



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-memoires-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>



MEMOIRE présenté pour l'obtention du
CERTIFICAT DE CAPACITE D'ORTHOPHONISTE

Par

JULIEN Emilie
MARCON Eve

**DÉFICIT DE L'ACCÈS AUTOMATIQUE AUX GRANDEURS
NUMERIQUES À PARTIR DES CODES SYMBOLIQUES
CHEZ L'ENFANT DYSCALCULIQUE.**

Directeur de Mémoire

LAFAY Anne

Membres du Jury

THEROND Béatrice
CHAMBOST Sophie
DESCHAMPS Emmanuelle

Date de Soutenance
25 Juin 2015

ORGANIGRAMMES

1 Université Claude Bernard Lyon1

Président

Pr. GILLY François-Noël

Vice-président CA

M. BEN HADID Hamda

Vice-président CEVU

M. LALLE Philippe

Vice-président CS

M. GILLET Germain

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. GILLY François Noël

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 Pr. MATILLON Yves

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 M. GUIDERDONI Bruno

Ecole Supérieure du Professorat et de
l'Education

Directeur M. MOUGNIOTTE Alain

POLYTECH LYON

Directeur M. FOURNIER Pascal

IUT LYON 1

Directeur M. VITON Christophe

2 Institut Sciences et Techniques de Réadaptation FORMATION ORTHOPHONIE

Directeur ISTR
Yves MATILLON
Professeur d'épidémiologie clinique

Directeur de la formation
Agnès BO, Professeur Associé

Directeur de la 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

Secrétariat de direction et de scolarité
Stéphanie BADIOU
Corinne BONNEL
Emmanuelle PICARD

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, nous tenons à remercier tout particulièrement notre directeur de mémoire sans qui ce travail n'aurait jamais pu voir le jour. En effet, Anne LAFAY a apporté un cadre à l'élaboration de notre sujet mais également un soutien, une disponibilité sans faille et des conseils précieux. Nous lui sommes extrêmement reconnaissantes du temps qu'elle a pu consacrer à toutes les étapes de la construction de ce mémoire. Si nous devions résumer l'élaboration de cette recherche en deux mots : Have fun !

Nous avons à cœur de remercier également toutes les orthophonistes qui ont accepté de prendre de leur temps pour nous : merci de nous avoir fait découvrir cette belle région Rhône-Alpes jusque sur les rives de l'Ardèche.

Nous avons pu intervenir dans deux établissements scolaires : Ecole Saint Joseph du Chater (Messimy, 69) et Ecole Primaire Jules Ferry (Peyruis, 04). Nous tenions à exprimer toute notre gratitude aux chefs d'établissement, Jean LE BORGNE et Patricia RIOU, et aux enseignants pour leur accueil. Ils ont œuvré à nous placer dans des conditions d'expérimentation optimales.

Un grand merci à tous les enfants que nous avons pu rencontrer, à la fois chez les orthophonistes mais également au sein des établissements scolaires. Ils ont participé à notre étude avec enthousiasme, nous permettant de vivre de nombreux beaux moments de vie.

Nous remercions également l'équipe d'encadrement des mémoires qui nous a soutenues, encadrées et conseillées tout au long de ces deux ans. Merci à Mmes Agnès WITKO et Nina KLEINSZ pour leur implication, leur compréhension et leur empathie face à l'élaboration de ce projet riche en émotions. Un clin d'œil à nos collègues de promotion Mlles FROMENT Annabelle et BERNON Daisy qui ont parfaitement endossé leur rôle de « déléguées mémoire ».

Merci à nos amis, nos familles et nos compagnons respectifs pour leur soutien durant ces quatre années intenses. Merci d'avoir fait preuve de patience et de compréhension face à nos longs rendez-vous « Skype » mensuels.

Comment ne pas clôturer ces remerciements par la mise en avant d'une belle complémentarité entre binôme ? Si la première est anglophone, l'informatique est plus parlante pour la seconde ; si l'une est analytique, l'autre préfère être synthétique ; si la première est une rédactrice en chef, les statistiques parlent davantage à la seconde ; si la première préfère le vélo, l'autre privilégie la voiture. Une belle complémentarité mais également amitié qui perdurera, à coup sûr, à l'issue de notre formation. Merci à nous !

SOMMAIRE

ORGANIGRAMMES.....	2
1 Université Claude Bernard Lyon1	2
2 Institut Sciences et Techniques de Réadaptation FORMATION ORTHOPHONIE	3
REMERCIEMENTS	4
SOMMAIRE	5
INTRODUCTION	9
PARTIE THEORIQUE	10
I Modèles théoriques de base.	11
1 Modèle du Triple Code (Dehaene, 1992).....	11
2 Modèle en quatre étapes (Von Aster & Shalev, 2007).	13
3 Conclusion.	14
II L'accès automatique aux grandeurs numériques.	15
1 Le Stroop numérique.	15
2 L'accès automatique aux grandeurs numériques chez l'adulte.....	15
3 L'accès automatique aux grandeurs numériques chez l'enfant.	16
III La dyscalculie développementale.	19
1 Définitions.....	19
2 Confrontation aux modèles théoriques.....	20
3 Hypothèses autour du déficit à l'origine de la dyscalculie.....	21
IV La dyscalculie et l'accès automatique aux grandeurs numériques.	22
1 L'accès automatique aux grandeurs numériques chez l'adulte dyscalculique.	22
2 L'accès automatique aux grandeurs numériques chez l'enfant dyscalculique.....	23
PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES.....	26
I Notions théoriques clés et question de recherche.	27
II Objectifs.....	27
1 Objectif principal.	27
2 Objectifs préalables.	27
3 Objectifs de recherche.....	28
III Hypothèses théoriques.	28
1 Hypothèses préalables.....	28
2 Hypothèses de recherche	28
IV Hypothèses opérationnelles.....	28

