit, par cette épreuve, d'avoir un aperçu du niveau des stratégies de calcul mises en œuvre par le participant.

2 Tâche expérimentale

Afin de tester les hypothèses de cette recherche, une tâche expérimentale sur informatique a été mise au point à l'aide du logiciel DMDX (Forster & Forster, 2003). Cette dernière consistait en une résolution de calculs arithmétiques présentés sur écran d'ordinateur.

2.1 Contexte d'installation

Le participant est installé face à un écran d'ordinateur de 15 pouces, assis le plus confortablement possible pour ne pas être gêné durant le temps de la tâche. Pour contrôler la distance écran-œil ainsi que l'orientation du regard, le participant était maintenu à une distance fixe (44 centimètres) de l'écran, à l'aide d'une mentonnière. L'enregistrement des réponses orales est réalisé grâce à l'utilisation d'un casque audio équipé d'un microphone, placé sur la tête de chaque participant. Au début de chaque expérience, le seuil de détection vocale du microphone était calibré à la voix du participant afin de régler la qualité sonore de la réponse enregistrée.

Aucun objet non nécessaire à l'expérience n'était laissé sur la table, pour anticiper une éventuelle dispersion de l'attention par manipulation d'objet durant la tâche.

2.2 Elaboration des stimuli arithmétiques

Les stimuli arithmétiques présentés dans cette tâche ont été construits en gardant les caractéristiques de la tâche expérimentale élaborée dans l'étude de Mathieu et al. (2016). Seules des opérations de nombres à un chiffre (ou opérande) sont nécessaires pour cette étude. Les opérations d'un même chiffre (exemple : 3+3). En effet, les opérations dont les opérandes sont les mêmes (ou « tie-problem ») ont un statut particulier qui a été révélé notamment par Campbell et Xue (2001). Les auteurs ont montré que ces problèmes particuliers sont résolus plus rapidement et plus précisément par rapport aux problèmes d'opérandes différents. De part cette caractéristique, ces problèmes sont donc retirés du protocole pour éviter un biais dans l'analyse des temps de résolution des calculs. Les opérations comportant un zéro sont également exclues du protocole. En effet, la littérature scientifique s'accorde à dire que les petits calculs (addition et soustraction à un opérande) comportant un zéro relèvent de règles de calcul particulière (Fayol et Thevenot, 2012).

Dans toutes les opérations présentées, le plus grand opérande est systématiquement présenté en première position pour éviter les résultats négatifs lors des soustractions. Ce principe a été conservé avec les additions pour que le participant ne puisse prédire le type d'opération à venir.

Ainsi, vingt paires d'opérandes ont donc été utilisées dans la tâche, chaque paire étant utilisée une fois pour les additions et une fois pour les soustractions (cf. Tableau 2). Ces paires sont classées en trois catégories de problèmes : les problèmes de petite taille sont construits avec des opérandes compris entre 1 et 4. Les problèmes intermédiaires comprennent au moins un opérande entre 5 et 7. Les grands problèmes possèdent au minimum un 8 ou un 9.

Tableau 2 : Tableau d'élaboration des couples d'opérandes utilisés en addition et en soustraction, en fonction du type de problème

Type d'opérande / *Type de problème*	1 à 4	5 à 7	8 à 9
Petite taille	(2;1) (3;1) (3;2) (4;1) (4;2) (4;3)		
Intermédiaire		(5;1) (5;2) (5;3) (5;4) (6;5) (7;5) (7;6)	
Grande taille			(8;5) (8;6) (8;7) (9;5) (9;6) (9;7) (9;8)

Bien que trois tailles de problèmes soient présentes dans ce protocole expérimental, seuls les problèmes de petites tailles (correctement résolus) seront concernés par l'analyse statistique. En effet, les problèmes concernant les paires d'opérandes de 1 à 4 (cf. Tableau 2) sont résolus plus rapidement et plus correctement que les problèmes intermédiaires et que les grands problèmes. Cet élément est issu de l'étude de Couderc et al. (*soumis*) qui n'a pas révélé d'effet significatif sur les petits problèmes. LeFevre, Sadesky et Bisanz (1996) ont tenté d'expliquer dans leur étude cet effet de la taille du problème sur des tâches de calculs. Ils ont finalement suggéré que les adultes répondent plus rapidement aux problèmes comportant des petits opérandes plutôt que ceux composés de grands opérandes. En effet, les résultats montraient que chez les adultes, l'effet de taille sur les additions simples serait essentiellement dû à la sélection des procédures (ou stratégies) utilisées pour les problèmes intermédiaires et les grands problèmes (soit une somme supérieure à 10). Comme nous l'évoquions dans la partie théorique à propos de l'article précédemment cité (LeFevre et al., 1996), les auteurs ont également suggéré que cet effet soit également induit par la fréquence de présentation de ces petits problèmes et à leur manipulation courante et quotidienne. Il serait alors pertinent de retrouver cet effet de taille chez les enfants puisqu'ils manipulent ces petits chiffres à très haute fréquence, notamment grâce à l'école, et que leurs stratégies de calculs sont en cours d'apprentissage.

Ainsi, chaque paire d'opérandes déterminée par ce protocole expérimental est utilisée deux fois : une fois en addition et une fois en soustraction. Chaque problème est ensuite utilisé deux fois, pour varier le côté d'apparition du deuxième opérande (droite versus gauche). La figure 4, reprends les étapes d'élaboration des problèmes présentés aux participants.

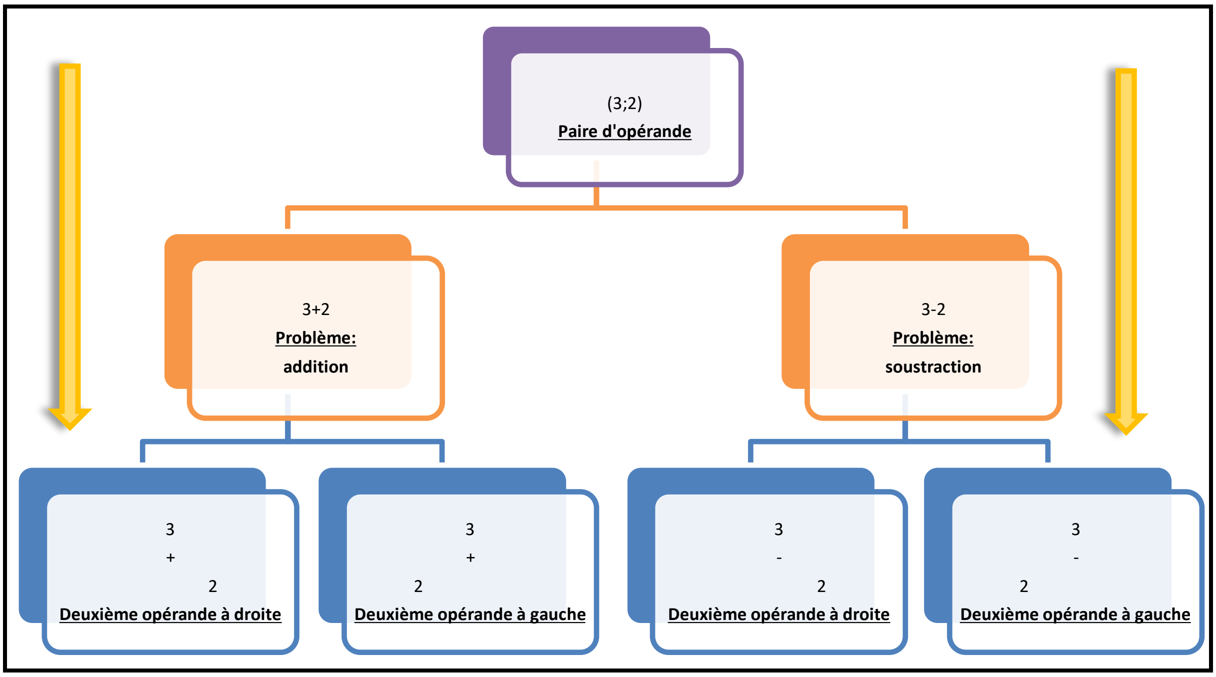


Figure 4 : schéma d'exemple de l'élaboration d'un problème

Chaque participant avait donc 80 problèmes à résoudre : 20 paires d'opérandes x deux types d'opération (addition et soustraction) x 2 côtés de présentation du second opérande (droite et gauche).

La liste de 80 problèmes présentée au participant est pseudo-randomisée : les additions et les soustractions apparaissent de façon aléatoire et non prévisible, un maximum de trois problèmes du même type (addition ou soustraction) peuvent être présentés successivement. De cette façon, trois scénarios différents ont été générés, chacun comportant une liste aléatoire, pour maintenir une variabilité des listes présentées à l'ensemble des participants. L'exemple d'un scénario est présenté en annexe VII. Chaque scénario (ou liste de 80 problèmes) est séparé en deux blocs (ou « run ») de 40 opérations chacun, ce qui permet au participant de marquer une pause dans cette tâche relativement coûteuse attentionnellement.

Il est systématiquement proposé au participant de commencer par un entrainement (voire deux si besoin) pour qu'il se familiarise avec la tâche (présentation, rapidité, matériel…).

L'entrainement est constitué de dix opérations du même type que celles de la liste de 80 problèmes : additions et soustractions, petits ou grands problèmes.

2.3 La tâche

La figure 5 présente la tâche expérimentale proposée à chaque participant. Chaque problème arithmétique est présenté de manière séquentielle sur l'écran d'ordinateur. Le premier opérande ainsi que le signe arithmétique sont présentés individuellement au centre de l'écran. Le second opérande est flashé sur le côté gauche ou le côté droit de l'écran.

Un point de fixation apparait au centre de l'écran durant 500ms. Il est ensuite remplacé par le premier opérande qui s'affiche au centre de l'écran pendant 500ms. Le point de fixation apparait à nouveau au centre de l'écran pour 500ms et est remplacé par le signe arithmétique flashé 150ms au centre de l'écran. Une dernière période de fixation de 300ms est proposée et laisse place au deuxième opérande qui s'affiche durant 150ms. Ce deuxième opérande est décalé par rapport au point central de fixation (-5°/+5°) sur la partie gauche pour la moitié des problèmes et sur la partie droite de l'écran pour l'autre moitié des problèmes.

Le participant a alors un maximum de sept secondes pour calculer mentalement (le comptage digital est autorisé) et donner la réponse de l'opération à haute voix, à travers le microphone. Après sept secondes, le logiciel passe automatiquement au problème suivant.

Le temps de réponse, qui sera analysé, correspond au délai entre la présentation du deuxième opérande et l'amorce vocale de la réponse du participant.

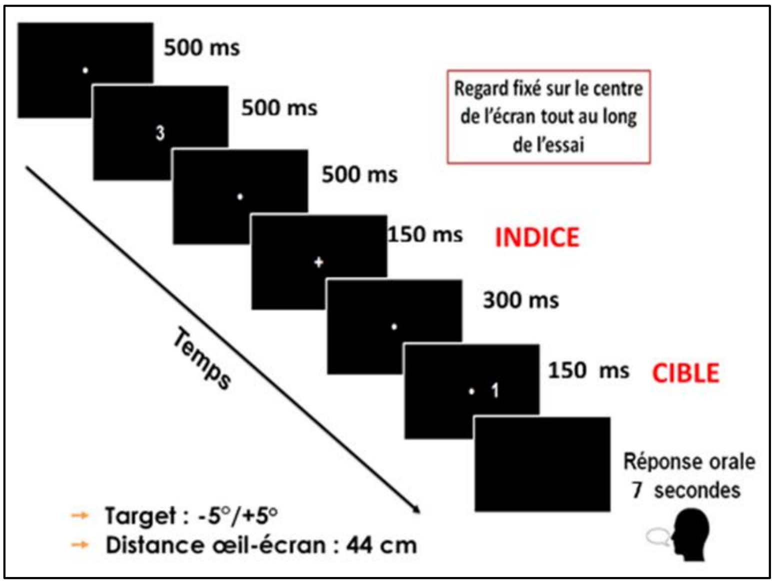


Figure 5 : Schéma de présentation de la tâche expérimentale

III Procédure

Les passations se sont déroulées de Mai 2015 à Novembre 2016. Le recrutement a démarré par la recherche de participant répondant aux critères du groupe expérimental (enfants dyscalculiques). A partir d'Octobre 2015, le recrutement s'est poursuivi avec la recherche de volontaires pour constituer le groupe contrôle.

Chaque passation était individuelle (un examinateur pour un participant). L'environnement de l'expérimentation était contrôlé au maximum pour permettre un contexte propice à l'expression des capacités de chacun des participant : calme, pas voire peu de passage, luminosité adéquate de la pièce, installation confortable du participant, pas de nuisance sonore…

Un entretien se déroulait en 1h30 : une heure pour les mesures préalables et vingt à trente minutes pour la tâche expérimentale.

Pour contrebalancer un éventuel effet de fatigue qui pourrait impacter les résultats de la tâche expérimentale en fin de protocole ou les résultats de la NEMI-2 ou du Woodcock-Johnson III (mauvaise estimation de l'efficience intellectuelle ou des capacités arithmétiques), la moitié des participants commençait par les mesures préalables et finissait pas la tâche expérimentale, l'autre moitié des participants commençait par la tâche expérimentale et finissait par les mesures préalables.

Au moment de procéder à la tâche expérimentale, le participant se voit expliquer l'ensemble de la tâche. Le protocole prévoit de lui expliquer qu'il doit résoudre des calculs simples, uniquement des additions et des soustractions. Les chiffres et le signes seront en blanc et disparaitront au fur et à mesure, il devra retenir l'opération pour donner le résultat à haute voix ensuite. Il devra répondre en faisant le moins d'erreurs possible. Le participant est également prévenu de la rapidité de présentation de chaque composante du calcul : il sera donc possible qu'un calcul lui échappe. Dans ce cas, il devra rester concentrer et attendre le calcul suivant.

Il lui est également demandé de garder au maximum le regard fixé au centre de l'écran, dans le but d'éviter les saccades oculaires à gauche ou à droite de l'écran.

Pour apporter un point final concernant la compréhension générale du protocole, il convient ici de préciser quelques notions concernant les analyses statistiques. Le protocole de la présente étude ne prévoit pas de notes limites aux mesures préalables en dehors desquelles un participant serait exclu du protocole. Cependant, plusieurs critères seront observés pour l'analyse des résultats :

Chaque mauvaise réponse sera exclue de l'analyse pour que les observations puissent être interprétables. En effet, il ne s'agit pas dans ce travail d'étudier les mauvaises réponses mais de comprendre des procédures de résolution mises en œuvre dans un calcul juste. Ainsi, l'analyse statistique sera menée uniquement sur les temps de réponse des calculs correctement résolus.

Nous pouvons rappeler ici les considérations que nous apportions précédemment quant aux problèmes de grande taille et de taille intermédiaire. L'analyse statistique ne tiendra pas compte des résultats à ces calculs, en regard des résultats de l'étude de LeFevre et al. (1996).

De plus, pour chaque participant, une moyenne de ses temps de réponse (pour les opérations correctes) sera établie. Les calculs pour lesquels le temps de réponse est supérieur ou inférieur à 2 écarts-types de sa moyenne seront également exclus de l'analyse.

Chapitre IV

PRESENTATION DES RESULTATS

I Introduction

Nous avons choisi d'organiser la présentation de ces résultats en trois parties successives. La première partie présente les données de chaque groupe quant aux tests préalables. La seconde partie rend compte des résultats intra-groupes dans la tâche expérimentale. La troisième partie aborde l'analyse des résultats intergroupes.

Les analyses statistiques ont été réalisées sur des données nettoyées grâce au logiciel Mathlab. Cette étape nous a permis de rejeter, pour chaque participant, les temps de réponses situés à – 2 écarts-types ou + 2 écarts-types de la moyenne des temps de réponses du participant. Nous avons utilisé les données nettoyées afin d'effectuer les différents tests statistiques à l'aide du logiciel Statistica 10. Les résultats significatifs sont signalés dans les tableaux et les graphiques par le symbole « * ». De plus, nous avons utilisé des abréviations afin de faciliter la lecture de cette partie. La moyenne est représentée par « m » et l'écart-type par un « ET ».

II Résultats obtenus aux tests préalables

Cette première partie est consacrée à l'analyse (statistiques descriptives) des résultats de chacun des groupes aux tests préalables : Woodcock Johnson III tests 5 et 6 (WJ 5 et WJ 6), NEMI-2 et ZAREKI-R (estimation et échelles).

Dans les tableaux suivants, l'acronyme « NS » renvoie à l'étalonnage en note standard, dont l'équivalent en Indice d'Efficience Cognitive est référencé en annexe (cf. Annexe VIII).

L'étude de ces tests nous permet, dans un premier temps, de décrire les performances de chacun des groupes de manière indépendante. Dans un second temps, nous nous servirons de ces résultats pour voir dans quelle mesure les deux groupes sont appariés dans cette étude notamment grâce au tableau 5 présenté ultérieurement.

1 Groupe contrôles

Au sein du groupe contrôle nous avons effectué des statistiques descriptives, afin d'appréhender la norme et la dispersion du groupe dans chacune des épreuves. Ces résultats sont référencés dans le tableau présenté ci-dessous (cf. Tableau 3) :

Tableau 3 : Présentation des résultats moyens aux épreuves préalables pour le groupe contrôle

	Woodcock Johnson III		ZAREKI-R		NEMI-2	Age
	WJ 5	WJ 6	Estimation	Echelles	NS	
Moyennes	19,81	59,45	4,55	10,44	18,52	11,22
Ecart-types	5,26	20,14	0,62	0,91	3,87	1,78

Dans ce dernier tableau, les moyennes sont calculées à partir des notes brutes obtenues par chaque participant. En effet, le Woodcock-Johnson III étant en cours d'étalonnage sur la population française, nous avons gardé exclusivement les notes brutes, notre population n'étant pas représentative de celle de l'étalonnage du test. Ainsi, nous évitons un éventuel biais d'étalonnage entre deux nationalités.

Concernant le ZAREKI-R, chaque donnée du tableau 3 est également calculée sur la base des notes brutes obtenues par chaque participant. Néanmoins, nous avons également calculé les Z-scores (ou les valeurs centrées réduites) afin de situer le participant par rapport au niveau « pathologique » estimé par le test. Le Z-score de chaque participant est calculé sur la base de l'opération suivante : ($\frac{Note\ du\ participant - moyenne}{écart-type}$). En faisant la moyenne des 31 Z-scores de ce groupe, nous avons un aperçu de la situation du groupe par rapport au niveau « pathologique », d'où l'intérêt de présenter ces données en complémentarité du tableau 3. Pour l'épreuve d'estimation le groupe contrôle obtient une moyenne des Z-scores à 0,65 (ET = 0,66). A l'épreuve des échelles, le groupe obtient une moyenne des Z-scores à 0,92 (ET = 0,45). Ces dernières données permettent de tenir compte de l'âge de chaque participant (de pondérer les résultats de tous les participants).

2 Groupe dyscalculiques

De la même façon que pour le groupe contrôle, nous avons effectué des statistiques descriptives, afin d'appréhender la norme et la dispersion du groupe dans chacune des épreuves. Ces résultats sont référencés dans le tableau suivant (cf. Tableau 4) :

Tableau 4 : Présentation des résultats moyens aux épreuves préalables (groupe dyscalculique)

	WJ5	WJ6	Estimation	Echelles	NS	Age
Moyennes	14,86	40,91	3,73	9,26	12,50	11,08
Ecart-types	3,88	12,39	1,28	1,37	3,84	1,27

De la même façon que pour le groupe contrôle, nous précisons les moyennes et écart-types des deux épreuves du Zareki-R calculés sur la base des Z-scores de chaque participant. A l'épreuve d'estimation, le groupe obtient une moyenne à -0,18 (ET = 1,27) et une moyenne de 0,26 (ET = 0,72) pour l'épreuve d'estimation

3 Intergroupes

Nous avons voulu comparer les performances des deux groupes et ainsi attester de leur éventuelle différence significative. Pour ce faire, nous avons dans un premier temps regroupé les participants de chaque groupe en classes d'âge arbitraires (cf. partie Méthode) et nous avons réalisé des statistiques descriptives (moyennes et écart-type). Ces résultats apparaissent dans les trois premières colonnes du tableau suivant (cf. Tableau 5). Ensuite, nous avons effectué des tests de Student (dernière colonne du tableau) afin de comparer les normes et dispersions de chaque groupe. Les risques acceptés dans les calculs (« p ») sont indiqués de manière unilatérale, car il est anticipé que le groupe dyscalculique a de moins bons résultats que le groupe contrôle.