1	Hypothèses opérationnelles préalables.	28
2	Hypothèses opérationnelles de recherche	29
PARTIE EXPERIMENTATION		30
I	Participants.	31
1	Critères d'inclusion et d'exclusion de la population.	31
2	Caractéristiques de la population.	31
3	Groupe contrôle et groupes expérimentaux.	31
II	Matériel.	34
1	Evaluation cognitive.....	34
2	Tâches expérimentales.	36
III	Procédure.	41
1	Conditions de passation.....	41
2	Ordre de passation.	41
PRESENTATION DES RESULTATS		42
I	Age.	43
II	Tâches cognitives.	43
1	Evaluation cognitive.....	43
2	Tests d'habiletés mathématiques.....	44
III	Tâches expérimentales.....	45
1	Tâches de réaction motrice.	45
2	Tâches de comparaison numérique.....	45
3	Tâches de Stroop numérique.....	49
IV	Corrélations.	54
DISCUSSION DES RESULTATS		55
I	Introduction :	56
II	Interprétation des résultats.	56
1	Résultats en lien avec les objectifs préalables.....	56
2	Résultats en lien avec les objectifs de recherche.	60
III	Limites.....	62
1	Mode de recrutement.	62
2	Sensibilité de l'étalonnage du Zareki-R.....	63
3	Validité de la tâche de Stroop numérique en modalité orale.....	64
IV	Perspectives.	64
1	Implications théoriques.	64

2	Implications cliniques.	65
3	Perspectives de recherche.....	66
V	Conclusion.	67
	CONCLUSION.....	68
	REFERENCES	69
	ANNEXES.....	72
	Annexe I : Tableau d'équivalence des niveaux scolaires.....	73
	Annexe II : Tableaux de répartition des items.....	74
1.	Tâches de comparaison numérique (en modalités analogique, arabe et orale).	74
2.	Tâches de Stroop numérique (en modalités arabe et orale).	75
	Annexe III : Lettres d'information et de consentement destinées aux parents.	76
1.	Lettre destinée aux parents des enfants suivis en orthophonie.....	76
2.	Lettre destinée aux parents des enfants rencontrés en école.	78
	TABLE DES ILLUSTRATIONS	80
	TABLE DES MATIERES	81

SUMMARY

Studies in numerical cognition focused on automaticity in accessing number magnitude, using numerical Stroop paradigm to observe the size congruity effect (SiCE). SiCE is indeed an indicator of automatic access to magnitude. The present study investigated the hypothesis of a deficit in automatically accessing magnitude from symbolic codes (Arabic and spoken codes) in children with dyscalculia. Numerical Stroop tasks were then created in Arabic and spoken modalities. Other tasks were also designed in order to evaluate intentional numerical processes. A cognitive evaluation was proposed too. The performance of 78 children in third, fourth and fifth grades were analyzed: 46 children without mathematical difficulties are compared to 11 children with developmental dyscalculia (DC) and 21 children with subjective mathematical difficulties (SMD).

The results showed a number sense access deficit in DC children, but a number sense deficit in SMD children. Furthermore, DC and SMD children didn't show any size congruity effect for the numerical Stroop task in Arabic modality, contrary to the children without mathematical difficulties. However, a size congruity effect was observed for the numerical Stroop task in spoken modality in every group. That suggests a deficit in automatic access to numerical magnitude from Arabic numbers in DC and SMD children, but a preserved automatic access to numerical magnitude from spoken numbers. That data provides new insights into the cognitive patterns of children with mathematical difficulties and implications in diagnosing and caring dyscalculia.

KEY-WORDS

Developmental dyscalculia – primary school children – automaticity – numerical Stroop paradigm – numerical distance effect – size congruency effect – automatic numerical magnitude processing – oral and Arabic numerals.

INTRODUCTION

“Moi, je suis vraiment nul en maths et je n’aime pas du tout ça. De toutes façons, je sais que plus tard, je n’en aurai pas besoin”. Pourtant, malgré les apparences, les mathématiques rythment notre vie quotidienne : effectuer une recette de cuisine, faire des courses, lire l’heure ou encore peindre un mur sont autant de d’activités qui sollicitent nos habiletés mathématiques.

Imaginez-vous donc les nombreuses situations d’échec dans lesquelles se trouvent les personnes ayant un déficit des habiletés mathématiques, appelé aussi dyscalculie. La dyscalculie développementale renvoie à un déficit cognitif qui se traduit par des difficultés de représentation et de manipulation des valeurs numériques. Le handicap qu’elle cause justifie la nécessité d’un diagnostic précis et la mise en place d’une remédiation, notamment sous forme de prise en soin orthophonique. Pour cela, de solides connaissances théoriques sur la dyscalculie sont nécessaires. Ces données sont apportées par la recherche en cognition numérique.