Tableau 5 : Récapitulatif des statistiques descriptives (moyennes et écart-types) et des tests de significativité (test de Student), entre les deux groupes

	Ages	Contrôles	Dyscalculiques	Tests de Student entre les 2 groupes
WJ5	8-9 ans	m = 15,50 ; ET = 3,59	m = 12,20 ; ET = 2,59	**t = 1,78 ; p = 0,05***
	10-11 ans	m = 19,78 ; ET = 4,76	m = 13,22 ; ET = 2,33	**t = 3,71 ; p < 0,01***
	12-13 ans	m = 23,09 ; ET = 5,13	m = 19,00 ; ET = 2,76	**t = 1,80 ; p = 0,045***
WJ6	8-9 ans	m = 44,25 ; ET = 15,65	m = 36,20 ; ET = 7,46	t = 1,06 ; p = 0,155
	10-11 ans	m = 58,33 ; ET = 16,32	m = 37,33 ; ET = 10,99	**t = 3,20 ; p < 0,01***
	12-13 ans	m = 69,82 ; ET = 19,85	m = 53,17 ; ET = 11,41	**t = 1,88 ; p = 0,04***
Estimation	8-9 ans	m = 1,12 ; ET = 0,40	m = -0,28 ; ET = 1,01	**t = 3,57 ; p < 0,01***
	10-11 ans	m = 0,46 ; ET = 0,72	m = -0,20 ; Et = 1,38	t = 1,27 ; p = 0,11
	12-13 ans	m = 0,47 ; ET = 0,68	m = -0,15 ; ET = 1,58	t = 1,13 ; p = 0,135
Echelles	8-9 ans	m = 0,87 ; ET = 0,61	m = 0,15 ; ET = 0,85	**t = 2,51 ; p = 0,015***
	10-11 ans	m = 0,86 ; ET = 0,47	m = 0,35 ; ET = 0,56	**t = 2,08 ; p = 0,025***
	12-13 ans	m = 0,93 ; ET = 0,38	m = 0,57 ; ET = 0,87	t = 1,20 ; p = 0,125
NS	8-9 ans	m = 18,25 ; ET = 3,15	m = 12,20 ; ET = 3,70	**t = 3,16 ; p < 0,01***
	10-11 ans	m = 18,33 ; ET = 5,43	m = 11,22 ; ET = 3,11	**t = 3,41 ; p < 0,01***
	12-13 ans	m = 19,00 ; ET = 3,55	m = 12,67 ; ET = 4,23	**t = 3,29 ; p < 0,01***

III Résultats intragroupes dans la tâche expérimentale

1 Groupe contrôle

1.1 Performance globale

La performance moyenne des participants contrôles était de 96,7% de réponses correctes (ET = 6,09%). Un premier test de Student a été effectué pour comparer le taux de bonnes réponses selon le type d'opération (addition vs. soustraction). Le test ne révèle pas d'effet significatif du type d'opération (t = 1,14 et p = 0 ,26 bilatéral). En moyenne, les participants du groupe contrôle répondaient correctement aux additions dans 96,10% des cas (ET = 6,53%) et aux soustractions dans 97,31% des cas (ET = 5,60%) comme le présente la figure 6 ci-après.

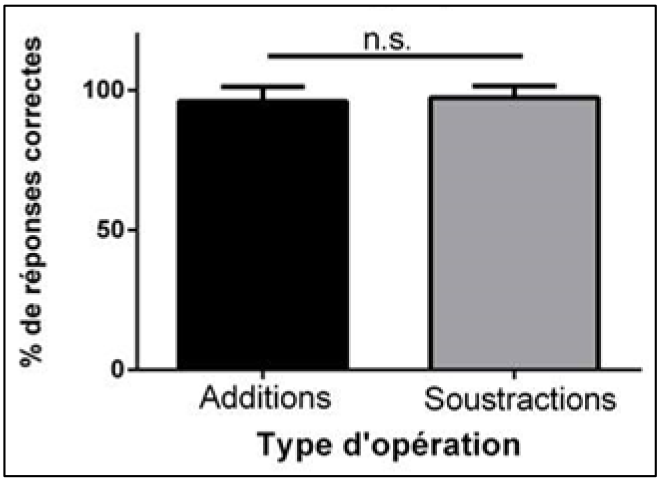


Figure 6 : Performance du groupe contrôle (en % de réponses correctes) en fonction du type d'opération (addition ou soustraction)

Un second test de Student a été effectué afin de comparer les temps de réponses selon le type d’opération (addition vs. soustraction). Les résultats sont présentés graphiquement sur la figure 7.

Le test révèle un effet significatif du type de l’opération (t = 3,22 et **p<0,01***, bilatéral). En moyenne, les additions (m = 1383ms et ET= 508ms) étaient résolues plus rapidement que les soustractions (m = 1496ms et ET = 553ms).

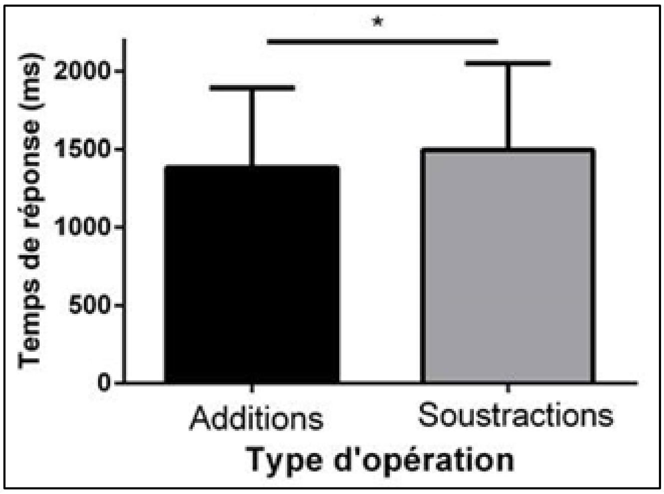


Figure 7 : Moyennes des temps de réponse (en ms) du groupe contrôle, en fonction du type d'opération (addition ou soustraction)

1.2 Analyse du biais de réponse

Dans cette partie, le biais de réponse est défini comme la différence de temps de réaction lorsque le second opérande est présenté à gauche et lorsque le second opérande est présenté à droite (temps de réaction à gauche – temps de réaction à droite). Ainsi, un biais de réponse positif correspond donc à une facilitation de détection quand le deuxième opérande apparaît à droite du signe arithmétique. A l'inverse, un biais de réponse négatif correspond à une facilitation de détection quand le deuxième opérande apparaît à gauche du signe arithmétique.

Afin d'appréhender le rôle de la position du second opérande dans le temps de résolution du fait arithmétique, nous avons réalisé différents tests de Student sur le biais de réponse au sein du groupe contrôle, en fonction des groupes d'âges et des types d'opérations. Les résultats sont présentés sur la figure 8.

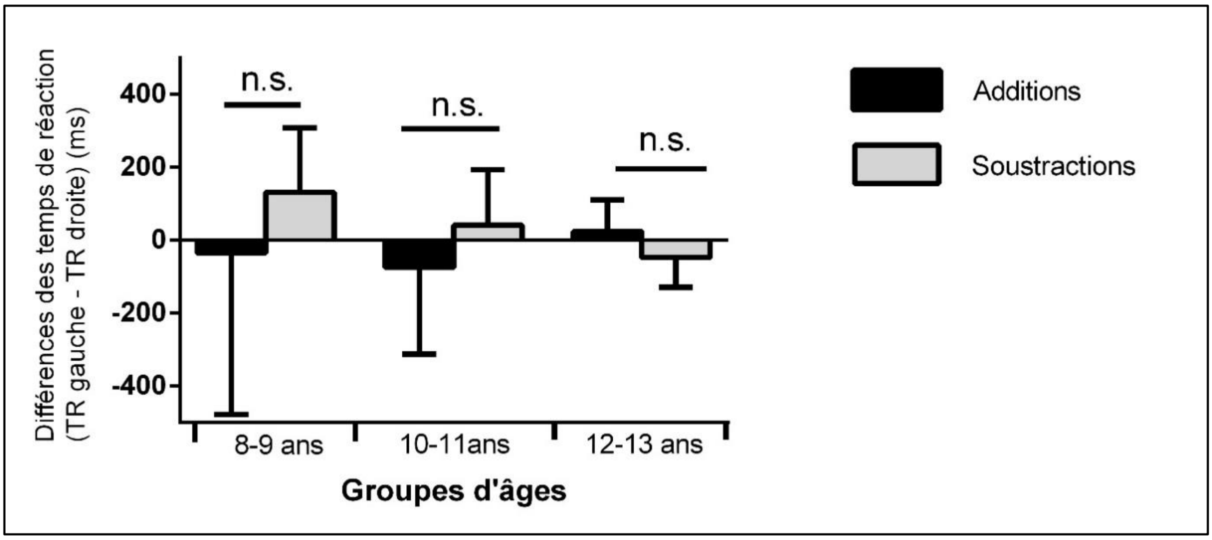


Figure 8 : Différences des temps de réponse (en ms) du groupe contrôle, en fonction des classes d'âge et du type d'opération (addition ou soustraction)

Pour les enfants ayant de 8 à 9 ans le biais de réponse pour les additions est de - 35ms (ET = 441ms) tandis qu'il est de 130ms (ET = 177ms) pour les soustractions (t = 0,99 et p = 0,18 unilatéral). Pour les enfants de 10 à 11 ans, le biais de réponse pour les additions est de -74ms (ET = 238ms) tandis qu'il est de 41ms (ET = 151ms) pour les soustractions (t = 1,31 et p = 0,11 unilatéral). Pour les enfants ayant de 12 à 13 ans, le biais de réponse pour les additions est de 13ms (ET = 89ms), tandis qu'il est de -47ms (ET = 77ms) pour les soustractions (t = 1,58 et p = 0,07 unilatéral). Une différence de biais de réponse (positif pour les additions ; négatif pour les soustractions) émerge donc pour les enfants de 12 à 13 ans.

Nous avons ensuite effectué des tests de Student s'intéressant au biais de réponse (temps de réponse à gauche – temps de réponse à droite) des additions, afin de comparer ceux-ci en fonction des classes d'âge. Pour les enfants de 8 à 9 ans, le biais de réponse pour les additions est de -35ms (ET =441ms) tandis qu'il est de -74ms (ET = 238ms) pour les enfants ayant de 10 à 11 ans. Ces résultats ne révèlent pas de différence significative entre les groupes d'âge 8-9 ans et 10-11 ans pour les additions (t = 0,25 et p = 0,80 bilatéral). Ensuite, le biais de réponse pour les additions pour les enfants ayant de 8 à 9 ans est de -35ms (ET = 441ms) tandis que pour les enfants ayant de 12 à 13 ans il est de 13ms (ET = 89ms). Ces résultats ne révèlent pas de différence significative entre les groupes d'âge 8-9 ans et 12-13 ans concernant les additions (t = 0,36 et p = 0,72 bilatéral). Enfin, le biais de réponse pour les additions des enfants ayant de 10 à 11 ans est de -74 ms (ET =238ms) tandis que pour les enfants de 12 à 13 ans, il est de 13ms (ET = 89ms). Encore une fois, ces résultats ne révèlent pas de différence significative entre les groupes 10-11 ans et 12-13 ans à propos des additions (t = 1,15 et p = 0,26 bilatéral).

Ainsi, dans ce groupe contrôle, nous ne retrouvons pas d'effet significatif impliqué par un biais attentionnel, pour les additions quels que soient les groupes d'âge considérés (cf. Figure 9).

.

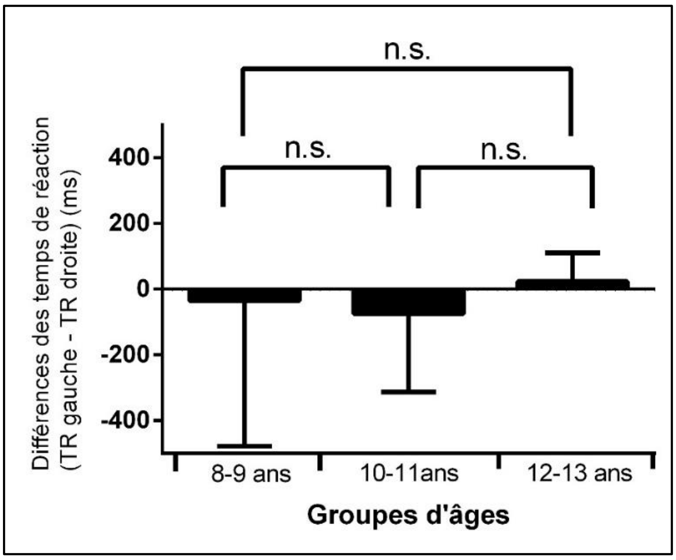


Figure 9 : Différences des temps de réponse (en ms) pour les additions du groupe contrôle, en fonction des classes d'âge

Ultérieurement, nous nous sommes intéressées au biais de réponse (temps de réponse à gauche – temps de réponse à droite) des soustractions, afin de comparer ceux-ci en fonction des classes d'âge.

Pour les enfants de 8 à 9 ans, le biais de réponse pour les soustractions est de 130ms (ET = 177ms) tandis qu'il est de 41ms (ET = 151ms) pour les enfants ayant de 10 à 11 ans. Au vu de ces résultats, nous ne relevons pas de différence significative entre les groupes 8-9 ans et 10-11 ans dans le cadre de résolution de soustractions (t = 1,21 et p = 0,24 bilatéral). Ensuite, le biais de réponse pour les soustractions pour les enfants ayant de 8 à 9 ans est de 130 ms (ET = 177ms) tandis que pour les enfants ayant de 12 à 13 ans il est de -47ms (ET = 77ms). Ces résultats révèlent une différence significative entre les 8-9 ans et 12-13 ans (t = 2,99 et

p<0,01* bilatéral). Enfin, le biais de réponse pour les soustractions pour les enfants ayant de 10 à 11 ans est de 41ms (ET = 151ms) tandis que les enfants ayant de 12 à 13 ans est de -47ms (ET = 77ms). Ces résultats, comme pour le test de Student précédent, objectivent une différence significative entre les participants contrôles de 10-11 ans et ceux de 12-13 ans (t = 1,74 et p = **0,04*** unilatéral).

Nous observons donc un effet significatif de la position du second opérande dans les soustractions, qui apparaitrait au sein de ce groupe contrôle dans le groupe d'âge 12 ou 13 ans (cf. Figure 10).

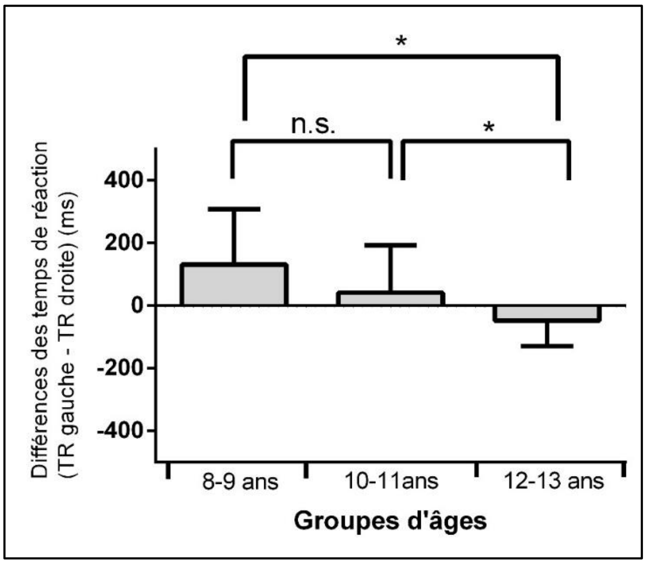


Figure 10 : Différences des temps de réponse (en ms) pour les soustractions du groupe contrôle, en fonction des classes d'âge

Enfin, nous avons réalisé une ANOVA 3x2 avec le groupe d'âge comme facteur inter-sujets (8-9 ans ; 10-11 ans ; 12-13 ans) et le type d'opération (addition ou soustraction) comme facteur intra-sujet. Celle-ci ne révèle pas d'effet principal du groupe d'âges (F (2,28) = 0,57 et p = 0,57) ni d'effet principal de l'opération (F(1,28) = 1,65 et p = 0,21). De plus, nous n'observons pas d'interaction entre ces deux variables (F(2,28) = 1,44 et p = 0,25).

2 Groupe dyscalculique

2.1 Performance globale

Sur l'ensemble de l'expérience, la performance moyenne des participants contrôles était de 85,42 % de réponses correctes (ET = 17,38%). Un premier test de Student a été effectué (cf. Figure 11) pour comparer le taux de bonnes réponses selon le type d'opération (addition vs. soustraction). Le test révèle un effet significatif du type d'opération (t = 1,95 et p **= 0,03*** en unilatéral). En moyenne, les participants du groupe contrôle répondaient correctement aux additions dans 88,26% des cas (ET = 12,62%) et aux soustractions dans 82,58% des cas (ET = 20,87%).

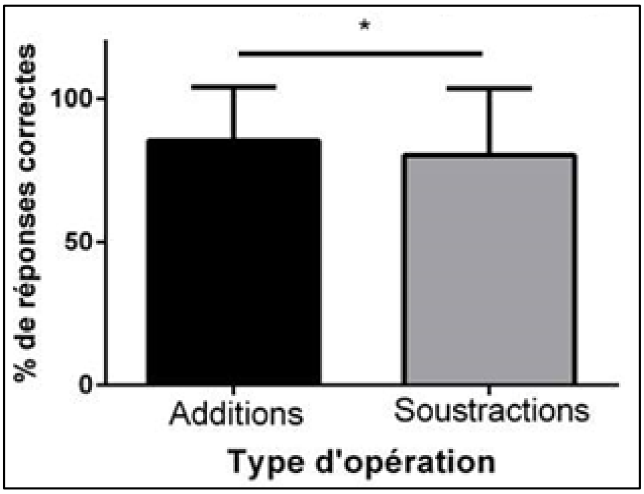


Figure 11 : Performance du groupe dyscalculique (en % de réponses correctes), en fonction du type d'opération (addition ou soustraction

Un second test de Student a été effectué pour comparer les temps de réponses selon le type d'opération (addition vs. soustraction). Le test révèle un effet significatif du type de l'opération (t = 2,80 et **p<0,01*** en bilatéral). En moyenne, les additions (m = 1935ms et ET= 576ms) étaient résolues plus rapidement que les soustractions (m = 2190ms et ET = 904ms). Ces résultats sont représentés graphiquement sur la figure 12.

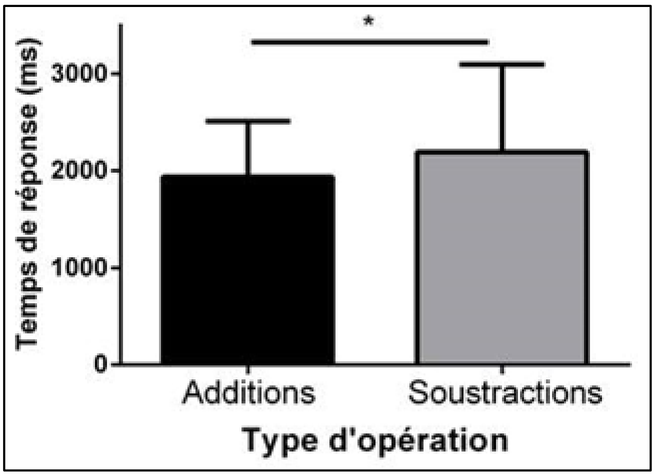


Figure 12 : Moyennes des temps de réponse (en ms) du groupe dyscalculique, en fonction du type d'opération (addition ou soustraction)

2.2 Analyse du biais de réponse

Pour rappel, tout comme pour le groupe contrôle, le biais spatial est défini comme la différence de temps de réaction lorsque le second opérande est présenté à gauche et lorsque le second opérande est présenté à droite (temps de réaction à gauche – temps de réaction à droite). Ainsi, un biais spatial positif correspond donc à une facilitation de détection quand le deuxième opérande apparaît à droite du signe arithmétique. A l'inverse, un biais spatial négatif correspond à une facilitation de détection quand le deuxième opérande apparaît à gauche du signe arithmétique. La présence de ce biais spatial dans la résolution des opérations a été analysée séparément pour chaque classe d'âge en fonction du type d'opération (addition et soustraction).

Afin d'appréhender le rôle de la position du second opérande dans le temps de résolution du fait arithmétique, nous avons réalisé différents tests de Student sur le biais de réponse au sein du groupe dyscalculique, en fonction des groupes d'âge et des types d'opérations. Les résultats sont présentés sur la figure 13.

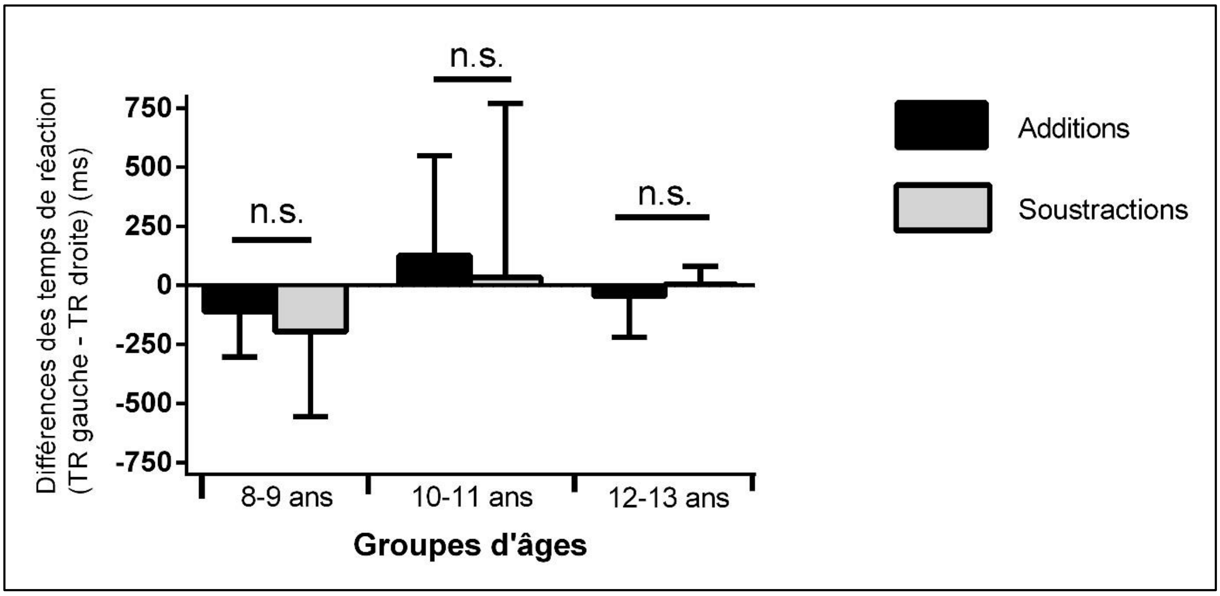


Figure 13 : Différences des temps de réponse (en ms) pour le groupe dyscalculique, en fonction des classes d'âge et du type d'opération (addition ou soustraction)

Pour les enfants ayant de 8 à 9 ans le biais de réponse pour les additions est de -111ms (ET = 192ms) tandis qu'il est de -195ms (ET = 360ms) pour les soustractions (t = 0,44 et p = 0,34 unilatéral). Pour les enfants de 10 à 11 ans, le biais de réponse pour les additions et de 127ms (ET = 421ms) tandis qu'il est de 34ms (ET= 736ms) pour les soustractions (t = 0,44 et p = 0,33 unilatéral). Pour les enfants ayant de 12 à 13 ans, le biais de réponse pour les additions est de -45ms (ET = 174ms), tandis qu'il est de 6ms (ET = 74ms) pour les soustractions (t = 0,89 et p = 0,21). Une différence de biais de réponse (positif pour les additions ; négatif pour les soustractions) n'émerge pas pour les enfants dyscalculiques.

Nous avons ensuite, comme pour le groupe contrôle, effectué des tests de Student s'intéressant au biais de réponse (temps de réponse à gauche – temps de réponse à droite) des additions, afin de comparer ceux-ci en fonction des classes d'âge. Pour les enfants de 8 à 9 ans, le biais de réponse pour les additions est de -111ms (ET = 192ms) tandis qu'il est de 127ms (ET = 421ms) pour les enfants ayant de 10 à 11 ans. Ces résultats ne révèlent pas de différence significative entre les groupes 8-9 ans et 10-11 ans pour la résolution des additions (t = 1,2 et p = 0,25 bilatéral). Ensuite, le biais de réponse pour les additions pour les enfants ayant de 8 à 9 ans est de -111ms (ET = 192ms) tandis que pour les enfants ayant de 12 à 13 ans il est de -45ms (ET = 174ms). Aucune différence significative n'est donc relevée entre ces deux groupes d'âge sur une tâche de résolution d'additions (t = 0,60 et p = 0,56 bilatéral). Enfin, le biais de réponse pour les additions pour les enfants ayant de 10 à 11 ans est de 127ms (ET = 421ms) tandis que pour les enfants ayant de 12 à 13 ans il est de -45ms (ET = 174ms). Ces résultats ne révèlent pas non plus de différence significative entre les groupes d'enfants dyscalculiques de 10-11 ans et ceux de 12-13 ans pour les additions (t = 0,95 et p = 0,36 bilatéral).

Ainsi, dans ce groupe dyscalculique, nous ne retrouvons pas d'effet significatif impliqué par un biais attentionnel, pour les additions quels que soient les groupes d'âge considérés (cf. Figure 14).

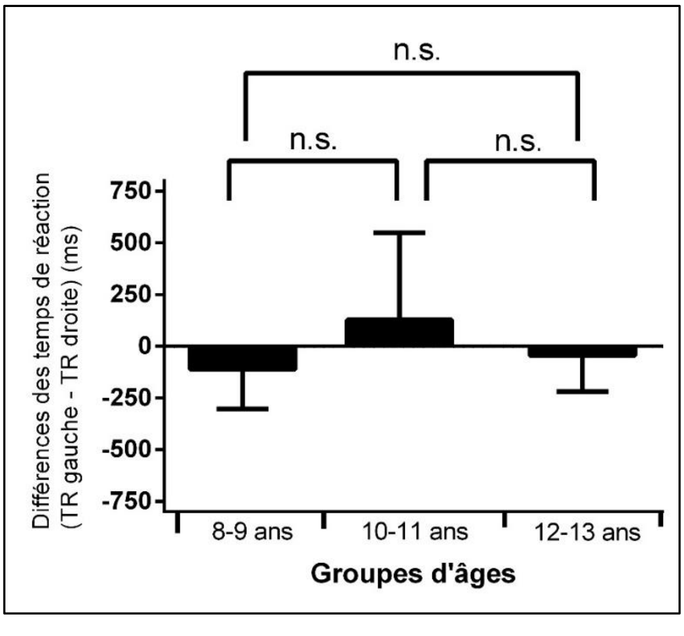


Figure 14 : Différences des temps de réponse (en ms) pour les additions du groupe dyscalculique, en fonction des classes d'âge

A la suite des additions, nous nous sommes intéressées au biais de réponse (temps de réponse à gauche moins temps de réponse à droite) des soustractions, afin de comparer ceux-ci en fonction des classes d'âge.

Pour les enfants de 8 à 9 ans, le biais de réponse pour les soustractions est de -195ms (ET = 360ms) tandis qu'il est de 34ms (ET = 736ms) pour les enfants ayant de 10 à 11 ans. Nous ne relevons pas de différence significative entre ces deux groupes d'âge chez les dyscalculiques dans la résolution de soustractions (t = 0,65 et p = 0,52 bilatéral). Ensuite, le biais de réponse pour les soustractions pour les enfants ayant de 8 à 9 ans est de -195ms (ET = 360ms) tandis que pour les enfants ayant de 12 à 13 ans il est de -6ms (ET = 74ms). Ces résultats ne révèlent pas non plus de différence significative entre les enfants de 8-9 et ceux de 12-13 ans pour les soustractions (t = 1,35 et p = 0,21 bilatéral). Enfin, le biais de réponse pour les soustractions pour les enfants ayant de 10 à 11 ans est de 34ms (ET = 736ms) tandis que les enfants ayant de 12 à 13 ans est de 6ms (ET = 74ms). Toujours pour les soustractions, ces résultats n'objectivent pas de différence significative entre ces deux classes d'âge, dans la population expérimentale (t = 0,09 et p = 0,93 bilatéral).

Nous n'observons donc pas d'effet significatif de la position du second opérande dans les soustractions, au sein de ce groupe dyscalculique (cf. Figure 15).

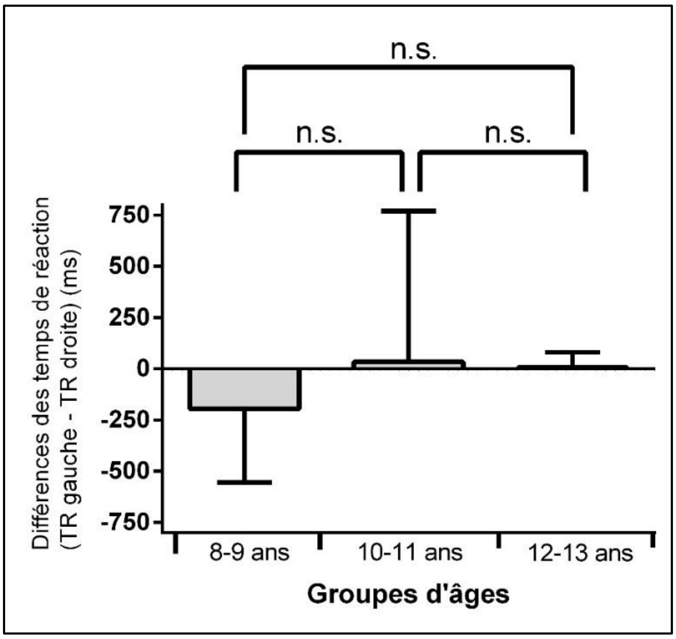


Figure 15 : Différences des temps de réponse (en ms) pour les soustractions du groupe dyscalculique, en fonction des classes d'âge

Enfin, nous avons réalisé une ANOVA 3x2 avec le groupe d'âge comme facteur inter-sujets (8-9 ans ; 10-11 ans ; 12-13 ans) et le type d'opération (addition ou soustraction) comme facteur intra-sujet. Celle-ci ne révèle pas d'effet principal du groupe d'âges (F (2,19) = 0,71 et p = 0,51) ni d'effet principal de l'opération (F(1,19) = 0,11 et p = 0,74). De plus, nous n'observons pas d'interaction entre ces deux variables (F(2,19) = 1,45 et p = 0,86).

IV Résultats intergroupes :

1 Performance globale

Sur l'ensemble des résultats de la tâche expérimentale, la performance moyenne des participants contrôles (m = 96,71% et ET = 6,09%) est significativement supérieure à celle des participants dyscalculiques (m = 85,42 et ET = 17,38). En d'autres termes, on trouve un effet significatif du groupe (cf. Figure 16 gauche) quant à la résolution des faits arithmétiques de la tâche (t = 6,68 et **p<0,01*** bilatéral). En revanche, on ne retrouve pas d'effet significatif du type d'opération (t = 1,19 et p = 0,24 bilatéral), comme l'illustre la figure 16 droite : en moyenne, l'ensemble des participants répond correctement à 92,85% des additions (ET = 10,25%) et 91,19% des soustractions (ET = 15,80%).

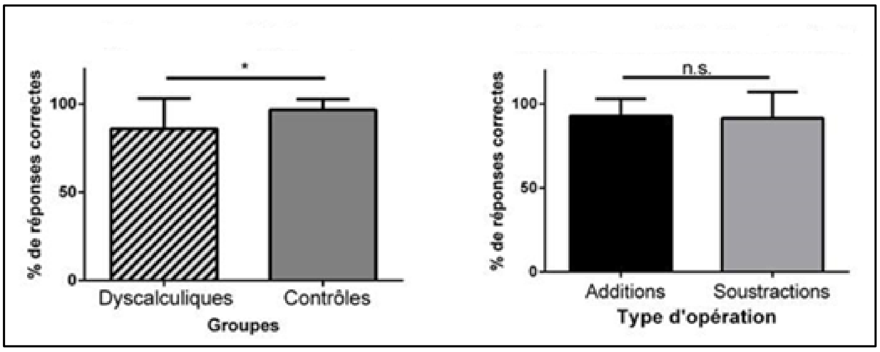


Figure 16 : Pourcentage de réponses correctes en fonction du groupe (gauche) et en fonction du type d'opération (droite)

D'une part, si l'on considère uniquement les additions (cf. Figure 17 gauche), en moyenne, le groupe dyscalculique répond correctement à 80,26% (ET = 12,62%) tandis que le groupe contrôle répond correctement à 96,10% (ET = 6,53%). Ces résultats révèlent des performances significativement différentes entre les groupes dyscalculique et contrôle pour les additions (t = 4,17 et **p<0,01*** bilatéral). D'autre part, si l'on considère uniquement les soustractions (cf. Figure 17 droite), en moyenne, le groupe dyscalculique répond correctement à 82,58% (ET = 20,87%) tandis que le groupe contrôle répond correctement à 97,31% (ET = 5,60%). Ces résultats révèlent également une différence significative entre les deux groupes (dyscalculique vs. contrôle) pour les soustractions (t = 5,31 et **p<0,01*** en bilatéral).

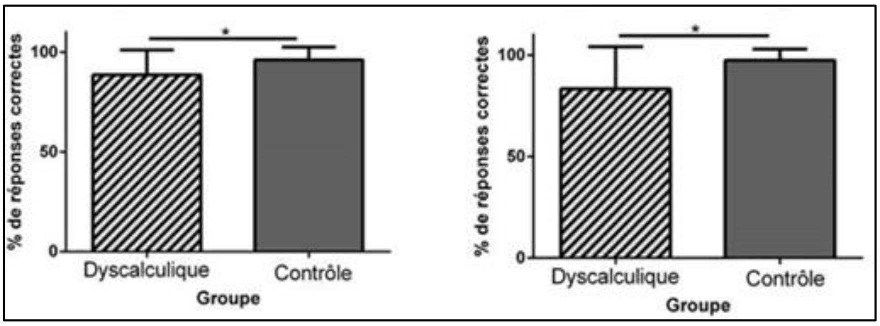


Figure 17 : Pourcentage de réponses correctes pour les additions (gauche) et pour les soustractions (droite)

Sur l'ensemble des résultats de la tâche expérimentale, le temps de résolution moyen des participants contrôles (m = 1440ms et ET = 532ms) est significativement inférieur à celui dyscalculiques (m = 2062ms et ET = 764ms). En d'autres termes, on trouve un effet significatif du groupe (cf. Figure 18 gauche) sur le temps de résolution des faits arithmétiques de la tâche (t = 6,99 et **p<0,01** bilatéral). De plus, et comme le suggère la figure 18 (droite), nous retrouvons un effet significatif du type d'opération (t = 3,96 et **p<0,01** bilatéral) : en moyenne, l'ensemble des participants répond en 1612ms aux additions (ET = 600ms) et 1784ms aux soustractions (ET = 794ms).

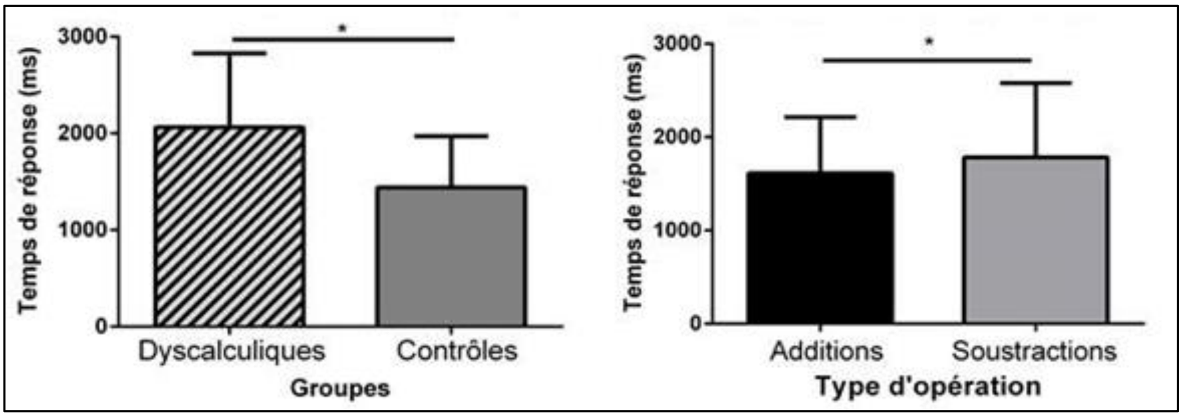


Figure 18 : Temps de réponse moyen (en ms) en fonction du groupe (gauche) et en fonction du type d'opération (droite)

Dans un second temps, si l'on considère d'une part, uniquement les additions (cf. Figure 19 gauche), le groupe dyscalculique répond en moyenne en 1934ms (ET = 576ms) tandis que le groupe contrôle répond en moyenne en 1383ms (ET = 508ms). Ces résultats présentent une performance significativement meilleure pour le groupe contrôle par rapport au groupe dyscalculique pour les additions (t = 5,20 et **p<0,01** bilatéral). D'autre part, si l'on considère uniquement les soustractions (cf. Figure 19 droite), le groupe dyscalculique répond en moyenne 2190ms (ET = 904ms) tandis que le groupe contrôle répond en moyenne en 1496ms (ET = 553ms). Nous relevons, également pour les soustractions, une différence significative entre le groupe dyscalculique et le groupe contrôle (t = 4,90 et **p<0,01** bilatéral).

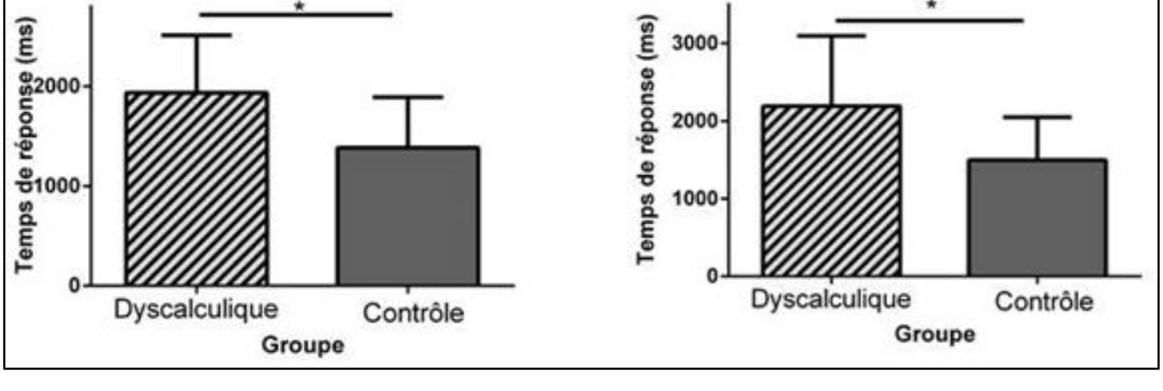


Figure 19 : Temps de réponse moyen (en ms) pour les additions (gauche) et pour les soustractions (droite) en fonction du groupe

2 Différences en temps de réponse

Nous nous sommes ensuite intéressées, pour chaque groupe d'âge, aux différences de biais entre les deux populations (contrôle ou dyscalculique). Pour ce faire, nous avons réalisé plusieurs tests de Student.

Pour les additions, les enfants de 8 ou 9 ans dyscalculiques avaient une moyenne de biais de -111ms (ET = 192ms), tandis que les enfants du même âge dans le groupe contrôle présentaient une moyenne de biais de -35ms (ET = 441ms). Ces résultats n'indiquent pas de différence significative entre les enfants de 8-9 ans du groupe dyscalculique et ceux du groupe contrôle pour les additions ($t = 0,36$ et $p = 0,73$ bilatéral). En revanche, pour les soustractions, les enfants de 8 ou 9 ans dyscalculiques avaient une moyenne de biais de -195ms (ET = 360ms), tandis que les enfants du même âge du groupe contrôle présentaient une moyenne de biais de 130ms (ET = 177ms). Ces résultats indiquent une différence significative entre les enfants de 8-9 ans des deux groupes (dyscalculique et contrôle) pour les soustractions ($t = 2,21$ et **p = 0,04*** bilatéral).