Le modèle du Triple Code (Dehaene, 1992) a spécifié le fonctionnement cognitif numérique adulte, permettant ainsi d’élaborer une base théorique commune aux études en cognition numérique. Il stipule que les traitements numériques reposent sur trois systèmes de représentations indépendants mais interconnectés, à savoir : le code analogique, le code arabe et le code oral. Le code analogique constitue le socle de la représentation mentale des grandeurs numériques, c’est à dire du “sens du nombre”. Henik et Tzlegov (1982) ont mis en évidence le fait qu’il existe un accès automatique aux représentations mentales des quantités. Plus précisément, chez des adultes tout-venant, ils ont identifié une automaticité d’accès aux grandeurs numériques à partir du code arabe. Des études ont également porté sur l’aspect développemental de l’accès automatique aux grandeurs numériques à partir du code arabe. D’autres recherches se sont intéressées à cette automaticité chez le sujet dyscalculique. Cependant, les données actuelles sur l’accès automatique aux grandeurs numériques chez l’enfant dyscalculique paraissent insuffisantes. De plus, il n’existe à ce jour aucune étude portant sur l’automaticité d’accès aux grandeurs numériques à partir du code oral.

Dans la continuité des études en cognition numérique antérieures, le présent travail de recherche consistera à identifier s’il existe un déficit d’accès automatique aux grandeurs numériques chez les enfants dyscalculiques à partir du code arabe et du code oral.

Tout d’abord, les bases théoriques qui sous-tendent cette étude seront présentées, notamment le modèle du Triple Code (Dehaene, 1992) et le modèle en quatre étapes de Von Aster et Shalev (2007). Les données actuelles de la recherche sur l’automaticité d’accès aux grandeurs numériques seront également développées, à la fois chez l’adulte et chez l’enfant tout-venant. Le terme de dyscalculie sera ensuite défini, en confrontant cette notion aux modèles théoriques et aux hypothèses actuelles. Puis la littérature scientifique sur l’automaticité d’accès aux grandeurs numériques chez les adultes et les enfants dyscalculiques sera détaillée.

La problématique, les objectifs de recherche et les hypothèses seront alors formulés. Une troisième partie sera dédiée à l’explication du protocole expérimental ainsi que des modalités de passation des expérimentations. Par la suite, les résultats des analyses statistiques portant sur les données recueillies seront présentés.

Enfin, la discussion permettra d’interpréter les résultats, de réfléchir aux limites de cette étude, mais également à ses implications cliniques et théoriques. Elle ouvrira sur de nouvelles perspectives de recherche.

Chapitre I

PARTIE THEORIQUE

I Modèles théoriques de base.

1 Modèle du Triple Code (Dehaene, 1992).

1.1 Les trois codes numériques.

Le modèle du Triple Code (Dehaene, 1992) fait actuellement référence pour expliquer le fonctionnement cognitif numérique de l'adulte. Il sert également de base théorique aux études en dyscalculie, tant chez l'adulte que chez l'enfant.

Ce modèle a été établi suite à une synthèse de nombreuses données dans le domaine de la cognition numérique. Il postule que les traitements numériques reposent sur trois systèmes de représentation : le code analogique, le code verbal (auditif) et le code arabe (visuel). Les aptitudes numériques sont basées sur une manipulation mentale des nombres mobilisant ces trois codes, chaque tâche numérique étant liée à des codes d'entrée et de sortie spécifiques. Le format des nombres manipulés varie pour chaque sous-composante d'une tâche. De plus, ce modèle a pour atout de proposer des codes sous-tendus chacun par un substrat anatomique spécifique.

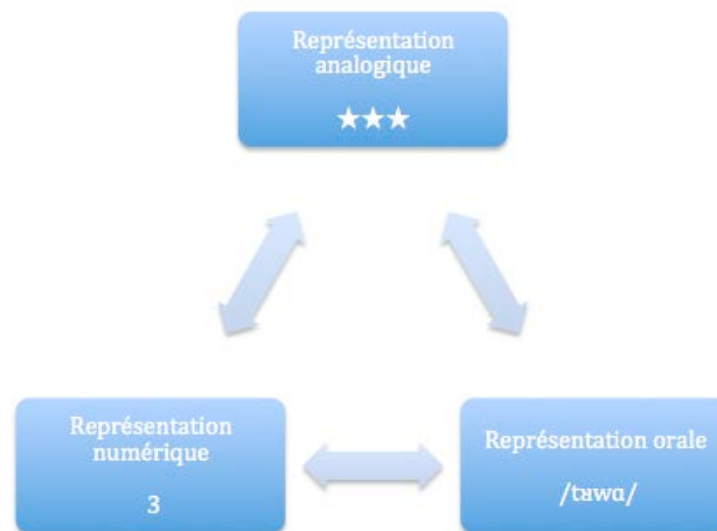


Figure 1 : Modèle du Triple Code (Dehaene, 1992).

Le code analogique correspond à la représentation des grandeurs numériques. Ce système non symbolique traite la sémantique du nombre, sa magnitude. Cette représentation préverbale et quasi innée est sous-tendue par le lobe pariétal, plus particulièrement par le sillon intrapariétal. Le code analogique assure par exemple les tâches de comparaison numérique et les calculs approximatifs. C'est également ce code qui permet l'évaluation précise des petites collections (subitizing) ainsi que l'estimation de grandes collections. Il est le socle de l'acquisition de la signification des quantités, c'est-à-dire du « sens du nombre ».

Le code verbal correspond à un mot ou une séquence de mots, c'est une représentation symbolique et asémantique. Ce code est mobilisé par exemple lors du comptage, lors du stockage et de la récupération des faits arithmétiques et lors de calculs précis. Cette représentation verbale, qu'elle soit orale ou écrite, a pour substrat

neurologique les aires qui soutiennent classiquement le langage, soit l'aire de Broca et la partie supérieure du lobe temporal gauche.

Le code arabe est également symbolique et asémantique. Il désigne la forme visuelle des nombres arabes et est activé pour les opérations complexes, les jugements de parité et les calculs précis. Cette représentation est localisée dans les régions occipito-temporales bilatérales.

Ces trois codes, bien qu'indépendants, sont interconnectés. En effet, le code verbal et le code arabe étant asémantiques, il existe par exemple un lien entre eux et le code analogique. Ce lien est indispensable pour accéder à la représentation numérique d'un nombre présenté sous forme verbale ou arabe.

1.2 La ligne numérique.

Les quantités numériques seraient mentalement représentées sur une ligne numérique orientée de gauche à droite, les nombres les plus petits étant situés vers la gauche et les plus grands à droite (Dehaene, Bossini et Giraux, 1991). Cette orientation est révélée par l'effet SNARC (Spatial Numerical Association of Response Code), l'effet de côté de réponse tel que : en comparaison numérique, le score est meilleur pour les paires dont le nombre le plus grand numériquement est situé à droite de la paire. Des participants iraniens ont montré un effet SNARC inversé, ce qui suggère que leur ligne numérique mentale est orientée de droite à gauche. On peut en déduire que la ligne numérique a tendance à s'orienter dans le sens de la lecture.

Cette ligne est soumise à la loi de Weber-Fechner (Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004), c'est-à-dire que les représentations numériques perdent en précision avec l'augmentation des quantités réelles. Autrement dit, la ligne est de moins en moins précise de la gauche vers la droite. Cette loi découle de deux effets principaux observés lors d'études comportementales : l'effet de taille et l'effet de distance (Dehaene, 1992). L'effet de taille correspond au fait qu'il est plus facile et plus rapide de comparer des petites que des grandes quantités. On remarque ainsi que les participants sont plus rapides pour effectuer une comparaison de type 4 vs. 6 que pour comparer des nombres plus grands comme 34 vs. 36. Selon l'effet de distance, il est plus facile et plus rapide de comparer des quantités éloignées (par exemple 2 vs. 9) que des quantités proches (par exemple 5 vs. 6). En d'autres termes, plus les nombres sont grands, plus la même distance numérique semble subjectivement faible. Ceci montre bien que la ligne numérique mentale est compressible.



Figure 2 : Ligne numérique mentale (Dehaene, Bossini et Giraux, 1991).

Ainsi, le modèle du Triple Code (Dehaene, 1992) pose l'existence de trois codes qui sous-tendent le traitement cognitif des nombres : le code analogique, le code oral et le code arabe. Dehaene et al. (1991) ont également montré que les représentations numériques sont réparties sur une ligne numérique soumise à deux effets : l'effet de distance et l'effet de taille.

2 Modèle en quatre étapes (Von Aster & Shalev, 2007).

Bien qu'actuellement référence pour expliquer le fonctionnement cognitif numérique, le modèle du Triple Code (Dehaene, 1992) est un modèle descriptif du fonctionnement cognitif des traitements du nombre chez l'adulte. Von Aster & Shalev (2007) conçoivent quant à eux un modèle développemental intégrant les trois codes proposés par Dehaene. Selon ce modèle, l'acquisition du nombre s'effectue en quatre étapes successives. La première étape correspond à la représentation innée des grandeurs numériques et les fonctions qui lui sont associées. La seconde étape est l'acquisition des étiquettes verbales, la troisième est la symbolisation arabe. Enfin, l'élaboration de la ligne numérique mentale est la quatrième et dernière étape.

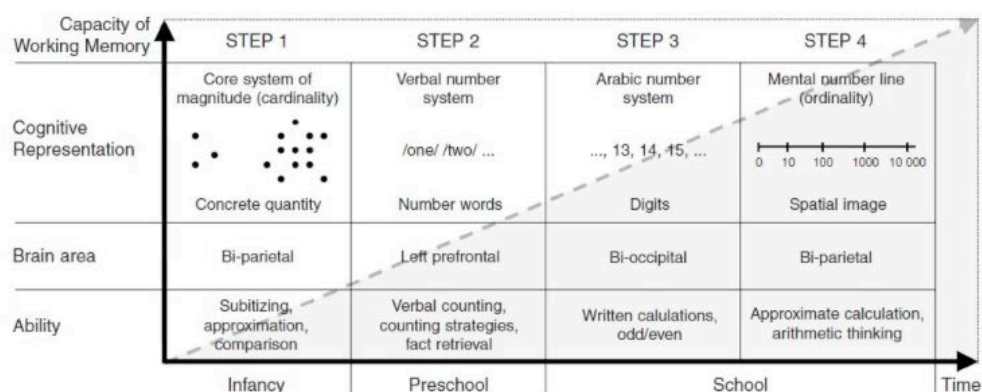


Figure 3 : Modèle développemental de la cognition numérique (Von Aster & Shalev, 2007).