Pour les additions, les enfants de 10 ou 11 ans dyscalculiques avaient une moyenne de biais de 127ms (ET = 421ms), tandis que les enfants du même âge du groupe contrôle présentaient une moyenne de biais de -74ms (ET = 238ms). Nous ne relevons pas de différence significative entre ces deux groupes pour les additions ($t = 1,44$ et $p = 0,17$ bilatéral). Pour les soustractions, les enfants de 10 ou 11 ans dyscalculiques avaient une moyenne de biais de 34ms (ET = 736ms), tandis que les enfants du même âge du groupe contrôle présentaient une moyenne de biais de 41ms (ET = 151ms). Nous pouvons donc citer une différence significative pour les soustractions entre les enfants de 10-11 ans de chacun des deux groupes ($t = 0,03$ et $p = 0,97$ bilatéral).

Enfin, pour les additions, les enfants de 12 ou 13 ans dyscalculiques avaient une moyenne de biais de -45ms (ET = 174ms), tandis que les enfants du même âge du groupe contrôle présentaient une moyenne de biais de 13ms (ET = 89ms). Ainsi, ces deux groupes (12-13 ans dyscalculiques vs. 12-13 ans contrôles) ne montrent pas de différence significative pour les additions ($t = 0\ ,92$ et $p = 0,37$ bilatéral). Pour les soustractions, les enfants de 12 ou 13 ans dyscalculiques avaient une moyenne de biais de 6ms (ET = 74ms), tandis que les enfants du même âge du groupe contrôle présentaient une moyenne de biais de -47ms (ET = 77ms). Ces derniers résultats ne montrent pas de différence significative entre les enfants de 12-13 dyscalculiques et ceux du groupe contrôle ($t = 1,38$ et $p = 0,19$ bilatéral).

Chapitre V

DISCUSSION DES RESULTATS

I Introduction

En 1972, Groen et Parkman étaient les premiers à s'intéresser aux stratégies utilisées par des adultes lors de la résolution de faits arithmétiques. De cette première étude ont émergé deux courants théoriques. D'une part, le modèle de récupération veut que les calculateurs experts résolvent les opérations par récupération du résultat stocké en mémoire à long terme. La stratégie qui a longtemps fait consensus est principalement défendue par Ashcraft (Ashraft, 1992 ; Ashcaft et Battaglia 1983 ; Ashcraft 1983). D'autre part, le second modèle proposé dans la littérature suggère que les faits arithmétiques soient résolus au moyen de stratégies procédurales qui s'automatiseraient au fur et à mesure de l'exposition et de l'entrainement. Baroody (1983,1984, 1994) a longtemps soutenu cette stratégie de résolution qui se place dans une optique développementale. Récemment, Fayol et Thévenot (2012) ont montré grâce à l'effet d'amorçage que l'apparition du signe arithmétique quelques millisecondes avant les opérandes facilite significativement la résolution de l'opération chez les calculateurs experts. Cette influence du signe irait en faveur du modèle procédural. De plus, Barouillet et Thévenot (2013) apportent également des résultats en faveur du modèle procédural en suggérant la présence de procédures arithmétiques automatisées lors de calculs à très petits opérandes.

Dernièrement, Mathieu et al. (2016) ont démontré que les adultes utilisent des procédures arithmétiques automatisées et donc inconscientes pour la résolution des calculs arithmétiques simples (additions et soustractions à un opérande). Pour faire suite à l'étude de Mathieu et al. (2016), Couderc et al. (*soumis*) ont montré, grâce au même protocole que l'étude de Mathieu et al. (2016), la présence d'une automatisation de ces procédures arithmétiques chez les enfants scolarisés en primaire. Ces résultats proposent que la position du second opérande à gauche ou à droite à une influence significative selon le type d'opération (respectivement soustraction et addition) à partir du CM2. Ce biais de réponse serait en faveur de l'automatisation des procédures qui apparaitrait dans cette tranche d'âge.

Ces dernières études vont dans le sens du modèle procédural et remettent donc en question le consensus pourtant bien établi voulant que les calculateurs experts résolvent les calculs simples de manière tellement efficace qu'ils seraient récupérés en mémoire.

La présente étude de recherche comportementale a pour objectif de mettre en évidence l'absence d'automatisation de ces procédures arithmétiques lors de calculs simples chez des enfants dyscalculiques. La tranche d'âge permettant de tester cette hypothèse (8 à 13 ans) dans ce protocole est choisie en regard de la littérature et notamment de l'article de Cho et al. (2012) qui suggère que cette tranche d'âge serait associée à une période développementale importante pour l'acquisition des compétences arithmétiques. En effet, 8 ans est l'âge correspondant à l'entrée dans la résolution des faits arithmétiques et 13 ans correspond à l'âge de l'acquisition d'un niveau « expert » (les petits calculs à un opérande seraient résolus de la même manière à 13 ans qu'à l'âge adulte). Ainsi, dans cette étude, nous faisions l'hypothèse que les procédures arithmétiques reposant sur des déplacements rapides le long d'une ligne mentale numérique ne s'automatisent pas chez des participants dyscalculiques entre 8 et 13 ans, au contraire des participants contrôles.

II Interprétation des résultats

Lors de cette étude, nous avons testé l'influence de la position du deuxième opérande (gauche ou droite de l'écran) lors de la résolution de faits arithmétiques (additions et soustractions). Ces faits concernant des opérandes inférieurs à 4, car ces calculs étaient les plus susceptibles d'être automatisés entre 8 et 13 ans. Notre objectif de recherche était d'observer une automatisation dans le groupe contrôle et l'absence d'automatisation dans le groupe dyscalculique. C'est-à-dire que la présentation à droite du deuxième opérande dans une addition devait être facilitatrice à partir d'un âge donné dans le groupe contrôle alors qu'elle n'aurait aucune influence pour les participants du groupe dyscalculique. De la même manière, la présentation à gauche du deuxième opérande dans une soustraction devait être facilitatrice à partir d'un âge donné dans le groupe contrôle alors qu'elle n'influencerait pas le groupe dyscalculique.

Les résultats obtenus semblent partiellement confirmer notre hypothèse théorique. En effet, chez les participants contrôles il semble y avoir une automatisation des procédures arithmétiques dans la résolution des soustractions (mais pas pour les additions). Cette automatisation se traduit par un effet significatif du biais entre les classes d'âge 8 -9 et 12-13 ans ; et entre les classes d'âge 10-11 et 12-13 ans. Ces données nous permettent de valider partiellement notre première hypothèse opérationnelle. De plus, notre seconde hypothèse opérationnelle est également validée par l'absence d'automatisation des procédures arithmétiques pour le groupe dyscalculique : la position de l'opérande n'entrainant pas de différence de temps de réponse significative.

De plus, en termes de résultats globaux, il s'avère que tant dans le pourcentage de réponses correctes que dans les temps moyens de réponse, les dyscalculiques sont significativement moins performants (pourcentage de réponses correctes et temps de réponse) que les participants du groupe contrôle quel que soit le type d'opération (pour détails, cf. partie « Résultats 4.1 »).

Ces résultats se placent dans la même lignée que ceux de Mathieu et al. (2016) ainsi que Couderc et al. (*soumis*) qui utilisaient le même paradigme expérimental que la présente étude. Alors que Mathieu et al. (2016) objectivaient la présence d'une automatisation des procédures chez l'adulte, nous nous plaçons, au même titre que Couderc et al, dans une approche développementale. Nos résultats suivent exactement la même tendance : l'automatisation apparait chez les participants contrôles à partir de 12 ans environ (CM1/CM2). Nous ajoutons la perspective neuropsychologique (étude du participant pathologique) en complément de l'analyse du développement typique. Cette première ébauche nous apporte une preuve de la différenciation du développement typique et du développement pathologique dans le cadre de la dyscalculie quant à la résolution de petits faits arithmétiques.

Plus généralement, les deux études précédemment citées ainsi que la présente étude donnent suite aux récents travaux de recherche ébranlant le consensus actuel de récupération des faits arithmétiques. Parmi elles, nous trouvons l'étude de Lépine et al. (2003) qui différenciait la résolution des additions et des soustractions par rapport à la résolution des multiplications. Ces premières étant résolues par procédure alors que la multiplication serait résolue par récupération. Par la suite, Fayol et Thévenot (2012), ont montré l'existence d'un effet d'amorçage chez les calculateurs experts, qui étaient aidés dans la résolution des faits arithmétiques lorsque le signe arithmétique apparaissait quelques millisecondes avant les opérandes. Enfin, Barouillet et Thévenot (2013) avait apporté des arguments complémentaires en évoquant un déplacement d'attention sur une ligne mentale (gauche pour les soustractions, droit pour les additions) lors de la résolution des faits arithmétiques. L'ensemble de ces articles se place dans la théorie du modèle procédural (Baroody ; 1983,1984, 1994). Ce modèle veut que l'apprentissage du calcul se fasse grâce à des procédures de résolution qui initialement sont lentes et coûteuses cognitivement. Ces procédures, au fur et à mesure de l'exposition aux faits et du parcours scolaire de l'enfant, s'automatiseraient et deviendraient ainsi efficaces, rapides et peu coûteuses.

En regard de la littérature, trois éléments des résultats de la présente étude donnent sujet à interprétations.

1 Absence d'automatisation dans la résolution des additions pour les deux groupes

Dans la présente étude, nous nous sommes consacrées à une tranche d'âge développementale large. Ainsi, le nombre de participants par groupe d'âge s'en est trouvé moindre. L'effectif réduit de la population peut expliquer l'absence d'automatisation pour l'ensemble des participants, nous pourrions envisager d'observer l'automatisation sur une population plus conséquente. Nous sommes dans l'incapacité de tirer une conclusion quant au déficit d'automatisation pour les additions chez les dyscalculiques en comparaison à un groupe contrôle.

L'absence de biais dans les deux groupes ne nous permet pas de conclure que les additions sont récupérées en mémoire à long terme, mais cette donnée se retrouve également dans l'une des expérimentations de Couderc et al. (*soumis*). En effet, dans cette dernière étude, l'effet sur les additions semble plus subtil, ou en tout cas plus difficilement objectivable avec ce paradigme. Pourtant, il est décelé objectivement chez l'adulte, dans l'article de Mathieu et al. (2016) avec ce même paradigme. L'hétérogénéité et la variabilité des réponses des enfants peuvent alors être vues comme des éléments d'explication à cette absence d'automatisation dans la présente étude mais également dans l'étude de Couderc et al. (*soumis*). Nous pouvons donc envisager le fait qu'avec une autre tâche, suscitant l'effet d'amorçage comme dans l'article de Fayol et Thevenot (2012), par exemple, l'automatisation pourrait être plus facilement décelable.

Néanmoins, il est possible que les additions et les soustractions ne sollicitent pas les mêmes types de stratégies et que ces stratégies ne suivent pas la même évolution développementale en fonction du type d'opération. Cette différence entre les types d'opérations existe déjà de par la discrimination avec les multiplications qui seraient résolues exclusivement par rappel mnésique (Lépine et al. 2003).

Nous pouvons également interpréter cette absence grâce au modèle de l'adaptation des choix stratégiques (ASCM) de Siegler et Shipley (1995). En effet, ce modèle veut que le choix de la stratégie de résolution (procédure ou récupération) se fasse en fonction de la vitesse et la précision de chacune d'elles. L'évolution stratégique de ce modèle voudrait que les enfants résolvent en fonction de données sur leurs performances passées, en utilisant à terme les procédures automatisées. Il se peut donc que dans notre population, les stratégies soient encore mixtes sur les additions pour les enfants, car l'une ne prévaut pas sur l'autre en termes d'efficience. Cela empêcherait d'observer l'effet du biais.

2 Emergence d'un biais significatif dans la résolution des soustractions à partir de 12-13 ans pour le groupe contrôle

Au sein du groupe contrôle, nous objectivons un biais significatif pour le groupe d'âge des 12 et 13 ans. Ce biais est interprété ici comme une émergence de l'automatisation des procédures à cet âge. En effet, auparavant, les enfants utiliseraient des procédures encore lentes et coûteuses afin de résoudre les soustractions. Lorsque celles-ci deviennent efficientes, le biais s'objective. Cela traduit l'automatisation des procédures, et donc leur caractère précis, rapide et non coûteux cognitivement. A partir de cet âge, nos participants contrôles ont donc le même pattern de réponse que les participants adultes, jugés « experts » (Mathieu et al. 2016). Les enfants contrôles les plus âgés sont ainsi aidés lorsque le second opérande apparait à gauche pour une soustraction. En effet, le signe arithmétique « - » suscite un déplacement attentionnel horizontal (à gauche pour les soustractions). Lorsque les procédures sont automatisées, c'est-à-dire que si la position du second opérande suit l'ordination de la ligne mentale numérique, il y aurait facilitation ou gêne de la mise la stratégie de la résolution des soustractions.

3 Absence d'automatisation de la résolution des soustractions dans le groupe dyscalculique

Dans le groupe dyscalculique, nous observons une absence de biais significatif lors de la résolution des soustractions, contrairement au groupe contrôle. Cette donnée peut être interprétée de plusieurs façons.

Premièrement, les dyscalculiques pourraient ne jamais automatiser les procédures de résolution des faits arithmétiques. En partant de cette possibilité, nous pourrions avancer que ce déficit constitue l'un des critères caractérisant la dyscalculie. En effet, les dyscalculiques ayant des faiblesses dans la précision des représentations mentales des nombres, de la ligne numérique mentale etc. il serait possible d'observer une imprécision de résolution également, et donc un déficit d'automatisation de la résolution des faits. Qualitativement, nous avons pu observer que les participants dyscalculiques de tous âges se servaient énormément du support digital afin de résoudre les opérations pourtant de petite taille. Cette observation traduit le caractère couteux de l'opération cognitive, qui ne peut être supporté par la mémoire de travail seule.

Deuxièmement, il pourrait être envisagé que les dyscalculiques automatisent les procédures de calcul plus tardivement dans leur développement. En effet, la pathologie pourrait être susceptible d'engendrer un déficit d'apprentissage, et les dyscalculiques pourraient avoir besoin d'un nombre d'expositions aux faits arithmétiques plus grand que les enfants contrôles, afin de parvenir à la même performance. Cette automatisation ne serait alors pas apparente dans nos résultats car la tranche d'âge choisie s'arrête à 13 ans.

Nous pouvons également interpréter cette absence d'automatisation au regard des hypothèses causales de la dyscalculie (cf. I. 5. de la partie théorique). En effet, dans le cadre d'un déficit spécifique au domaine arithmétique comme définition de la dyscalculie, les représentations mentales des grandeurs numériques sont instables, et le sens attribué au signe arithmétique est moins porteur. Ces deux déficits peuvent être des éléments d'explication à la non existence d'un biais significatif chez les dyscalculiques dans notre étude. Dans le cadre d'un déficit global à l'origine de la dyscalculie, l'hypothèse observe notamment un déficit de la mémoire de travail spatiale (Rotzer et al. 2009). Ce déficit pourrait jouer un rôle prépondérant et non négligeable dans notre tâche expérimentale où l'information à manipuler est donnée lors d'un stimulus visuel bref (150ms). Ainsi, cette interprétation peut nuancer nos résultats et demande d'approfondir le versant des additions en utilisant une autre tâche mettant moins en jeu la mémoire de travail visuo-spatiale. Ce type de tâche permettrait sans doute d'éclaircir les hypothèses causales de cette pathologie en recherchant les déficits associés.

Cette absence d'automatisation pourrait également être due aux comorbidités fortement présentes dans la pathologie dyscalculique. En effet, un Trouble Déficitaire de l'Attention avec ou sans Hyperactivité (TDA/H), une dyspraxie, une dysphasie seraient des pathologies susceptibles d'influencer les temps de réponses verbales des participants. Néanmoins, ayant anticipé cette problématique, nous avions placé ces pathologies en tant que critères d'exclusion, afin que les déficits soient uniquement dus à la dyscalculie et non à une pathologie liée. Cette absence n'est donc pas imputable aux comorbidités.

De plus, nous avons développé précédemment qu'il existait une phobie des mathématiques, particulièrement présente dans la population dyscalculique (Krinzinger & Kaufmann, 2006). Cette phobie pourrait entrainer un évitement des faits arithmétiques, dès le plus jeune âge. En effet, l'enfant ayant conscience de ses difficultés pourrait fuir les calculs lui demandant un effort cognitif trop coûteux, ou développer des stratégies erronées. Il se peut également que l'enfant qui éprouve une peur des faits arithmétiques conscientise d'autant plus l'effort de résolution, de crainte de commettre une erreur. Cette conscientisation pourrait empêcher l'automatisation, et ainsi faire échouer l'enfant de manière fréquente, tout en maintenant la résolution coûteuse et lente.

III Limites

Bien que le protocole de cette étude ait été élaboré et appliqué de manière rigoureuse et avec soin tout au long de ce travail de recherche, un regard critique permet de souligner quelques biais à prendre en compte.

1 Mode de recrutement

1.1 Le diagnostic de « dyscalculie »

Comme il était mentionné dans la première partie de ce travail, les critères du diagnostic de « dyscalculie » sont, dans leurs grandes lignes, officialisés dans les ouvrages de références

(DSM-V, CIM-10…). Cependant, certains éléments peuvent varier, du moins être nuancés, d'une définition à une autre en fonction des modèles théoriques sur lesquels la définition s'appuie. Ce flou qui existe toujours autour de la définition de la dyscalculie, impute indéniablement le diagnostic de cette pathologie. Les orthophonistes, premiers acteurs dans l'évaluation de la dyscalculie et donc de la pose du diagnostic se trouvent largement en difficulté : opposition des modèles théoriques de référence, peu de matériel d'évaluation…

La population de notre groupe expérimental (dyscalculique) a été recensée essentiellement dans le milieu orthophonique. Bien que le protocole rigoureux demandait des participants « avec diagnostic de dyscalculie » nous avons dû assouplir ce critère. En effet, peu d'orthophonistes osent poser officiellement un diagnostic et un flou relativement propre au système de pensée français, persiste autour de la distinction terminologique dyscalculie/logico-mathématiques. En effet, cette distinction entre les deux termes perdure en France sous grande influence piagétienne alors que la plupart des autres pays semblent avoir choisi une terminologie unique (: « la dyscalculie »). De ce fait, il convient de souligner que chaque participant du groupe expérimental présente des troubles arithmétiques et suit une rééducation pour cette plainte mais qu'officiellement, peu ont un diagnostic orthophonique de dyscalculie. Néanmoins, notre protocole nous a permis de limiter ce biais, en évaluant de manière objective et sur des critères reconnus internationalement les déficits en arithmétique de chacun. Les résultats aux tests de Woodcock Johnson III attestent de la différence de compétence arithmétique entre les deux groupes, le groupe dyscalculique obtenant des résultats plus faibles à ces épreuves.

1.2 La population contrôle

Comme nous l'expliquions dans la partie « Méthode », les 32 participants du groupe contrôle ont été démarchés par le biais d'une banque de données de familles volontaires pour participer à des expérimentations au laboratoire de recherche de l'Institut des Sciences Cognitives à Bron. Ces familles, pour la grande majorité, sont donc sensibilisées au monde de la recherche, voire curieuses des avancées scientifiques. De même, les enfants n'hésitaient pas à exprimer leur intérêt pour les épreuves. Bien souvent, les enfants testés avaient déjà participé à une ou plusieurs expérimentations au laboratoire. Au regard des résultats pour l'épreuve préalable de la NEMI-2 (indice d'efficience cognitive), nous retrouvions des scores supérieurs à la moyenne (IEC entre 115 et 136) pour 20% des participants du groupe contrôle. A l'opposé, nous retrouvions des scores dans la moyenne basse pour 50% des participants du groupe expérimental.

Objectivement, cette épreuve montre un décalage de niveau de quotient intellectuel entre les deux groupes testés, ce qui ne permet pas de les apparier sur ce critère. Néanmoins, il s'agit d'une lacune courante dans les études du domaine, étant donné le démarchage des populations, celles-ci sont rarement homogènes en termes de QI lorsque l'on compare les groupes contrôles au groupes pathologiques. De plus, il est à noter que même si les deux groupes ne sont pas significativement appariés en QI, les deux restent dans la norme et sont donc susceptibles d'avoir des résultats comparables pour les autres épreuves du protocole.

2 Sensibilité du Zareki-R

Deux épreuves du test Zareki-R (Von Aster, 2006. Traduction française par G. Dellatolas), présentées précédemment dans la partie II, étaient proposées dans le but de dégager un profil précis des habiletés mathématiques de chacun des participants, en parallèle des compétences arithmétiques évaluées par le test Woodcock-Johnson III ((Woodcock, McGrew, Schrank, Mather, 2007).