Le processus d'acquisition du nombre a pour socle une représentation innée des grandeurs numériques. Dans le modèle de Von Aster et Shalev, ceci est la première étape du développement. Cette représentation a pour corollaire deux systèmes numériques de base dédiés au traitement des représentations numériques analogiques (Feigenson et al., 2004). Il s'agit du système numérique approximatif (SNA) et du système numérique précis (SNP). Le SNA renvoie à l'estimation, capacité quasi innée à évaluer globalement la quantité correspondant à une collection d'objets. Il permet une représentation approximative rapide et intuitive des grandes quantités numériques. Il rend ainsi possible l'estimation de résultats d'opérations, la comparaison d'ensembles ou de nombres symboliques, le positionnement sur une ligne numérique... Cette capacité d'estimation est présente chez les enfants dès l'âge de 5 ans (Barth, La Mont, Lipton, & Spelke, 2005) mais semble alors moins efficace que chez l'adulte (Piazza et al., 2010) et moins automatisée (Temple & Posner, 1998). Le SNP correspond à la faculté de se représenter précisément des petites quantités d'objets, sans nécessité d'avoir recours au comptage. On parle du processus de subitizing. Là aussi, la représentation est rapide, intuitive et quasi innée. D'après diverses études, le subitizing n'est réalisable que sur les quantités de 1 à 3 (Fayol, M., Perros, H. & Seron (2004) ; Schleifer & Landerl (2011)) voire 5 au maximum (Starkey & Cooper, 2011). En effet, on observe chez les adultes comme chez les enfants une capacité à identifier très rapidement et avec exactitude des collections de 1 à 3 (voire 5) objets. Au-delà, les durées nécessaires à l'identification s'accroissent de manière quasi linéaire avec l'augmentation des quantités. Cette rupture marquée des temps de réponse est considérée comme le témoin de deux processus de d'identification de quantité distincts : le subitizing, perception simultanée de l'ensemble des éléments de très petites collections, et le comptage / dénombrement, traitement sériel des éléments un à un lorsque la collection est plus importante. Bien que ces deux capacités d'estimation et de subitizing soient précoces, elles évoluent et gagnent en

précision avec l'âge (Halberda & Feigenson, (2008) pour le SNA ; Schleifer & Landerl, (2011) pour le SNP). Leur précision est d'ailleurs corrélée aux habiletés mathématiques (Mundy & Gilmore, 2009 pour le SNA ; Desoete & Gregoire (2006) pour le SNP). Ces représentations innées des grandeurs numériques correspondent au sens du nombre qui sert de base aux acquisitions numériques symboliques (Cf. Anne Lafay & Macoir, 2013 pour une revue détaillée).

La seconde étape est le processus de développement linguistique. A ce stade, une association s'effectue entre la perception d'un certain nombre d'objets et le code verbal oral. Le modèle du Bootstrapping (Carey, 2004) se penche justement sur l'établissement de ce lien. Selon Carey (2004), l'enfant acquiert le concept d'entier naturel par la mise en correspondance de petites collections d'objets et d'étiquettes mot-nombre. Ainsi, des liens se créent peu à peu entre les collections que l'enfant a subitizées de façon intuitive et le code verbal oral que l'enfant a acquis. De cette manière, les termes de la comptine numérique (/un/, /deux/, /trois/, /quatre/...) sont associés aux quantités qui leur correspondent.

Dans un troisième temps, c'est la symbolisation arabe qui intervient. Elle est la dernière représentation acquise par l'enfant car, comme tout code symbolique écrit, elle nécessite un apprentissage spécifique explicite. Des liens se créent entre les collections que l'enfant a subitizées de façon intuitive ou dénombrées, le code verbal oral que l'enfant a acquis et le code arabe nouvellement appris.

L'acquisition de ces deux codes symboliques est une condition préalable à l'élaboration d'une ligne numérique mentale. Pour Von Aster et Shalev (2007), la construction de cette ligne numérique mentale constitue donc la quatrième étape du développement numérique. La ligne peut être considérée comme une troisième représentation symbolique des nombres, qui code l'ordinalité par une image spatiale. Cependant, à l'instar du code analogique, il s'agit d'une représentation sémantique du nombre. Ainsi, cette dernière étape peut être considérée comme une redescription symbolique des représentations innées des grandeurs numériques. Autrement dit, la représentation interne des grandeurs numériques serait codée symboliquement de manière spatiale, sur une ligne numérique. D'un point de vue développemental, il semble que la précision des représentations sur la ligne numérique augmente avec l'âge et l'expertise en habiletés numériques. Ainsi, jusqu'à l'âge adulte, les estimations numériques entre 0 et 1000 s'affinent progressivement, deviennent de plus en plus précises (Booth & Siegler (2006) ; Opfer & Siegler (2007)). Des études en imagerie cérébrale vont dans le même sens (Kadosh et al., 2007).

3 Conclusion.

Le modèle du Triple Code de Dehaene (1992) comme le modèle développemental en quatre étapes de Von Aster et Shalev (2007) mettent en évidence les liens qui s'établissent entre les différents codes numériques. Ces connexions permettent, grâce à la représentation des grandeurs numériques, d'accorder une valeur sémantique aux codes symboliques. Elles s'effectuent bien entendu de manière intentionnelle, c'est à dire volontairement, avec l'implication des ressources attentionnelles, mais, pour une efficacité optimale au cours de tâches numériques, il est possible que le lien entre les codes symboliques et le code analogique soit également automatique.

II L'accès automatique aux grandeurs numériques.