Cependant, l'échantillon qui a permis l'étalonnage du test Zareki-R ne permet pas une comparaison objective avec la population de la présente étude. En effet, les participants de notre étude diffèrent de la population d'étalonnage du test par plusieurs critères importants. Il est par exemple nécessaire de souligner que plus de la moitié de l'échantillon d'étalonnage du Zareki-R est constituée d'enfants suivant une scolarité en Zone d'Education Prioritaire (ZEP) alors qu'aucun des participants de notre étude n'est scolarisé en ZEP. De plus, une forte proportion (environ 30%) des enfants de l'étalonnage du Zareki-R ne présentait pas le français comme langue maternelle, alors que notre travail de recherche a respecté un critère d'inclusion « langue maternelle française », comme nous le précisions dans la partie II. Nous pouvons également donner la période d'étalonnage qui s'étendait de Janvier à Mars tandis que nos passations se sont déroulées de Juin à Novembre, ce qui pourrait montrer un décalage dans les résultats obtenus par les enfants de même âge.

Ainsi, nous observons qu'aucun des 24 participants du groupe dyscalculique n'a obtenu des scores pathologiques dans l'une ou l'autre des deux épreuves proposées, alors que le test du Woodcock-Johnson III faisait clairement apparaitre des difficultés mathématiques propres à la dyscalculie. Pour rappel, les participants du groupe contrôle sont tous suivis en orthophonie pour une rééducation de « dyscalculie ou de troubles logico-mathématiques ». Ces deux éléments nous confortent dans le diagnostic, même si celui-ci n'est pas probant aux subtests du ZAREKI-R utilisés. De plus, dans ces épreuves, une différence est perceptible pour les participants les plus jeunes. Cela mettrait en exergue le fait que ces subtests sont moins sensibles à partir d'un âge donné. En effet, ils s'intéressent à des compétences analogiques sur des quantités réduites (ligne numérique jusqu'à 100, estimation jusqu'à 80 environ). Il se peut que les représentations des nombres soient suffisamment précises sur ces quantités à partir de 10-11 ans (quand l'épreuve commence à manquer de sensibilité dans notre population).

3 Modalités de passation

Bien que le protocole de passation des épreuves ait anticipé un effet de fatigabilité interne à l'entretien, certains biais liés aux modalités de passation nécessitent toutefois d'être exposés.

En effet, l'entretien avec un participant durait environ 1h30 et le protocole prévoyait un contrebalancement de l'ordre des épreuves : la moitié des participants a commencé l'entretien par les épreuves préalables (Woodcock-Johnson III, Zareki-R et NEMI-2) et l'autre moitié a commencé par la tâche expérimentale. Cependant, les horaires d'entretien étant dépendants de la disponibilité des parents pour véhiculer les enfants, beaucoup d'eux étaient testés après une journée scolaire (fatigue accumulée).

Nous le précisions précédemment, un nombre important de participants (notamment du groupe contrôle) avaient déjà participé à des expériences au sein du laboratoire de recherche. Relativement familiers des locaux et des modalités générales d'expérimentation, nous pourrions également conjecturer que ces participants présentaient un degré d'anxiété sensiblement plus faible par rapport aux enfants qui participaient pour la première fois. Ce facteur anxiété mériterait, dans de futurs travaux, d'être pris en compte notamment en sélectionnant des participants n'ayant jamais participé à des études de recherche, par exemple.

De plus, il convient d'évoquer les différents lieux de passations qui ne suggéraient pas tous le même contexte. En effet, sur les 56 patients testés, les passations ont eu lieu en laboratoire de recherche, au domicile de l'enfant ou encore au cabinet de l'orthophoniste. Le laboratoire de recherche propose un environnement propice aux entretiens (calme, matériel adapté, luminosité adaptée…) mais l'enfant peut éprouver une anxiété importante du fait d'être seul avec une personne qui lui propose des tests (parallèle avec le scolaire). De ce fait, chaque lieu de passation comprenait ses avantages et ses inconvénients mais il aurait été plus optimal de pouvoir s'entretenir avec les 56 enfants dans un seul et même lieu neutre pour une meilleure homogénéité environnementale.

Le facteur environnement est très fortement lié au facteur anxiété, comme le suggèrent les deux paragraphes précédents. Récemment, Rubinsten (2015) proposait d'intégrer au diagnostic de dyscalculie des tests ciblant le niveau implicite. Ces derniers permettraient d'évaluer le niveau d'anxiété très présent chez les dyscalculiques. La dyscalculie présente une hétérogénéité majeure dans son tableau clinique (Kaufman et al., 2013) et de ce fait, il apparait nécessaire d'identifier les déficits spécifiques de chaque individu pour avoir l'opportunité de proposer des remédiations adaptées (Butterworth, 2011). L'anxiété serait donc à prendre en compte de manière spécifique dès lors qu'une évaluation de dyscalculie est portée sur un patient. Il s'agirait là d'une remarque qui permettrait d'améliorer, de préciser le protocole de la présente étude qui ne prend nullement en compte ce facteur anxiété dans la population testée. A l'avenir, et si ce protocole est réutilisé pour poursuivre ces recherches, il conviendrait de mettre en place une nouvelle épreuve qui viserait à évaluer le domaine affectif spécifique que représente l'anxiété face aux mathématiques dans cette pathologie, avec un test tel que l'ont proposé Rubinsten et Tannock en 2010.

IV Perspectives

1 Implications théoriques

1.1 Modèle procédural

Comme dit précédemment, la présente étude s'inscrit dans la lignée d'études récentes, remettant en question le consensus du modèle de récupération (rappel des résultats des faits arithmétiques simples stockés en mémoire à long terme). Les résultats précédemment exposés soulignent l'existence de procédures automatisées, et les mettent en exergue dans une perspective développementale. En effet, nous avons analysé cette résolution depuis la phase d'apprentissage de l'arithmétique (8 ans), jusqu'à la phase supposée « d'expertise » (13 ans) quant aux petits calculs (ayant des opérandes inférieurs à 4), soulignant ainsi l'apparition de l'effet au sein de notre population contrôle, pour les soustractions.

Nous apportons donc ici des arguments en faveur du modèle procédural, exposé par Baroody (1983, 1984, 1987, 1994) grâce à la significativité du biais observé chez les enfants contrôles les plus âgés, lors de la résolution de soustractions. Cette étude vient renforcer le modèle procédural mais également les résultats précédemment rapportés, utilisant le même paradigme (Mathieu et al. (2016) chez l'adulte, et Couderc et al. (*soumis*) pour une perspective développementale également). Néanmoins, l'absence de biais significatif sur les additions ne nous permet pas d'affirmer l'exclusive utilisation des procédures afin de résoudre les petits faits arithmétiques.

1.2 Rôle nombres et espace

Dans la littérature, il a été observé les liens étroits reliant les nombres et l'espace. Notre paradigme utilise cette relation afin d'objectiver l'existence de l'utilisation des procédures arithmétiques automatisées. Néanmoins, en trouvant cet effet significatif, nous nous plaçons également dans la démarche de démonstration du lien entre les nombres et l'espace.

Les liens entre l'arithmétique et l'espace ont d'ores et déjà été montrés, notamment par Fisher et al. (2003) ayant mis en avant des biais attentionnels consécutifs à l'apparition de petits ou de grands chiffres (biais respectivement à gauche ou droite) soulignant ainsi l'activation de la ligne numérique mentale lors de la perception de grandeurs numériques. Par la suite, Mc Crink et al. (2007) montrent l'existence de l'« operational momentum » : effet impliquant que les participants surestiment les résultats des additions de nuages de points, tandis qu'ils sous estiment les résultats des soustractions de nuages de points. On retrouve donc dans leur étude le déplacement le long de la ligne numérique mentale lors de l'addition et de la soustraction.

Dans ce paradigme, nous faisons l'hypothèse que le signe arithmétique « + » ou « – » entraine un déplacement attentionnel respectivement à droite ou à gauche, correspondant à un déplacement le long de la ligne numérique mentale (Mathieu et al. 2016). Ainsi, l'apparition du second opérande, selon sa position par rapport au déplacement attentionnel va à l'encontre ou non de la procédure mise en marche, ce qui entraine un biais significatif ou non. La présence du biais est ensuite objectivée ou non dans l'analyse des temps de réponse.

Ainsi, notre étude se sert, mais aussi objective, le lien entre les nombres et l'espace, car le paradigme utilisé emploie une dimension spatiale pour discriminer l'utilisation des procédures, de l'utilisation de la récupération potentielle.

1.3 Vers une hypothèse causale de la dyscalculie affinée ?

Notre étude, contrairement à celles de Mathieu et al. (2016) et Courderc et al. (*soumis*) utilise la tâche expérimentale sur une population pathologique. Cette nouvelle dimension nous amène à interpréter de nouvelles données expérimentales, en regard du tableau actuel de la dyscalculie. Il est objectivé ici que les enfants dyscalculiques ne suivent pas la même trajectoire développementale que les enfants contrôles, quant à la résolution des faits arithmétiques. En effet, contrairement à la population contrôle, il n'émerge pas de biais de réponse significatif dans la population dyscalculique.

Nous pouvons essayer d'interpréter cette absence de biais significatif au regard des hypothèses causales de la dyscalculie. En effet, dans l'hypothèse d'un déficit global des fonctions exécutives, et notamment de la mémoire de travail spatiale (Rotzer et al. 2009) chez les dyscalculiques, il peut être pertinent de penser que l'apparition du second opérande à gauche ou à droite n'aura pas le même impact chez les enfants dyscalculiques que chez les enfants contrôles. S'il existe une différence de perception de l'information spatiale, alors, l'ensemble des déplacements attentionnels spatiaux sont potentiellement modifiés ou absents.

De plus, si l'on considère la dyscalculie comme un déficit plus spécifique, le lien entre les nombres et l'espace a également été étudié. Ce dernier s'exprime alors par des représentations numériques mentales et une ligne numérique mentale qui sont moins précises chez les enfants dyscalculiques (Kucian 2011). Ce déficit peut avoir une influence dans la présence ou non d'un biais attentionnel significatif, car le signe arithmétique doit entrainer un déplacement attentionnel le long de la ligne mentale numérique.

Nous pourrions alors nous intéresser ultérieurement aux liens entre les différents déficits observés dans la dyscalculie (ligne numérique mentale, mémoire de travail, automatisation…) et ainsi étudier dans quelles mesures ils s'influencent dans ce type de tâche. Ces nouveaux éléments de recherche pourraient aider à affiner l'hypothèse causale de la dyscalculie, comme étant un déficit spécifique ou non du domaine arithmétique.

1.4 Perspectives de recherches

1.4.1 Perspective longitudinale de la dyscalculie

Dans notre étude, nous avons choisi une population ayant entre 8 et 13 ans. Ces deux limites d'âge paraissent en effet cruciales quant au développement des stratégies de résolution des petits faits arithmétiques, pour les raisons expliquées précédemment.

S'il apparait un effet significatif du biais pour les soustractions au sein de la population contrôle pour les participants de 12 à 13 ans, ce n'est pas le cas pour aucun des groupes d'âge dans la population dyscalculique. Ainsi, il semblerait que les dyscalculiques n'automatisent pas les procédures arithmétiques durant cette période développementale. Néanmoins, cette absence d'automatisation appelle deux conjectures : soit la dyscalculie entrave l'automatisation, à tel point que celle-ci est impossible dans le cadre de cette pathologie ; soit la dyscalculie entraine un retard du pattern développemental observé au sein du groupe contrôle et les dyscalculiques automatiseraient leurs procédures, mais à une période plus tardive de leur développement.

Ainsi, il se pose la question soit d'une déviance développementale dans le sens où l'étape est absente de la trajectoire du dyscalculique, soit d'un retard où seul le facteur chronologique est variant. Pour répondre à cette interrogation, il faudrait envisager une étude longitudinale, à la recherche d'une automatisation comparable à celle observée chez les participants contrôles mais décalée chronologiquement. Nous pourrions alors également rechercher les facteurs favorisant ou non l'apparition de cette automatisation malgré la pathologie.

1.4.2 Recherche de corrélats neurologiques

La présente étude se concentre sur des données exprimées en temps de réponses. Celles-ci sont des observations dites « comportementales ». Il serait intéressant, afin d'approfondir nos connaissances sur cette automatisation, de mener des études d'imagerie cérébrale chez des participants contrôles, afin de trouver des corrélats neuronaux à nos observations comportementales. En effet, nous pourrions envisager de rechercher des zones cérébrales activées spécifiquement avant ou après l'automatisation, et objectiver par-là l'utilisation efficiente des procédures. L'idéal serait par exemple d'aboutir à des patterns d'activation cérébrale différents avant et après l'automatisation des procédures, en utilisant la tranche d'âge de la présente étude. Nous pourrions ici, en qualité d'hypothèse uniquement, imaginer une activation de la région frontale en l'absence d'automatisation, qui disparaitrait ensuite avec l'apparition de cette automatisation.

La comparaison entre un groupe contrôle et un groupe dyscalculique peut également être pertinente dans ce type d'études d'imagerie mentale, car elles peuvent mettre en exergue des zones ayant des variations fonctionnelles et/ou structurelles, au sein du cerveau du participant dyscalculique, et ainsi expliquer de manière neuropsychologique les troubles comportementaux.

1.4.3 Entrainements visant l'automatisation

Une autre piste de réflexion pourrait être que face à ce déficit d'automatisation objectivé, nous pourrions envisager l'élaboration d'un protocole expérimental d'entrainement susceptible de provoquer l'apparition de l'automatisation des procédures chez les dyscalculiques.

En effet, des protocoles de ce type ont d'ores et déjà été conçus pour l'entrainement à la ligne numérique mentale (Siegler & Ramani, 2009; Wilson et al., 2006). Au moyen de pré-tests et de post-tests, il a été possible d'évaluer leur efficacité de manière significative, dans plusieurs types d'exercices. Kucian et al. (2011) ont proposé un entrainement nommé « Rescue Calcularis » et ainsi objectivé via IRMf les bénéfices de ce type de protocole, et ce même après un temps de latence post-test. Dans cette étude, les dyscalculiques montraient à la fois des progrès en termes de représentations mentales de nombres, mais également dans la résolution des faits arithmétiques. Ces conséquences indirectes sur les compétences en calcul nous laissent suggérer que ces entrainements pourraient avoir une incidence sur l'automatisation des procédures. En effet, pour que celle-ci se mette en place, elle pourrait nécessiter en amont des représentations mentales numériques stables et précises, ce qui ne serait pas le cas chez l'enfant dyscalculique. Ce type d'entrainement sur la ligne numérique mentale pourrait faciliter l'emergence de l'automatisation si celle-ci dépend effectivement de représentations précises.

Il serait envisageable de réaliser un entrainement de ce type tout en contrôlant en pré-test et en post-test si l'automatisation est apparue. Si un entrainement sur la ligne mentale numérique ainsi que sur les représentations mentales numériques n'apparait pas assez spécifique pour impacter de manière significative l'automatisation des procédures arithmétiques, nous pourrions envisager une tâche d'entrainement plus ciblée sur les procédures et le sens du signe arithmétique.

2 Implications cliniques en orthophonie

2.1 Le déficit d'automatisation des procédures : un potentiel élément qui participe au diagnostic de la dyscalculie

La présente étude que nous avons menée valide l'hypothèse initiale selon laquelle les enfants dyscalculiques présentent un déficit d'automatisation des procédures arithmétiques. Bien que les résultats ne soient significatifs que pour les soustractions, la tendance de nos résultats pour les additions semble aller dans le même sens : un plus grand nombre de participants dans la tranche d'âge 12-13 ans pourrait permettre de le vérifier (cf. partie II.1 de ce chapitre). Ainsi, le dysfonctionnement de l'automatisation des procédures arithmétiques pourrait se présenter comme un nouvel élément à prendre en compte dans le tableau clinique de la dyscalculie et donc dans l'évaluation et le diagnostic de cette pathologie.

Dans la droite lignée de cette réflexion, il serait pertinent d'envisager l'intégration de l'évaluation de cette automatisation lors du bilan orthophonique pour hypothèse de dyscalculie, par le biais de déplacements attentionnels le long de la ligne mentale. En effet, une tâche informatisée telle qu'elle est présentée dans ce protocole (présentation séquentielle des composantes du calcul) pourrait être envisagée, avec analyse automatique des temps de réponse en fonction des positions du second opérande et de l'âge du patient. Il faudrait alors envisager en amont l'élaboration d'une telle tâche tant sur le plan de la programmation que sur l'aspect ludique et pratique ainsi que procéder à son étalonnage sur une très large population d'enfants. Ainsi, le déficit d'automatisation des procédures arithmétiques dans les calculs simples pourrait devenir un élément, et par extension un argument, en faveur du diagnostic de dyscalculie.

2.2 Emergence retardée ou absence totale d'automatisation : vers un indice d'évolution de la dyscalculie.

Suite aux récents résultats en faveur du modèle procédural pour la résolution de faits arithmétiques simples, les résultats de la présente étude semblent montrer que les enfants dyscalculiques présentent un déficit de l'automatisation des procédures arithmétiques tandis que les enfants sans difficultés particulières pour les mathématiques montrent une automatisation de ces procédures, pour les soustractions.

Comme mentionné plus tôt dans ce document, Couderc et al. (*soumis*) semble tirer de ses résultats que les enfants commenceraient tout juste à automatiser les procédures arithmétiques pour les additions et les soustractions en classe de CM2. Notre étude faisant suite à cette étude ainsi que celle de Mathieu et al. (2016), le protocole a été sensiblement conservé d'une étude à l'autre. Comme nous l'analysions précédemment, nos résultats montrent une émergence d'automatisation des procédures arithmétiques des soustractions pour les enfants de 12-13 ans du groupe contrôle. Ceci irait donc en faveur de la suggestion émise dans Couderc et al. (*soumis*).

S'il s'avère correct que l'automatisation des procédures débute à cet âge pour une population contrôle qu'en est-il pour des enfants dyscalculiques ? Des éléments de recherches ont été abordés dans la partie 1.4.1 de ce chapitre quant à l'intérêt d'une étude longitudinale chez des enfants dyscalculiques. Dans d'éventuels futurs travaux de recherche, il pourrait être montré que l'automatisation des procédures arithmétiques chez les dyscalculiques est seulement retardée chronologiquement (apparition au de l'émergence de l'automatisation au-delà de 13 ans) ou que celle-ci est totalement absente dans le cadre de la pathologie. Dans ce dernier cas, alors la présence ou non de l'automatisation des procédures arithmétiques pourrait devenir un élément complémentaire en faveur de l'élaboration d'un diagnostic de dyscalculie. En cas de retard de l'automatisation, dû à la pathologie, situer le patient par rapport à l'âge d'automatisation chez la population contrôle permettrait aux orthophonistes d'évaluer le niveau de sévérité de l'atteinte des procédures : plus un enfant dépasse l'âge supposé d'apparition de l'automatisation, plus l'atteinte serait qualifiée de sévère.

De plus, savoir si l'enfant présente une absence totale d'automatisation ou bien un simple retard d'émergence de l'automatisation, permettrait d'objectiver une évolution du patient. Nous pourrions ainsi concevoir qu'une évaluation régulière du niveau d'automatisation ou simplement de sa présence ou non chez l'enfant dyscalculique, au fil de la prise en charge orthophonique, soit proposée pour « surveiller » une éventuellement évolution (positive ou négative).

2.3 Envisager l'émergence de l'automatisation comme objectif de rééducation orthophonique

Apprendre à compter, tout comme de nombreuses activités courantes (la conduite, utiliser un nouveau téléphone…) demande une période initiale de fort coût cognitif pour mener à bien une tâche. La tâche suscite à ce moment-là une grande capacité attentionnelle qui accroit le niveau de fatigue de l'exécutant. Lorsque le besoin attentionnel diminue et par extension, la fatigue également, nous parlons alors d'automatisation de la tâche.

Cette étude semble montrer une automatisation des procédures chez les enfants contrôles, pour les soustractions, tandis que les enfants dyscalculiques ne semblent pas avoir automatisé les procédures arithmétiques. Pour faire suite aux considérations de ce début de paragraphe, nous pouvons formuler le fait que les enfants dyscalculiques semblent subir une surcharge cognitive (un niveau de ressource attentionnelle sollicité et donc un niveau de fatigue) largement supérieure à celle des enfants contrôles qui eux, semblent se libérer progressivement de cette surcharge grâce à l'automatisation.