1 Le Stroop numérique.

L'étude des connexions entre les trois codes numériques amène à la question de l'automatisme du lien entre les codes. Dans la recherche en cognition numérique, c'est l'automatisme d'accès aux représentations numériques, c'est-à-dire aux grandeurs numériques, qui a été étudiée. Un paradigme particulier a été mis au point dans ce but : le Stroop numérique. Le Stroop numérique est inspiré du paradigme de Stroop issu de la neuropsychologie cognitive, dans lequel il s'agit de placer le participant face à une situation de conflit cognitif, c'est-à-dire d'interférence comportant une information non pertinente à inhiber. À l'origine, la situation expérimentale de John Ridley Stroop (1935) met en évidence l'automatisme de la lecture. Sa tâche consiste à dire la couleur de mots écrits, les mots étant des noms de couleurs (par exemple, dire « rouge » pour le mot « **vert** »). Dans ce contexte, l'information non pertinente à inhiber est le mot écrit, dont la lecture a été faite automatiquement. Le Stroop numérique fonctionne de manière similaire. Lors d'une tâche de type Stroop numérique en modalité arabe, une paire de nombres en nombres arabes est présentée. La taille physique (taille d'écriture) d'un des nombres est plus grande que la taille physique de l'autre. La tâche consiste à désigner le nombre dont la taille physique est la plus grande. On distingue *a minima* deux situations : congruente et non congruente. Un item congruent est un item pour lequel le nombre le plus grand physiquement est également le plus grand numériquement (ex : 4 vs. 2). Un item non congruent est un item pour lequel le nombre le plus grand physiquement est numériquement plus petit (ex : 4 vs. 2). C'est en situation non congruente qu'une interférence doit être gérée par le participant, puisque la grandeur numérique fournit une information qui s'oppose à celle donnée par la taille physique. L'analyse expérimentale consiste à observer la différence de temps de réponse et de scores entre les items congruents et les items non congruents. Un allongement du temps de réponse ou une baisse des scores aux items non congruents sont les manifestations comportementales appelées « effet de congruence de taille ». L'effet de congruence de taille amène à conclure à un accès automatique à la grandeur numérique des nombres à partir du code arabe. En effet, l'allongement du temps de réponse est le témoin comportemental d'un processus d'inhibition. L'information numérique traitée automatiquement doit être inhibée afin de répondre à la consigne qui porte sur l'information visuelle (taille physique). La baisse des scores témoigne quant à elle de l'échec de la mise en place de l'inhibition : l'information numérique a été traitée de manière tellement automatique que le participant a répondu selon ce critère, avant même d'avoir pu enclencher un processus d'inhibition. Tzelgov et Ganor-Stern (2005) reprennent dans une revue de la littérature les différents protocoles expérimentaux utilisés pour mettre en évidence l'automatisme d'accès aux grandeurs numériques. Ils y expliquent effectivement que l'effet de congruence de taille mis en évidence par des tâches de type Stroop numérique est un marqueur d'automatisme robuste et fiable. D'autre part, les études en neuroimagerie montrent que le sillon intrapariétal, qui sous-tend les activités numériques, est modulé lors d'une tâche de Stroop numérique par la non congruence entre la dimension numérique et la dimension physique (Pinel, Piazza, Le Bihan, & Dehaene, 2004).

2 L'accès automatique aux grandeurs numériques chez l'adulte.

Le paradigme de Stroop numérique a été utilisé pour la première fois par Henik & Tzelgov (1982), auprès d'une population adulte saine. Ces auteurs ont proposé à chaque participant une tâche de comparaison de taille physique de nombres arabes (dont les grandeurs numériques variaient), tâche correspondant au paradigme de Stroop numérique. Un effet de congruence de taille a été obtenu : les temps de réponse des

participants étaient plus faibles quand la dimension pertinente (taille physique) et la dimension non pertinente (grandeur numérique) étaient congruentes. Au contraire, les temps de réponse des participants étaient allongés en situation non congruente, c'est-à-dire lorsque les dimensions pertinentes et non pertinentes donnaient des informations contradictoires. Les auteurs concluent ainsi en faveur d'un traitement parallèle non intentionnel de l'information numérique et de la taille physique. Ils insistent sur le fait qu'au cours de la tâche de comparaison physique, la grandeur numérique des nombres présentés est activée automatiquement, alors que cette information n'est pas pertinente pour cette tâche. Par la suite, nombreux sont les auteurs qui ont à leur tour employé le paradigme de Stroop numérique avec des participants adultes (Gebuis, Cohen, & Edward (2009) ; Girelli, Lucangeli, & Butterworth (2000)). Ces différentes études ont répliqué l'effet de congruence de taille au cours de tâches de comparaison physiques de nombres arabes. Elles ont toutes mené à la conclusion que la présentation de nombres arabes suscite chez le sujet adulte une activation automatique de la grandeur numérique correspondante. En outre, l'ajout d'items neutres à la tâche (par exemple, 3 vs. 3) a permis de diviser l'effet de congruence de taille en deux composantes : la composante « interférence » et la composante « facilitation ». La composante interférence correspond au fait que la réponse soit plus rapide (ou les scores meilleurs) pour les items neutres que pour les non congruents, alors que la composante facilitation désigne le fait que la réponse soit plus rapide (ou les scores meilleurs) pour les items congruents que pour les neutres. De cette façon, on peut examiner si l'effet de congruence de taille est principalement créé par l'interférence ou par la facilitation de la dimension non pertinente, la dimension numérique, qu'il a été implicitement demandé aux sujets d'ignorer.

Ainsi, les premières études portant sur l'automatisme d'accès aux grandeurs numériques ont démontré que l'accès aux grandeurs numériques à partir du code arabe est automatique chez l'adulte. Logiquement, c'est l'aspect développemental de cette automatisme qui a ensuite été investigué.

3 L'accès automatique aux grandeurs numériques chez l'enfant.

A l'instar des études chez l'adulte, c'est le paradigme de Stroop numérique qui a été utilisé pour étudier l'accès automatique aux grandeurs numériques chez l'enfant. La première question à laquelle les auteurs ont souhaité répondre est celle de l'émergence de l'accès automatique aux grandeurs numériques. Autrement dit, ils ont cherché à savoir à partir de quel âge la présentation d'un nombre arabe active automatiquement une représentation numérique mentale. Ils ont donc tenté de mettre en évidence l'effet de congruence de taille chez des enfants d'âges différents. Girelli et al. (2000) ont présenté des tâches de Stroop numérique à des enfants italiens en 1ère, 3ème et 5ème année de primaire (cf. Annexe I) ainsi qu'à des adultes. Ils ont constaté que l'effet de congruence de taille n'est présent qu'à partir de la 3ème année de primaire. Pour obtenir des informations développementales plus fines, Rubinsten, Henik, Berger, & Shahar-shalev (2002) ont proposé un Stroop numérique à des enfants israéliens en début de 1ère année, puis en fin de 1ère année de primaire. Ils ont observé l'effet de congruence de taille à la fin de la 1ère année, mais pas au début. Ils en concluent que l'accès automatique aux grandeurs numériques apparaît au cours de la 1ère année de primaire, entre 6 et 7 ans. Cela pourrait expliquer que Girelli et al. (2000) n'aient pas mis en évidence d'effet de congruence de taille en 1ère année : elle n'apparaîtrait qu'à la fin de cette année. D'ailleurs, comme Bugden & Ansari (2011), Rubinsten et al. (2002), Soltész, White, & Szűcs (2011) ainsi que White, Sz, Wagner, & Medical (2012) ont relevé un effet de congruence de taille dès la 1ère année de primaire chez des enfants canadiens et anglais. Gebuis et al. (2009) ont quant à eux proposé à des enfants hollandais d'âge pré-scolaire (5-6 ans) un Stroop numérique classique en nombres arabes et n'ont pas observé d'effet de congruence de taille. Cela confirme qu'avant la 1ère année de primaire,

la symbolisation arabe n'est pas suffisamment familière pour activer automatiquement les grandeurs numériques associées.

Pourtant, Zhou, Chen, Chen, Jiang, Zhang, (2007) ont proposé un Stroop numérique en code arabe à des enfants chinois d'âge pré-scolaire (5-6 ans) et ont observé un effet de congruence de taille. Par la suite, Ben-Shalom, Berger, & Henik (2013) ont mis en évidence l'effet de congruence de taille chez des enfants israéliens âgés de 5-6 ans. L'apparition de l'accès automatique aux grandeurs numériques semble donc plus précoce dans la population chinoise et israélienne. Ces études ouvrent la perspective de variations interculturelles dans l'âge d'apparition de l'automatisme d'accès aux grandeurs numériques. Elles confirment le fait que les différences culturelles sont un facteur à prendre en considération pour l'interprétation des données.

D'après les études citées précédemment, il semblerait que l'apparition de l'accès automatique aux grandeurs numériques corresponde globalement à la 1^{ère} année de scolarisation primaire, avec des variations culturelles. Sur ce sujet, la littérature francophone est lacunaire. Les seules données disponibles proviennent de l'étude de Mussolin & Noël (2007) qui ont proposé, entre autres, un Stroop numérique à des enfants belges en 2^{ème}, 3^{ème} et 4^{ème} année de primaire. Toutes les classes d'âge ont montré un effet de congruence de taille. Grâce à cette étude, on sait donc que chez les enfants francophones, l'automatisme d'accès aux grandeurs numériques est présente en 2^{ème} année de primaire. En revanche, il n'existe pas d'études qui permettent de situer précisément la période d'apparition de l'accès automatique aux grandeurs numériques chez les enfants francophones. De plus, jusqu'à présent, aucun travail n'a porté sur des enfants français.

Comme cela a été expliqué précédemment, l'effet de congruence de taille peut être détaillé en deux composantes : l'interférence et la facilitation. Chez les enfants de fin de 1^{ère} année recrutés par Rubinsten et al. (2002), l'effet de congruence de taille ne s'est présenté que sous la composante interférence, la composante facilitation n'ayant pas été observée. De même, Soltész et al. (2011) ont relevé un effet de congruence de taille dès la 1^{ère} année de primaire, mais ont remarqué que la composante interférence est bien plus importante en 1^{ère} année qu'elle ne l'est en 2^{ème} et 3^{ème} années, pendant lesquelles la composante facilitation s'accroît progressivement. Au cours du développement, il semble donc que la composante interférence soit la plus précoce, puis qu'elle diminue au profit de la composante facilitation. Selon Soltész et al. (2011), la baisse de l'importance de la composante interférence peut être attribuée à la maturation des fonctions exécutives, notamment l'attention sélective et l'inhibition. Il est pertinent également de se pencher sur l'influence de la distance numérique sur l'effet de congruence de taille. Bugden & Ansari (2011) ont mis en évidence l'effet de congruence de taille en 1^{ère} année, mais uniquement lorsque la distance entre les deux nombres de la paire était grande (par exemple, l'effet est observé pour la paire 2 vs. 8 mais pas pour la paire 2 vs. 4). Cette influence de la distance sur l'effet de congruence de taille est liée à l'effet de distance classique qui existe en comparaison numérique simple : plus deux nombres sont distants l'un de l'autre, plus il est facile et rapide de les comparer. Le fait que la distance ait un impact sur l'effet de congruence de taille montre que la comparaison numérique est plus automatique en situation de grande distance en 1^{ère} année de primaire. Or, Mussolin & Noël (2007) ont montré qu'en 4^{ème} année de primaire, l'influence de la distance sur l'effet de congruence de taille diminue sensiblement par rapport à la 2^{ème} et 3^{ème} année. Ainsi, l'automatisme s'étendrait progressivement aux situations de petites distances numériques. De même, selon cette étude, l'effet de congruence de taille s'applique d'abord aux petits nombres (en dessous de 50 en 2^{ème} année), puis aux nombres plus grands (jusqu'à 100 à partir de la 3^{ème} année). En outre, Girelli et al. (2000) ont remarqué que l'effet de congruence de taille s'intensifie en 5^{ème} année et devient encore plus significatif chez l'adulte. On peut ainsi dire que l'effet de

congruence de taille existe dès la 1^{ère} année de primaire, mais qu'il est encore immature et qu'il évolue par la suite quantitativement et qualitativement.