Cette conception de la mobilisation cognitive dans ce type de tâche justifierait alors que l'aboutissement à l'émergence de l'automatisation des procédures arithmétiques chez les enfants dyscalculiques devienne un objectif pertinent de la rééducation orthophonique. L'orthophoniste qui aurait diagnostiqué une dyscalculie pourrait avoir, entre autres, comme objectif de vouloir faire émerger l'automatisation qu'elle constate absente. Dans ce but il conviendrait d'utiliser un matériel informatisé de façon à pouvoir contrôler les différents paramètres qui interviennent dans l'automatisation des procédures arithmétiques.

Comme nous l'évoquions précédemment, la création d'un outil de diagnostic qui prendrait en compte cette automatisation des procédures arithmétiques dans la résolution de calculs simples permettrait d'évaluer l'utilité de l'entrainement et ainsi situer le patient sur une courbe d'évolution. De cette façon, l'orthophoniste pourrait adapter sa rééducation au niveau des différents paramètres (précision des représentations mentales numériques, linéarité de la ligne mentale numérique, sens du signe arithmétique…) afin de tendre vers l'émergence de l'automatisation des procédures. Pour augmenter la difficulté de la tâche au fur et à mesure de l'apprentissage de l'enfant, l'orthophoniste pourrait réduire le temps de réponse laissé à l'enfant ou augmenter les valeurs des deux opérandes mis en jeu dans le calcul.

Enfin, nous pourrions imaginer que la stratégie de récupération soit utilisée en rééducation à titre compensatoire : si les procédures arithmétiques ne s'automatisent pas en présence d'une dyscalculie, nous pourrions faire appel à la mémoire à long terme stockant des résultats les faits arithmétiques. Par exemple, il serait envisageable de mettre en place un apprentissage des tables d'additions et de soustractions, de la même manière que l'on apprend les tables de multiplication. Ainsi, la stratégie procédurale déficitaire pourrait être compensée par une stratégie de récupération efficiente.

CONCLUSION

Ce travail de recherche en cognition numérique repose sur les bases théoriques des modèles de résolution des faits arithmétiques. Il s'est inscrit dans la lignée des études sur les stratégies utilisées lors de cette résolution, en se positionnant dans une perspective développementale. Il veut soutenir la théorie de l'automatisation des procédures, en complétant les données actuelles qui remettent en cause le consensus de la récupération en mémoire des résultats des faits arithmétiques. Plus spécifiquement, il intègre aux données une nouvelle perspective neuropsychologique, en s'intéressant à la dyscalculie.

La question de recherche justifiant cette étude était la suivante : un déficit d'automatisation des procédures arithmétiques participerait-il au tableau dyscalculique ? Elle a été décomposée en deux objectifs de recherche : d'une part, montrer l'existence d'une automatisation des procédures arithmétiques chez les enfants du groupe contrôle et, d'autre part, montrer l'absence de cette automatisation chez les participants dyscalculiques. L'automatisation était objectivée par la présence d'un biais attentionnel, lors de la résolution de petits faits arithmétiques ayant une configuration spécifique (la position du deuxième opérande variant horizontalement). L'hypothèse principale proposait que les procédures arithmétiques reposant sur des déplacements rapides le long d'une ligne mentale numérique ne s'automatisent pas chez des participants dyscalculiques, au contraire des participants contrôles.

Les résultats obtenus grâce aux données recueillies lors des expérimentations montrent que les participants contrôles automatisent les procédures arithmétiques afin de résoudre les soustractions, à partir de 12 ou 13 ans. En revanche, aucune automatisation n'est observée de manière significative chez les dyscalculiques. Il n'a pas été observé d'automatisation non plus dans le cas de l'addition, pour les deux groupes. Ainsi, les objectifs de l'étude ont été partiellement atteints mais contribuent à enrichir la recherche à ce sujet, tout en ouvrant une perspective nouvelle de compréhension de la pathologie.

Ces nouvelles données peuvent aboutir à des considérations nouvelles, tant cliniques que théoriques, autour de la dyscalculie. La pratique orthophonique dans le domaine de la cognition mathématique pourrait développer des systèmes d'évaluation de l'automatisation des procédures arithmétiques afin d'intégrer cette notion au sein des bilans concernés. Egalement, la rééducation pourrait s'enrichir de cette information et ainsi viser l'automatisation des procédures arithmétiques, considérant cet indicateur mesurable objectivement comme étant une étape de l'évolution de la cognition mathématique. Dans le domaine de la recherche, les résultats de cette étude contribuent à enrichir les théories sur les stratégies de résolution des faits arithmétiques simples. Ils invitent également à entreprendre des travaux sur l'évolution de cette automatisation chez l'enfant dyscalculique. Effectivement, cette étude est particulièrement novatrice, dans le sens où elle amène les premières données combinant la dyscalculie et la résolution par procédure automatisée des faits arithmétiques. Par ailleurs, les conclusions de la présente étude incitent à explorer davantage cette hypothèse de l'automatisation, en cherchant des corrélats neuronaux par exemple, au sein d'une population contrôle, tout comme au sein d'une population dyscalculique. Cette perspective invite à éclaircir le tableau de la dyscalculie et affiner les hypothèses causales de cette pathologie.

REFERENCES

American Psychiatric Publishing. (2015). *DSM-5 - Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux*. Elsevier Masson.

Anderson, J. R. (1983). A spreading activation theory of memory. *Journal of Verbal Learning and Verbal Behavior*, *22*(3), 261-295.

Anderson, J. R., & Lebiere, C. J. (2014). *The Atomic Components of Thought*. Psychology Press.

Ansari, D. (2008). Effects of development and enculturation on number representation in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, *9*(4), 278-291.

Ashcraft, M. H. (1983). Procedural knowledge versus fact retrieval in mental arithmetic: A reply to Baroody. *Developmental Review*, *3*(2), 231-235.

Ashcraft, M. H. (1987). Children's Knowledge of Simple Arithmetic: A Developmental Model and Simulation. In J. Bisanz, C. J. Brainerd, & R. Kail (éd.), *Formal Methods in Developmental Psychology* (p. 302-338). Springer New York.

Ashcraft, M. H. (1992). Cognitive arithmetic: a review of data and theory. *Cognition*, *44*(1-2), 75-106.

Ashcraft, M. H. (1992). Numerical CognitionCognitive arithmetic: A review of data and theory. *Cognition*, *44*(1), 75-106.

Ashcraft, M. H., & Battaglia, J. (1978). Cognitive arithmetic: Evidence for retrieval and decision processes in mental addition. *Journal of Experimental Psychology: Human Learning and Memory*, *4*(5), 527-538.

Ashcraft, M. H., & Fierman, B. A. (1982). Mental addition in third, fourth, and sixth graders. *Journal of Experimental Child Psychology*, *33*(2), 216-234.

Ashcraft, M. H., & Guillaume, M. M. (2009). Chapter 4 Mathematical Cognition and the Problem Size Effect. In B.-P. of L. and Motivation (éd.), (Vol. 51, p. 121-151). Academic Press.

Ashkenazi, S., Rubinsten, O., & Henik, A. (2009). Attention, automaticity, and developmental dyscalculia. *Neuropsychology*, *23*(4), 535-540.

Badian, N. A. (1999). Persistent arithmetic, reading, or arithmetic and reading disability. *Annals of Dyslexia*, *49*(1), 43-70.

Baroody, A. J. (1983). The development of procedural knowledge: An alternative explanation for chronometric trends of mental arithmetic. *Developmental Review*, *3*(2), 225-230.

Baroody, A. J. (1984). A reexamination of mental arithmetic models and data: A reply to Ashcraft. *Developmental Review*, *4*(2), 148-156.

Baroody, A. J. (1987). *Children's mathematical thinking: A developmental framework for preschool, primary, and special education teachers* (Vol. xv). New York, NY, US: Teachers College Press.

Baroody, A. J. (1994). An evaluation of evidence supporting fact-retrieval models. *Learning and Individual Differences*, *6*(1), 1-36.

Baroody, A. J., & Ginsburg, H. P. (1986). The relationship between initial meaningful and mechanical knowledge of arithmetic. In *Conceptual and procedural knowledge: The case of mathematics* (p. 75-112). Hillsdale, NJ, England: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.

Barrouillet, P., & Fayol, M. (1998). From algorithmic computing to direct retrieval: Evidence from number and alphabetic arithmetic in children and adults. *Memory & Cognition*, *26*(2), 355-368.

Barrouillet, P., & Thevenot, C. (2013). On the problem-size effect in small additions: Can we really discard any counting-based account? *Cognition*, *128*(1), 35-44.

Berch, D. B., Foley, E. J., Hill, R. J., & Ryan, P. M. (1999). Extracting Parity and Magnitude from Arabic Numerals: Developmental Changes in Number Processing and Mental Representation. *Journal of Experimental Child Psychology*, *74*(4), 286-308.

Binet, & Simon. (1911). Échelle métrique de l'intelligence de Binet Simon, *18*(1), 228 - 326.

Bishop, D. V. M. (2010). Which Neurodevelopmental Disorders Get Researched and Why? *PLoS ONE*, *5*(11), e15112.

Booth, J. L., & Siegler, R. S. (2006). Developmental and individual differences in pure numerical estimation. *Developmental Psychology*, *42*(1), 189-201.

Bruner, J. S. (1961). The act of discovery. *Harvard Educational Review*, *31*, 21-32.

Bugden, S., Price, G. R., McLean, D. A., & Ansari, D. (2012). The role of the left intraparietal sulcus in the relationship between symbolic number processing and children's arithmetic competence. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *2*(4), 448-457.

Bull, R., & Scerif, G. (2001). Executive Functioning as a Predictor of Children's Mathematics Ability: Inhibition, Switching, and Working Memory. *Developmental Neuropsychology*, *19*(3), 273-293.

Butterworth, B. (2005). Developmental Dyscalculia. In *The Handbook of Mathematical Cognition* (p. 455-467). New York, NY, US: Taylor & Francis.

Butterworth, B., Varma, S., & Laurillard, D. (2011). Dyscalculia: From Brain to Education. *Science*, *332*(6033), 1049-1053.

Bynner, J., & Parsons, S. (1997). *Does Numeracy Matter? Evidence from the National Child Development Study on the Impact of Poor Numeracy on Adult Life.* Basic Skills Agency, Commonwealth House, 1-19 New Oxford Street, London WC1A 1NU, England, United Kingdom (6.50 British pounds).

Campbell, J. I. (1987a). Network interference and mental multiplication. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *13*(1), 109-123.

Campbell, J. I. D. (1987b). Production, verification, and priming of multiplication facts. *Memory & Cognition*, *15*(4), 349-364.

Campbell, J. I. D. (1991). Conditions of error priming in number-fact retrieval. *Memory & Cognition*, *19*(2), 197-209.

Campbell, J. I. D., & Oliphant, M. (1992). Chapter 9 Representation And Retrieval Of Arithmetic Facts: A Network-Interference Model And Simulation. In J. I. D. Campbell (éd.), *Advances in Psychology*(Vol. 91, p. 331-364). North-Holland.

Campbell, J. I., & Graham, D. J. (1985). Mental multiplication skill: Structure, process, and acquisition. *Canadian Journal of Psychology/Revue canadienne de psychologie*, *39*(2), 338-366.

Campbell, J. I., & Xue, Q. (2001). Cognitive arithmetic across cultures. *Journal of Experimental Psychology: General*, *130*(2), 299-315.

Campolini, C., Timmermans, A., & Vansteelandt, A. (2002). *Dictionnaire de logopédie: La construction du nombre. IV*. Peeters Publishers.

Carpenter, T. P., Hiebert, J., & Moser, J. M. (1983). The effect of instruction on children's solutions of addition and subtraction word problems. *Educational Studies in Mathematics*, *14*(1), 55-72.

Carr, M., & Jessup, D. L. (1995). Cognitive and metacognitive predictors of mathematics strategy use. *Learning and Individual Differences*, *7*(3), 235-247.

Cho, S., Ryali, S., Geary, D. C., & Menon, V. (2011). How does a child solve 7 + 8? Decoding brain activity patterns associated with counting and retrieval strategies. *Developmental Science*, *14*(5), 989-1001.

Cipolotti, L., & van Harskamp, N. J. (2001). Disturbances of number processing and calculation. In R. S. Berndt (éd.), *Handbook of neuropsychology. Volume 3: Language and aphasia* (p. 305-331). Amsterdam: Elsevier Science Ltd.

Cognet, G. (2006). *Nemi 2* ECPA : Montreuil.

Cohen, L., & Dehaene, S. (2000). Calculating Without Reading: Unsuspected Residual Abilities in Pure Alexia. *Cognitive Neuropsychology*, *17*(6), 563-583. http://doi.org/10.1080/02643290050110656

DCSF. (s. d.). Special Education Needs: Code of Practice.

Dehaene, S. (2010). *Bosse des maths (La): Quinze ans après*. Odile Jacob.

Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, *122*(3), 371-396.

Dehaene, S., & Cohen, L. (1997). Cerebral Pathways for Calculation: Double Dissociation between Rote Verbal and Quantitative Knowledge of Arithmetic. *Cortex*, *33*(2), 219-250.

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.

Dewey, J. (1938). *Experience and education*. New York: Macmillan.

Dirks, E., Spyer, G., Lieshout, E. C. D. M. van, & Sonneville, L. de. (2008). Prevalence of Combined Reading and Arithmetic Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, *41*(5), 460-473.

Ericsson, K. A., & Simon, H. A. (1980). Verbal reports as data. *Psychological Review*, *87*(3), 215-251.

Espy, K. A., McDiarmid, M. M., Cwik, M. F., Stalets, M. M., Hamby, A., & Senn, T. E. (2004). The Contribution of Executive Functions to Emergent Mathematic Skills in Preschool Children. *Developmental Neuropsychology*, *26*(1), 465-486.

Fanget, M. (2010, septembre 29). *Les stratégies de résolution d'opérations arithmétiques simples. Un nouveau paradigme* (phdthesis). Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II.

Fayol, M. (2012). *L'acquisition du nombre*. Paris, France : Presses Universitaires de France - PUF

Fayol, M., & Thevenot, C. (2012). The use of procedural knowledge in simple addition and subtraction problems. *Cognition*, *123*(3), 392-403.

Fischer, M. H., Castel, A. D., Dodd, M. D., & Pratt, J. (2003). Perceiving numbers causes spatial shifts of attention. *Nature Neuroscience*, *6*(6), 555-556.

Forster, K. I., & Forster, J. C. (2003). DMDX: a windows display program with millisecond accuracy. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers: A Journal of the Psychonomic Society, Inc*,*35*(1), 116-124.

Fuson, K. C., Richards, J., & Briars, D. J. (1982). The Acquisition and Elaboration of the Number Word Sequence. In C. J. Brainerd (éd.), *Children's Logical and Mathematical Cognition* (p. 33-92). Springer New York.

Geary, D. C. (1994). *Children's mathematical development: Research and practical applications* (Vol. xv). Washington, DC, US: American Psychological Association.

Geary, D. C., & Brown, S. C. (1991). Cognitive Addition : a short longitudinal study of strategy choice and speed-of-processing differences in normal and mathematically disabled children. *Developmental Psychology*, *27*(5), 787-797.

Geary, D. C., & Burlingham-Dubree, M. (1989). External validation of the strategy choice model for addition. *Journal of Experimental Child Psychology*, *47*(2), 175-192.

Geary, D. C., Hoard, M. K., Byrd-Craven, J., & DeSoto, M. C. (2004). Strategy choices in simple and complex addition: Contributions of working memory and counting knowledge for children with mathematical disability. *Journal of Experimental Child Psychology*, *88*(2), 121-151.

Geary, D. C., Widaman, K. F., Little, T. D., & Cormier, P. (1987). Cognitive Addition : Comparison of Learning Disabled and Academically Normal Elementary School Children. *Cognitive Development*, *2*, 249-269.

Gerber, P. J. (2012). The Impact of Learning Disabilities on Adulthood A Review of the Evidenced-Based Literature for Research and Practice in Adult Education. *Journal of Learning Disabilities*, *45*(1), 31-46.

Groen, G. J., & Parkman, J. M. (1972). A chronometric analysis of simple addition. *Psychological Review*, *79*(4), 329-343.

Gross, J., Hudson, C., & Price, D. (2009). The Long Term Costs of Numeracy Difficulties. Every Child a Chance Trust and KPMG, London.

Gross-Tsur, V., Manor, O., & Shalev, R. S. (1996). Developmental Dyscalculia: Prevalence and Demographic Features. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *38*(1), 25-33.

Jackson, N., & Coney, J. (2005). Simple arithmetic processing: The question of automaticity. *Acta Psychologica*, *119*(1), 41-66. http://doi.org/10.1016/j.actpsy.2004.10.018

Kaufmann, E. L., & Lord, M. W. (1949). The discrimination of visual number. *The American Journal of Psychology*, *62*(4), 498-525.

Kaufmann, L., Mazzocco, M. M., Dowker, A., von Aster, M., Göbel, S. M., Grabner, R. H., Nuerk, H.-C. (2013). Dyscalculia from a developmental and differential perspective. *Frontiers in Psychology*, *4*.

Kirk, E. P., & Ashcraft, M. H. (2001). Telling stories: The perils and promise of using verbal reports to study math strategies. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *27*(1), 157-175.

Krinzinger, H., & Kaufmann, L. (2006). Rechenangst und Rechenleistung. *Sprache · Stimme · Gehör*, *30*(04), 160-164.

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), 782-795.

Kucian, K., Loenneker, T., Dietrich, T., Dosch, M., Martin, E., & von Aster, M. (2006). Impaired neural networks for approximate calculation in dyscalculic children: a functional MRI study. *Behavioral and Brain Functions*, *2*, 31.

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.

Landerl, K., & Moll, K. (2010). Comorbidity of learning disorders: prevalence and familial transmission. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *51*(3), 287-294.

LeFevre, J.-A., DeStefano, D., Penner-Wilger, M., & Daley, K. E. (2006). Selection of procedures in mental subtraction. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue canadienne de psychologie expérimentale*, *60*(3), 209-220.

LeFevre, J.-A., Sadesky, G. S., & Bisanz, J. (1996). Selection of procedures in mental addition: Reassessing the problem size effect in adults. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *22*(1), 216-230.

Lemaire, P., Barrett, S. E., Fayol, M., & Abdi, H. (1994). Automatic Activation of Addition and Multiplication Facts in Elementary School Children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *57*(2), 224-258.

Lépine, R., Roussel, J.-L., & Fayol, M. (2003). Résolution procédurale ou récupération en mémoire des additions et multiplications élémentaires chez les enfants ? *L'année psychologique*, *103*(1), 51-80.

Lewis, C., Hitch, G. J., & Walker, P. (1994). The Prevalence of Specific Arithmetic Difficulties and Specific Reading Difficulties in 9- to 10-year-old Boys and Girls. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *35*(2), 283-292.

Logan, G. D., & Klapp, S. T. (1991). Automatizing alphabet arithmetic: I. Is extended practice necessary to produce automaticity? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*,*17*(2), 179-195.

Mathieu, R., Gourjon, A., Couderc, A., Thevenot, C., & Prado, J. (2016). Running the number line: Rapid shifts of attention in single-digit arithmetic. *Cognition*, *146*, 229-239.

McCrink, K., & Wynn, K. (2009). Operational momentum in large-number addition and subtraction by 9-month-olds. *Journal of Experimental Child Psychology*, *103*(4), 400-408.

McLean, J. F., & Hitch, G. J. (1999). Working Memory Impairments in Children with Specific Arithmetic Learning Difficulties. *Journal of Experimental Child Psychology*, *74*(3), 240-260.

Misès, R., Bursztejn, C., Botbol, M., Coincon, Y., Durand, B., Garrabe, J., Thevenot, J.-P. (2012). Une nouvelle version de la classification française des troubles mentaux de l'enfant et de l'adolescent : la CFTMEA R 2012, correspondances et transcodages avec l'ICD 10. *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*, *60*(6), 414-418. http://doi.org/10.1016/j.neurenf.2012.05.578

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.

Monuteaux, M. C., Faraone, S. V., Herzig, K., Navsaria, N., & Biederman, J. (2005). ADHD and Dyscalculia Evidence for Independent Familial Transmission. *Journal of Learning Disabilities*, *38*(1), 86-93.

Morsanyi, K., Devine, A., Nobes, A., & Szűcs, D. (2013). The link between logic, mathematics and imagination: evidence from children with developmental dyscalculia and mathematically gifted children.*Developmental Science*, *16*(4), 542-553.

Mussolin, C., Mejias, S., & Noël, M.-P. (2010). Symbolic and nonsymbolic number comparison in children with and without dyscalculia. *Cognition*, *115*(1), 10-25.

Newell, A., & Simon, H. A. (1972). *Human problem solving*. Prentice-Hall.

Nieder, A., & Dehaene, S. (2009). Representation of Number in the Brain. *Annual Review of Neuroscience*, *32*(1), 185-208.

Noël, M.-P. (2005). *La dyscalculie: Trouble du développement numérique de l'enfant*. Groupe de Boeck.

Organisation mondiale de la santé. (1993). *Classification internationale des maladies, dixième révision: CIM-10/ICD-10*. Genève: Elsevier Masson.

Ostad, S. A. (1998). Developmental Differences in Solving Simple Arithmetic Word Problems and Simple Number-fact Problems: A Comparison of Mathematically Normal and Mathematically Disabled Children. *Mathematical Cognition*, *4*(1), 1-19.

Parkman, J. M. (1972). Temporal aspects of simple multiplication and comparison. *Journal of Experimental Psychology*, *95*(2), 437-444.

Parsons, S., & Bynner, J. (2005). *Does Numeracy matter more ?* London: National Research and Development Centre for Adult Literacy and Numeracy, Institute of Education, London.

Piazza, M., Facoetti, A., Trussardi, A. N., Berteletti, I., Conte, S., Lucangeli, D., Zorzi, M. (2010). Developmental trajectory of number acuity reveals a severe impairment in developmental dyscalculia.*Cognition*, *116*(1), 33-41.

Price, G. R., Holloway, I., Räsänen, P., Vesterinen, M., & Ansari, D. (2007). Impaired parietal magnitude processing in developmental dyscalculia. *Current Biology*, *17*(24), R1042-R1043.

Ranzini, M., Dehaene, S., Piazza, M., & Hubbard, E. M. (2009). Neural mechanisms of attentional shifts due to irrelevant spatial and numerical cues. *Neuropsychologia*, *47*(12), 2615-2624.

Rosselli, M., Matute, E., Pinto, N., & Ardila, A. (2006). Memory Abilities in Children With Subtypes of Dyscalculia. *Developmental Neuropsychology*, *30*(3), 801-818.

Rotzer, S., Kucian, K., Martin, E., Aster, M. von, Klaver, P., & Loenneker, T. (2008). Optimized voxel-based morphometry in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage*, *39*(1), 417-422.

Rotzer, S., Loenneker, T., Kucian, K., Martin, E., Klaver, P., & von Aster, M. (2009). Dysfunctional neural network of spatial working memory contributes to developmental dyscalculia. *Neuropsychologia*,*47*(13), 2859-2865.

Rubinsten, O. (2009). Co-occurrence of developmental disorders: The case of Developmental Dyscalculia. *Cognitive Development*, *24*(4), 362-370. http://doi.org/10.1016/j.cogdev.2009.09.008

Rubinsten, O. (2015). Link between cognitive neuroscience and education: the case of clinical assessment of developmental dyscalculia. *Frontiers in Human Neuroscience*, 304.

Rubinsten, O., Bedard, A.-C., & Tannock, R. (2008). Methylphenidate improves general but not core numerical abilities in ADHD children with co-morbid dyscalculia or mathematical difficulties.

Rubinsten, O., & Tannock, R. (2010). Mathematics anxiety in children with developmental dyscalculia. *Behavioral and Brain Functions*, *6*, 46. http://doi.org/10.1186/1744-9081-6-46

Rugani, R., Vallortigara, G., Priftis, K., & Regolin, L. (2015). Number-space mapping in the newborn chick resembles humans' mental number line. *Science*, *347*(6221), 534-536.

Rykhlevskaia, E., Uddin, L. Q., Kondos, L., Menon, V., Rykhlevskaia, E., Uddin, L. Q., … Menon, V. (2009). Neuroanatomical correlates of developmental dyscalculia: combined evidence from morphometry and tractography. *Frontiers in Human Neuroscience*, *3*, 51.

Santens, S., & Gevers, W. (2008). The SNARC effect does not imply a mental number line. *Cognition*, *108*(1), 263-270.

Seyler, D. J., Kirk, E. P., & Ashcraft, M. H. (2003). Elementary Subtraction. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *29*(6), 1339-1352.

Shaki, S., Fischer, M. H., & Petrusic, W. M. (2009). Reading habits for both words and numbers contribute to the SNARC effect. *Psychonomic Bulletin & Review*, *16*(2), 328-331.

Shalev, R. S., Manor, O., & Gross-Tsur, V. (2005). Developmental dyscalculia: a prospective six-year follow-up. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *null*(02), 121–125.

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.

Siegler, R., & Jenkins, E. A. (2014). *How Children Discover New Strategies*. Psychology Press.

Siegler, R. S. (1987). The perils of averaging data over strategies: An example from children’s addition. *Journal of Experimental Psychology: General*, *116*(3), 250-264.

Siegler, R. S. (1988a). Individual Differences in Strategy Choices: Good Students, Not-So-Good Students, and Perfectionists. *Child Development*, *59*(4), 833-851.

Siegler, R. S. (1988b). Strategy choice procedures and the development of multiplication skill. *Journal of Experimental Psychology: General*, *117*(3), 258-275.

Siegler, R. S. (1989). Hazards of mental chronometry: An example from children’s subtraction. *Journal of Educational Psychology*, *81*(4), 497-506.

Siegler, R. S. (1996). *Emerging Minds:The Process of Change in Children’s Thinking*. Oxford University Press, USA.

Siegler, R. S., & Booth, J. L. (2004). Development of Numerical Estimation in Young Children. *Child Development*, *75*(2), 428-444.

Siegler, R. S., & Crowley, K. (1994a). Constraints On Learning in Nonprivileged Domains. *Cognitive Psychology*, *27*(2), 194-226.

Siegler, R. S., & Crowley, K. (1994b). Constraints On Learning in Nonprivileged Domains. *Cognitive Psychology*, *27*(2), 194-226.

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.

Siegler, R. S., & Ramani, G. (2009). Playing Linear Number Board Games Improves Children’s Mathematical Knowledge. *Society for Research on Educational Effectiveness*.

Siegler, R. S., & Shipley, C. (1995). *Variation, Selection and Cognitive Change* (T. Simon and G. Halford (Eds.)). Hillsdale, NJ : Erlbaum.

Siegler, R. S., & Shrager, J. (1984). Strategy choices in addition and subtraction: How do children know what to do? In C. *Origins of Cognitive Skills,*.

Sluis, S. van der, Leij, A. van der, & Jong, P. F. de. (2005). Working Memory in Dutch Children with Reading- and Arithmetic-Related LD. *Journal of Learning Disabilities*, *38*(3), 207-221.

Stazyk, E. H., Ashcraft, M. H., & Hamann, M. S. (1982). A network approach to mental multiplication. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *8*(4), 320-335.

Svenson, O., & Broquist, S. (1975). Strategies for solving simple addition problems: A comparison of normal and subnormal children. *Scandinavian Journal of Psychology*, *16*(1), 143-148.

Thevenot, C., & Barrouillet, P. (2006). Encoding numbers: Behavioral evidence for processing-specific representations. *Memory & Cognition*, *34*(4), 938-948.

Van Galen, M. S., & Reitsma, P. (2008). Developing access to number magnitude: A study of the SNARC effect in 7- to 9-year-olds. *Journal of Experimental Child Psychology*, *101*(2), 99-113.

Vedi, K., & Bernard, S. (2012). The mental health needs of children and adolescents with learning disabilities. *Current Opinion in Psychiatry*, *25*(5), 353-358.

Von Aster, M., & Dellatolas, G. (2006). *ZAREKI-R* (Editions du Centre de Psychologie Appliquée). Montreuil.

von Aster, M. G., & Shalev, R. S. (2007). Number development and developmental dyscalculia. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *49*(11), 868-873.

Widaman, K. F., & Little, T. D. (1992). Chapter 6 The Development Of Skill In Mental Arithmetic: An Individual Differences Perspective. In J. I. D. Campbell (éd.), *Advances in Psychology* (Vol. 91, p. 189-253). North-Holland. Consulté à l'adresse

Wilson, A. J., Dehaene, S., Pinel, P., Revkin, S. K., Cohen, L., & Cohen, D. (2006). Principles underlying the design of « The Number Race », an adaptive computer game for remediation of dyscalculia.*Behavioral and Brain Functions*, *2*, 19.

Winkelman, J. H., & Schmidt, J. (1974). Associative confusions in mental arithmetic. *Journal of Experimental Psychology*, *102*(4), 734-736.

Woodcock, R. W., McGrew, K. S., & Mather, N. (2007). *Woodcock-Johnson III : Tests of Cognitive Abilities*. Rolling Meadows, IL: Riverside Publishing.

Wu, S. S., Meyer, M. L., Maeda, U., Salimpoor, V., Tomiyama, S., Geary, D. C., & Menon, V. (2008). Standardized assessment of strategy use and working memory in early mental arithmetic performance.*Developmental Neuropsychology*, *33*(3), 365-393.

Zamarian, L., Ischebeck, A., & Delazer, M. (2009). Neuroscience of learning arithmetic—Evidence from brain imaging studies. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, *33*(6), 909-925.

Zazzo, R., Gilly, R., & Verba-Rad, M. (1966). *NEMI*. Paris : Armand Colin

Zbrodoff, J. N., & Logan, G. D. (1986). On the autonomy of mental processes: A case study of arithmetic. *Journal of Experimental Psychology: General*, *115*(2), 118-130.

Zbrodoff, N. J. (1995). Why is 9+7 harder than 2+3? Strength and interference as explanations of the problem-size effect. *Memory & Cognition*, *23*(6), 689-700.

ANNEXES

Annexe I : Etudes internationales de prévalences

Tableau 6 : Présentation des résultats d'études de prévalences de la dyscalculie

	Âge (années)	**Critère quantitatif**	**Dyscalculiques (%)**
Badian (1999, USA)	7-8	20ème percentile	3,9
Dirks et al. (2008, Allemagne)	8	10ème percentile	5,6
		25ème percentile	10,3
Jovanic et al. (2013, Serbie)	9-10	1,5 DS	9,9
Lewis, Hitch, Walker (1994, Royaume-Uni)	9-10	<85 trouble	1,3
Share, Moffitt, Silva (1988)	11-13	Entre 30ème et 40ème percentile	7,7
Ostad (1998, Norvège)	8-13	50ème percentile de classe 1	6,3

Annexe II : IRM cérébral

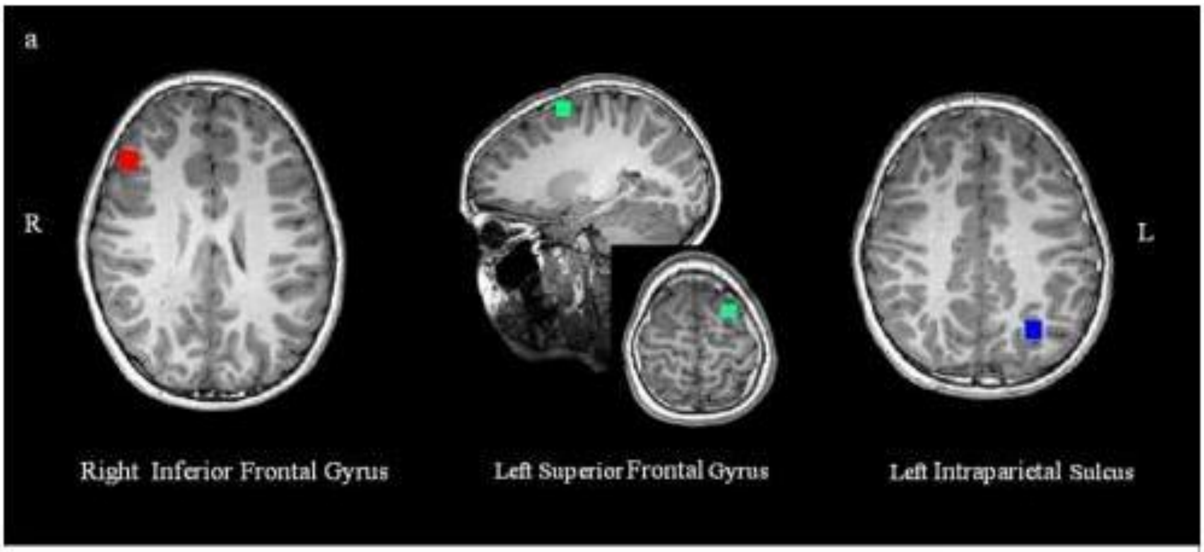


Figure 20 : Trois zones d'activation principales associées au traitement du nombre, chez les enfants de 8 à 9 ans (extraite de Bugden et al. 2012)

Annexe III : Dyscalculie et dysfonctionnement pariétal

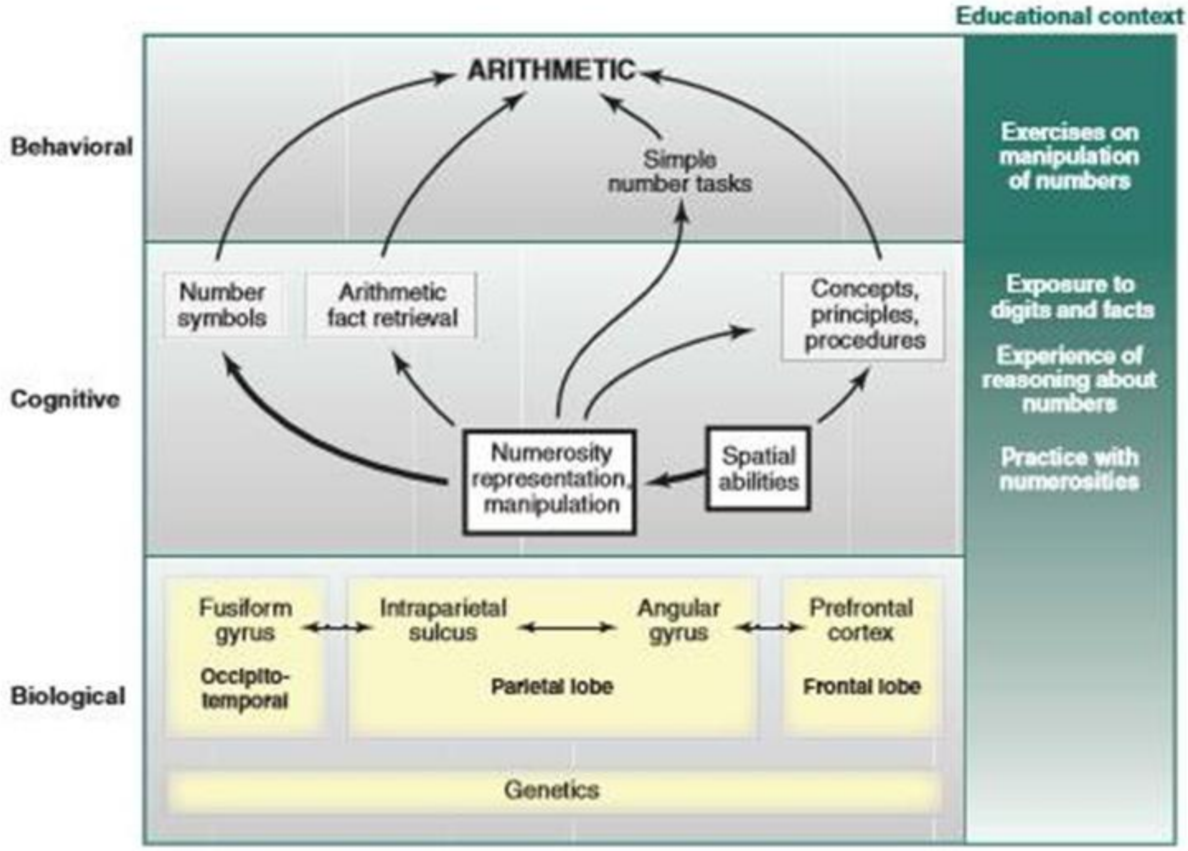


Fig. 1. Causal model of possible inter-relations between biological, cognitive, and simple behavioral levels. Here, the only environmental factors we address are educational. If parietal areas, especially the IPS, fail to develop normally, there will be an impairment at the cognitive level in numerosity representation and consequential impairments for other relevant cognitive systems revealed in behavioral abnormalities. The link between the occipitotemporal and parietal cortex is required for mapping number symbols (digits and number words) to numerosity representations. Prefrontal cortex supports learning new facts and procedures. The multiple levels of the theory suggest the instructional interventions on which educational scientists should focus.

Figure 21 : Hypothèses d'inter-relations, par Butterworth et al. (2011), entre les niveaux biologique, cognitif et comportemental d'un individu, dans la dyscalculie

Annexe IV : Plaquettes d'information pour les familles

1. Les participants du groupe contrôle

					1		4	
	2	9		8				5
	4	8			7	6		9
			3	2		5	8	
		3	8	7	5	1		
	8	5		1	4			
9		2	5			8	6	
8				6		3	9	
	7		1					

	8		4	3				
		3	8	6			4	2
		6	1				9	
	4			9		7		8
	6	8	2		3	9	5	
2		9		4			3	
	1				5	4		
9	2			7	1	3		
				8	4		7	

« Chaque fois que je vois le nombre 1, j'ai envie de l'aider à s'échapper… Il a constamment à ses trousses, derrière, le zéro qui veut le rattraper et devant, toute la mafia des grands nombres qui le guettent»

- Romain Gary

Comment participer ?

Vous pouvez nous contacter directement aux coordonnées ci-dessous.

Nous fixerons ensemble le rendez-vous qui vous convient le mieux.

Post-it pour vos notes :

Mathilde VIEUX
Tel: + 33 6 78 77 72 54
Lucie COMBE
Tel: + 33 6 45 42 43 71
Mail: memoireortho-lm@hotmail.com

L2C2 - CNRS
Institut des Sciences Cognitives
67, Bd Pinel
69675 BRON CEDEX
Tel: + 33 4 37 91 12 64
Site: http://www.jeromepradolab.com

AUTOMATISATION DES PROCÉDURES ARITHMÉTIQUES

Mémoire de recherche en orthophonie
Lucie Combe & Mathilde Vieux

Notre objectif:

Avoir une meilleure compréhension du trouble de la dyscalculie: origine, fonctionnement cérébral...

Le but de ce projet est de tester l'hypothèse selon laquelle les difficultés d'apprentissage de l'arithmétique chez les enfants dyscalculiques pourraient résulter d'un déficit de l'automatisation des procédures de déplacements attentionnels lors de l'apprentissage de l'arithmétique.

Perspectives:

Ces résultats pourraient être par la suite utiles pour le diagnostic et la prise en charge des personnes dyscalculiques.

En effet, une meilleure connaissance du trouble permettrait d'adapter le matériel de rééducation ainsi que le projet thérapeutique pour mieux cibler les déficits principaux et les stratégies à adopter.

Nous recherchons des participants:

La recherche scientifique avance chaque jour grâce à l'investissement de participants volontaires observant des critères spécifiques à l'expérimentation.

Aujourd'hui, vous êtes peut-être en mesure de nous aider à faire avancer la recherche en neurosciences.

Mon enfant peut participer si:

- 8 à 14 ans
- De langue maternelle française

Mon enfant ne peut pas participer si:

- Il a été ou est suivi en orthophonie
- Troubles neurologiques acquis
- Troubles psychiatriques
- Insuffisance visuelle non corrigée
- Troubles de l'attention (TDAH)
- Dysphasie

Pourquoi Vous ?

Nous recherchons des enfants **tout-venants** pour comparer leur résultat à ceux d'un groupe d'enfants ayant des troubles logico-mathématiques.

Déroulement & Organisation

L'expérience:

L'ensemble des épreuves durera environ 1h30. Votre enfant passera 3 petits tests de calculs simples puis un exercice de calcul mental sur ordinateur. Il devra fixer l'écran et des opérations très simples (additions et soustractions) seront affichées. Il donnera alors sa réponse qui sera enregistrée dans l'ordinateur.

Lieu :

En fonction de vos disponibilités. Nous pourrons faire passer l'épreuve à votre domicile (sous réserve de conditions pour le bon déroulement) ou au laboratoire de recherche à Bron *… A discuter selon vos possibilités.

Informations complémentaires

Toutes les épreuves ainsi que les résultats sont **ANONYMES**. Soyez assuré de l'anonymat le plus strict dans cette étude.

* Le CNRS s'engage à défrayer vos dépenses dues à votre participation si votre enfant passe l'expérience au laboratoire de recherche à Bron.

Une petite surprise suivra toute participation…!

2. Les participants du groupe dyscalculique

					1		4	
	2	9		8				5
	4	8			7	6		9
			3	2		5	8	
		3	8	7	5	1		
	8	5		1	4			
9		2	5			8	6	
8				6		3	9	
	7		1					

	8		4	3				
		3	8	6			4	2
		6	1				9	
	4			9		7		8
	6	8	2		3	9	5	
2		9		4			3	
	1				5	4		
9	2			7	1	3		
				8	4		7	

« Chaque fois que je vois le nombre 1, j'ai envie de l'aider à s'échapper… Il a constamment à ses trousses, derrière, le zéro qui veut le rattraper et devant, toute la mafia des grands nombres qui le guettent»

- Romain Gary

Comment participer ?

Vous pouvez contacter votre orthophoniste qui fera le lien avec nous ou nous joindre directement aux coordonnées ci-dessous.

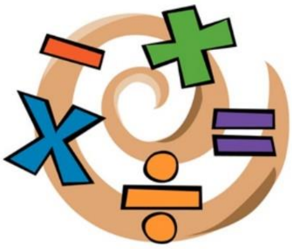
Post-it de votre orthophoniste:

Mathilde VIEUX
Tel: + 33 6 78 77 72 54
Lucie COMBE
Tel: + 33 6 45 42 43 71
mail: memoireortho-lm@hotmail.com

L2C2 - CNRS
Institut des Sciences Cognitives
67, Bd Pinel
69675 BRON CEDEX
Tel: + 33 4 37 91 12 64
Site: http://www.jeromepradolab.com

AUTOMATISATION DES PROCÉDURES ARITHMÉTIQUES DANS LA DYSCALCULIE

Mémoire de recherche en orthophonie
Lucie Combe & Mathilde Vieux



Notre objectif:

Avoir une meilleure compréhension du trouble de la dyscalculie: origine, fonctionnement cérébral...

Le but de ce projet est de tester l'hypothèse selon laquelle les difficultés d'apprentissage de l'arithmétique chez les enfants dyscalculiques pourraient résulter d'un déficit de l'automatisation des procédures de déplacements attentionnels lors de l'apprentissage de l'arithmétique.

Perspectives:

Ces résultats pourraient être par la suite utiles pour le diagnostic et la prise en charge des personnes dyscalculiques.

En effet, une meilleure connaissance du trouble permettrait d'adapter le matériel de rééducation ainsi que le projet thérapeutique pour mieux cibler les déficits principaux et les stratégies à adopter.

Nous recherchons des participants:

La recherche scientifique avance chaque jour grâce à l'investissement de participants volontaires observant des critères spécifiques à l'expérimentation.

Aujourd'hui, vous êtes peut-être en mesure de nous aider à faire avancer la recherche en neurosciences.

Mon enfant peut participer si:

- 8 à 14 ans
- De langue maternelle française
- Avec suivi orthophonique pour difficultés mathématiques

Mon enfant ne peut pas participer si:

- Troubles neurologiques acquis
- Troubles psychiatriques
- Insuffisance visuelle non corrigée
- Troubles de l'attention (TDAH)
- Dysphasie

Déroulement & Organisation

L'expérience:

L'ensemble des épreuves durera environ 1h15. Votre enfant passera 3 petits tests de calculs simples puis un exercice de calcul mental sur ordinateur. Il devra fixer l'écran et des opérations très simples (additions et soustractions) seront affichées. Il donnera alors sa réponse qui sera enregistrée dans l'ordinateur.

Lieu :

En fonction de vos disponibilités. Nous pourrons faire passer l'épreuve au cabinet de l'orthophoniste qui suit votre enfant, ou nous pourrons venir à domicile (sous réserve de conditions pour le bon déroulement) ou au laboratoire de recherche à Bron *… A discuter selon vos possibilités.

Informations complémentaires

Toutes les épreuves ainsi que les résultats sont **ANONYMES**. Soyez assuré de l'anonymat le plus strict dans cette étude.
* Le CNRS s'engage à défrayer vos dépenses dues à votre participation si votre enfant passe l'expérience au laboratoire de recherche à Bron.

Une petite surprise suivra toute participation…!

Annexe V : Lettre d'information à destination des orthophonistes

Automatisation des procédures arithmétiques dans la dyscalculie

Mémoire de recherche en orthophonie
Mathilde Vieux & Lucie Combe

Naissance de l'idée de recherche

L'apprentissage de l'arithmétique élémentaire constitue une étape essentielle dans la compréhension des mathématiques. Pour cette raison, de nombreuses études ont exploré les stratégies mises en jeu dans la résolution de problèmes arithmétiques simples à un chiffre (e.g., 3+2, 5-2). Il a ainsi été établi que pour résoudre des opérations simples, les adultes disposent de deux grands types de stratégies : soit ils récupèrent directement le résultat en mémoire à long terme (5+3 ⇒ 8), soit ils utilisent des procédures de calcul comme le comptage ou la décomposition (5+3 = 5+1+1+1 = 8). Dans la littérature, il a longtemps été admis que l'apprentissage de l'arithmétique élémentaire s'accompagne d'une diminution de l'utilisation de procédures de calcul et d'une augmentation d'utilisation de stratégies de récupération en mémoire.

Cependant, une étude comportementale de ***Fayol et Thevenot*** (2012) est venue fragiliser ce consensus, suggérant que les adultes utiliseraient toujours des procédures de calcul pour résoudre des additions et soustractions simples, mais que ces procédures seraient automatisées. Leur expérience consistait à présenter des additions, soustractions et multiplications à des participants adultes. Dans la moitié des essais, le signe arithmétique était présenté 150 ms avant les opérandes. Les résultats montrent que lorsque le signe apparaissait 150ms avant les opérandes, les participants résolvaient les opérations plus rapidement que lorsque le signe et les opérandes apparaissaient simultanément (effet d'amorçage). Plus spécifiquement, cet effet facilitateur a été observé pour l'addition et la soustraction, mais non pour la multiplication. Ce résultat suggère donc que la simple présentation du signe arithmétique de l'addition (« + ») et de la soustraction (« -») pourrait pré-activer des procédures de calcul automatisées qui seraient ensuite utilisées pour résoudre le problème. De telles procédures ne semblent pas être déclenchées par un signe multiplicatif, conformément à l'idée que la multiplication s'appuierait bien sur des stratégies de récupération en mémoire à long terme.

Mathieu et collègues (en préparation) ont récemment montré que les procédures arithmétiques automatisées suggérées par Fayol et Thevenot pourraient être des déplacements attentionnels rapides le long d'une séquence ordonnée de nombres. Pour démontrer cela, les auteurs ont présenté aux participants des problèmes apparaissant de manière séquentielle à l'écran. Le premier opérande était présenté d'abord au centre de l'écran, puis cela était suivi par le signe arithmétique (soustraction ou addition). Le deuxième opérande apparaissait ensuite à droite ou à gauche. Les participants résolvaient plus facilement les additions lorsque le deuxième opérande apparaissait à droite. Au contraire, les participants résolvaient plus facilement les soustractions lorsque le deuxième opérande apparaissait à gauche. Ceci suggère que les adultes pourraient utiliser des stratégies reposant sur des déplacements attentionnels vers la droite d'une ligne mentale numérique pour résoudre des additions et vers la gauche pour résoudre des soustractions. Il est donc possible que l'apprentissage de l'arithmétique élémentaire à l'école repose sur une automatisation de ces déplacements attentionnels.

Nos objectifs

Le but de ce projet est de tester l'hypothèse que les difficultés d'apprentissage de l'arithmétique chez les enfants dyscalculiques pourraient résulter d'un déficit de l'automatisation des procédures de déplacements attentionnels lors de l'apprentissage de l'arithmétique. Ces résultats pourraient être par la suite utiles pour le diagnostic et la prise en charge des patients dyscalculiques. En effet, une meilleure connaissance du trouble permettrait d'adapter le matériel de rééducation ainsi que le projet thérapeutique pour mieux cibler les déficits principaux et les stratégies à adopter.

Tests utilisés et expérimentation

Partie 1 :

3 tests différents qui nous permettront d'apparier les groupes de participants (contrôle et dyscalculique) en terme de QI et de calcul (définition de la dyscalculie):

- **La NEMI** : normalement nous la ferons passer en entier. Il ne s'agit absolument pas d'établir un diagnostic quelconque aux vues des résultats de QI. Le terme "évaluation du QI" pouvant effrayer certains parents, nous pensons qu'il serait judicieux de ne pas donner ce terme de QI.

- **Le ZAREKI** : nous n'utilisons que 2 subtests : l'estimation visuelle de quantité et le placement de nombres sur une échelle graduée.

- **Le Woodcock Johnson III**: le test a été traduit en français par l'équipe du CNRS avec laquelle nous travaillons pour ce mémoire. Nous ferons le subtest Math Fluency (environ 3 min) et le subtest de calcul.

Partie 2 :

La seconde partie de l'expérimentation consiste en la passation de l'épreuve expérimentale qui testera le déplacement attentionnel, en additions et soustraction (environ 30 min). L'expérience consistera à résoudre des opérations arithmétiques (additions et soustractions). Chaque opération sera présentée de manière séquentielle dans l'ordre suivant : un point de fixation sera affiché au centre de l'écran avant d'être remplacé par le premier opérande pendant 500ms. De nouveau, le point de fixation était présenté avant d'être remplacé par le signe arithmétique (indice) pendant 150ms. Après l'affichage du signe arithmétique, un délai de 300 ms précédera l'affichage du second opérande (cible) qui sera présenté à gauche ou à droite du point central. Pour chaque type d'opération, le 2ème opérande apparaitra à droite dans la moitié des essais et à gauche dans l'autre moitié des essais. Ainsi, la nature du signe arithmétique ne permettra pas de prédire l'hémichamp dans lequel apparaîtra le second opérande. A l'apparition du second opérande, le participant aura 5 secondes pour donner oralement le résultat de l'opération, le plus rapidement possible en faisant le moins d'erreur possible. Les temps de réponses seront mesurés entre l'affichage du deuxième opérande et le début de la réponse vocale donnée par le participant. Les 20 paires d'opérandes seront donc présentées sous 2 formes d'opérations arithmétiques (addition/soustraction) et avec le 2ème opérande apparaissant une fois de chaque côté (droite/gauche). L'ordre de présentation des essais sera rendu aléatoire.

Organisation de passation

Concernant l'expérimentation, la passation durera environ **2h par participant**. Dans l'idéal, nous voudrions faire passer l'ensemble en **une seule passation**, mais selon les disponibilités nous pouvons fractionner la passation en 2 séances.

Nous souhaiterions que les participants se déplacent **au laboratoire** (L2C2 à bron boulevard pinel, contre l'hôpital Neuro-cardio) car nous disposons d'une salle d'attente, d'ipad pour faire attendre les enfants, des cadeaux à leur donner, les parents peuvent visiter etc… Cependant, nous imaginons facilement les difficultés d'organisation que cela peut impliquer pour les familles. Ainsi, nous pouvons également nous organiser pour faire la passation, en fonction de la disponibilité des parents ou de l'orthophoniste qui suit l'enfant: **votre cabinet**, **domicile**, école (avec les autorisations nécessaires), laboratoire... Selon vos disponibilités, peut-être pourrions-nous utiliser vos locaux par exemple...

Pour la période de passation, nous avons déjà plusieurs sessions prévues avec des patients **à partir de mi-mai**. Nous essayerons alors au maximum de regrouper les passations entre mi-mai et septembre, si possible, sachant que nous nous rendons très disponibles durant cette période pour satisfaire les disponibilités de chacun.

Si jamais vous souhaitez des informations plus précises, vous pouvez contacter l'attachée de recherche qui participe au projet : justine.epinat@isc.cnrs.fr

De plus, il est tout à fait possible de vous recevoir au CNRS si vous voulez visiter les locaux de passation et l'organisation pour recevoir les patients.

Annexe VI : Documents administratifs

1. Consentement parental

INSTITUT DES SCIENCES COGNITIVES

Marc Jeannerod

Formulaire de consentement pour parent de participant mineur

(un exemplaire cosigné doit être remis à la personne qui participe)

Etude sur le calcul mental

Lieu de l'étude : *Laboratoire sur le Langage, le Cerveau et la Cognition (L2C2)*

Institut des Sciences Cognitives

67 Bd Pinel – 69675 Bron cedex

Mon enfant va participer à une expérience comportementale dans le cadre d'une étude sur le calcul mental.

Je soussigné(e), M., Mme .... Autorise en qualité de titulaire de l'autorité parentale, mon enfant (nom et prénom du participant) .... né(e) le : .... à participer à cette expérience.

J'ai compris les informations qui m'ont été données, et je comprends les usages, les méthodes et les demandes de l'étude. Toutes les questions que j'ai pu poser ont été traitées de manière satisfaisante.

J'accepte que mon enfant participe à cette étude et comprends que je suis libre de le/la retirer de l'étude à tout moment, sans avoir à me justifier.

Je donne mon accord pour que les données rassemblées pour l'étude puissent être publiées dans des articles ou communications scientifiques. Dans ce cas là, les données de mon enfant seront anonymisées de façon à ce qu'il/elle ne puisse pas être identifié(e).

Fait en double exemplaire à ...., le..

Signature:

Version N° 1 23/01/2015 Page 1 sur

2. Formulaire d'assentiment

INSTITUT DES SCIENCES COGNITIVES

Marc Jeannerod

Formulaire d'assentiment pour enfant (8-11 ans) et/ou adolescent (12-14 ans)

(un exemplaire cosigné doit être remis à la personne qui participe)

Etude sur le calcul mental

Lieu de l'étude : *Laboratoire sur le Langage, le Cerveau et la Cognition (L2C2)*

Institut des Sciences Cognitives

67 Bd Pinel – 69675 Bron cedex

Je participe à une expérience comportementale dans le cadre d'une étude sur le calcul mental.

Je comprends ce que l'on me demande.

J'ai pu poser toutes les questions que je voulais et j'ai obtenu toutes les réponses.

Je suis d'accord pour participer à cette étude.

Je sais que je peux demander une pause à tout moment et que je peux demander à arrêter sans que cela pose problème.

Je sais que cette étude est confidentielle et que les résultats ne seront diffusés à personne.

Fait en double exemplaire à ………………………………………………………, le…………………………………………………………………

Nom, prénom de l'enfant ou de l'adolescent ……………………………………………………………………………………………

Signature:

Version N° 1 23/01/2015 Page 1 sur

Annexe VII : Exemple de scénario expérimental

Tableau 7 : Présentation du scénario n°4

item	opération	item	opération2
*1	8-5	21	4+2
2	4-2	22	4+1
3	4-1	23	4+3
4	5+4	24	5-2
5	5-2	25	3+1
*6	9+6	*26	9-5
*7	7-6	27	4-1
8	4+1	28	4+3
9	3+1	29	2+1
10	4+1	30	3+1
11	5-1	*31	9-8
12	4-3	32	4+3
13	2-1	*33	9-6
14	4+2	34	5-4
15	3+2	35	3+1
16	4-2	36	4-1
*17	7+5	37	5-1
18	3+2	38	3-2
19	5+1	39	4+2
20	5-3	*40	8+6

item	opération	item	opération2
1	5+2	*21	8+7
2	3-1	*22	6-5
3	5+2	*23	7+6
4	2+1	24	4+3
5	5+3	25	3-1
6	2-1	26	4+1
7	5-3	27	2+1
8	3-2	28	3-2
9	4+2	29	4-2
10	3-1	30	5+4
*11	7+5	31	5+1
12	5+3	32	2-1
13	4-1	33	3+2
14	3-1	*34	9+7
*15	7-6	35	4-3
16	2+1	*36	8-7
*17	8+5	37	3+2
18	4-3	38	5-4
19	4-2	39	3-2
20	4-3	40	2-1

: Calcul de type « addition »

: Calcul de type « soustraction »

* : Problème de grande taille

Annexe VIII : Evaluation de l'indice d'Efficience Cognitive (IEC)

Tableau 8 : Conversion de la somme des notes standard des quatre épreuves obligatoires en IEC de la NEMI-2, correspondance en rang percentile et niveau qualitatif de l'efficience cognitive

Somme des notes standard	Rang percentile	IEC	Niveau qualitatif
4	0,1	**48 - 60**	**Inférieur**
5	0,5	**55 - 67**	
6	1,3	**61 - 73**	
7	2,8	**65 - 77**	**Faible**
8	5,3	**70 - 82**	
9	8,7	**74 - 86**	
10	13,1	**77 - 89**	**Moyen faible**
11	18,5	**81 - 93**	
12	25,9	**84 - 96**	
13	34,2	**88 - 100**	**Moyen**
14	43	**91 - 103**	
15	51,7	**95 - 107**	
16	59	**97 - 109**	
17	66,8	**101 - 113**	
18	74,4	**104 - 116**	
19	80,8	**107 - 119**	**Moyen fort**
20	85,5	**110 - 122**	
21	89,3	**113 - 125**	
22	92,2	**115 - 127**	**Fort**
23	94,5	**118 - 130**	
24	96,4	**121 - 133**	
25	97,8	**124 - 136**	**Supérieur**
26	99,1	**129 - 141**	
27	99,7	**135 - 147**	
28	99,9	**140 - 152**	

TABLE DES ILLUSTRATIONS

1 Liste des tableaux :

2 Liste des figures :

TABLE DES MATIERES

Lucie COMBE
Mathilde VIEUX

AUTOMATISATION DES PROCEDURES ARITHMETIQUES DANS LA DYSCALCULIE

106 Pages
Mémoire d'orthophonie – **UCBL- ISTR** – Lyon 2016

RESUME

La recherche en cognition mathématique s'est récemment penchée sur les procédures de calcul. Dernièrement il a été proposé que les adultes utilisent des procédures arithmétiques automatiques afin de résoudre additions et soustractions à un opérande. Ces stratégies automatisées, activées à la simple perception du signe arithmétique, seraient associées à des déplacements attentionnels horizontaux très rapides le long d'une ligne numérique mentale. Pour mettre en évidence l'automatisation de ces procédures, des tâches de calculs simples étaient proposées et les biais attentionnels mesurés par rapport au type d'opération et à la position du second opérande. Suite aux résultats chez les adultes, les recherches actuelles tendent à déterminer la période d'émergence de cette automatisation chez l'enfant tout-venant. La présente étude s'inscrit dans une démarche neuropsychologique qui souhaiterait améliorer la compréhension de la dyscalculie. Le même paradigme que pour les adultes a été proposé sur une population de 56 enfants de 8 à 14 ans (32 contrôles et 24 dyscalculiques). Les enfants devaient résoudre des additions et des soustractions à un chiffre apparaissant sur un écran d'ordinateur. Le premier opérande et le signe étaient présentés au centre de l'écran alors que le deuxième opérande apparaissait dans l'hémi-champs gauche ou droit. Les résultats de cette étude montrent, pour les soustractions, la présence d'automatisation des procédures pour les enfants contrôles et une absence de cette automatisation pour les enfants dyscalculiques. Ainsi, la position gauche (soustraction) ou droite (addition) du second opérande, n'influencerait pas le temps de réponse des enfants dyscalculiques, contrairement aux enfants du groupe contrôle. Ainsi, les dyscalculiques présenteraient un déficit d'automatisation des procédures arithmétiques sur les soustractions. Ces données apportent des informations nouvelles qui contribuent à la compréhension du fonctionnement cognitif des dyscalculiques. Il serait alors intéressant de les prendre en compte dans le diagnostic et à la prise en charge de la dyscalculie.

MOTS-CLES

Automatisation – dyscalculie développementale – déplacement attentionnel – enfants – ligne numérique mentale – procédures arithmétiques – addition – soustraction

MEMBRES DU JURY

GONZALEZ Sibylle

CHOSSON Christelle

LEVY Hagar

MAITRE DE MEMOIRE

Jérôme PRADO

DATE DE SOUTENANCE

30 Juin 2016