Il faut préciser que toutes les études citées précédemment se sont intéressées à l'accès automatique aux grandeurs numériques, mais seulement à partir du code arabe. Il n'existe aucune étude, ni chez l'enfant ni chez l'adulte, ayant investigué l'automatisme d'accès aux magnitudes numériques à partir du code verbal oral.

Tableau 1. Récapitulatif des études portant sur l'automatisme chez l'enfant tout-venant.

*SCI : Size Congruity Effect (traduit « effet de congruence de taille »)

Auteurs / date	Population			Tâche	Effet de congruence
	N	Age	Pays		
Girelli et al., 2000.	24 par groupe.	1 ^{ère} année, 3 ^{ème} année, 5 ^{ème} année, Adultes.	Italie	Stroop numérique	1 ^{ère} année : pas de SCI* 3 ^{ème} , 5 ^{ème} , Adultes : SCI*
Rubinstein et al., 2002.	16 par groupe.	Début de 1 ^{ère} année, Fin de 1 ^{ère} année, 3 ^{ème} année, 5 ^{ème} année, Adultes.	Israël	Stroop numérique	Début de 1 ^{ère} année : pas de SCI* Fin de 1 ^{ère} année, 3 ^{ème} , 5 ^{ème} et adultes : SCI*.
Mussolin et Noël, 2007.	20 par groupe.	2 ^{ème} année, 3 ^{ème} année, 4 ^{ème} année.	Belgique (francophone)	Stroop numérique, Comparaison physique de nombres arabes	2 ^{ème} , 3 ^{ème} , 4 ^{ème} : SCI*.
Zhou et al., 2007.	36.	Enfants de 5-6 ans.	Chine	Stroop numérique, Comparaison numérique.	SCI* seulement pour les paires à grande distance numérique.
Gebuis et al., 2009.	16 par groupe.	Enfants de 5-6 ans, Adultes.	Pays-Bas	Stroop numérique, Stroop analogique.	Enfants de 5-6 ans : pas de SCI* en numérique, SCI* en analogique.
Bugden & Ansari, 2011.	61 en 1 ^{ère} année, 58 en 2 ^{ème} année.	1 ^{ère} année, 2 ^{ème} année.	Canada	Stroop numérique, Comparaison numérique.	1 ^{ère} et 2 ^{ème} : SCI* seulement pour les paires à grande distance.

Soltesz et al., 2011B.	12 par groupe.	1 ^{ère} année, 2 ^{ème} année, 3 ^{ème} année.	Royaume Uni	Stroop numérique.	1 ^{ère} , 2 ^{ème} et 3 ^{ème} : SCI*
White et al., 2012.	21 en 1 ^{ère} année, 19 en 2 ^{ème} année, 25 en 3 ^{ème} année.	1 ^{ère} année, 2 ^{ème} année, 3 ^{ème} année.	Royaume Uni	Stroop numérique, Jugement de parité.	1 ^{ère} , 2 ^{ème} et 3 ^{ème} : SCI*
Ben Shalom et al., 2013.	17.	Enfants de 5- 6 ans.	Israël	Stroop numérique, Comparaison numérique.	SCI*

III La dyscalculie développementale.

1 Définitions.

La dyscalculie développementale renvoie à un déficit qui se traduit par de grandes difficultés dans la représentation et la manipulation des valeurs numériques. Même si les causes à l'origine de ce déficit ne font actuellement pas consensus, pour certains enfants, comparer deux nombres, calculer ou encore résoudre un problème mathématique reste difficile voire impossible. Ce trouble en mathématiques, appelé dyscalculie développementale, peut être mis en évidence chez des enfants ayant un niveau en mathématiques inférieur au niveau attendu à leur âge avec une intelligence normale, un environnement suffisamment stimulant et en l'absence de troubles sensoriel, moteur ou mental (DSM V, American Psychiatric Association's, 2013). Ce désordre neurodéveloppemental d'origine biologique retentit sur les apprentissages scolaires de l'enfant dès ses premières années de scolarité mais aussi sur sa vie quotidienne. En effet, qui n'utilise pas l'addition ou la soustraction lorsqu'il se rend à la boulangerie pour acheter du pain par exemple ? Les compétences numériques en général rythment le quotidien. Cette incapacité arithmétique a d'ailleurs été confirmée par l'imagerie cérébrale fonctionnelle. En effet, l'activation d'un réseau de neurones situé dans le sillon intrapariétal (appelé également « IPS », intraparietal sulcus) a été mise en évidence chez les adultes et les enfants lors de tâches nécessitant des faits arithmétiques. Or, selon Price, Holloway, Räsänen, Vesterinen, & Ansari (2007), les enfants dyscalculiques de 11-12 ans auraient un déficit d'activation du sillon intrapariétal dans les tâches numériques, notamment les tâches de comparaison de points. Une seconde étude a également mis en avant une activation plus faible du sillon intrapariétal chez les enfants dyscalculiques de 8 à 10 ans (Kucian et al., 2011).

La dyscalculie développementale est à différencier de la dyscalculie d'origine acquise (nommée acalculie), qui provient de lésions cérébrales chez l'adulte. La dyscalculie peut être primaire, c'est à dire que le déficit premier concerne seulement les composantes numériques, mais elle peut être également secondaire, autrement dit, résultant de l'atteinte d'autres domaines cognitifs. Par exemple, il semblerait qu'un trouble des fonctions exécutives ou une atteinte de la mémoire de travail pourraient causer de manière secondaire une dyscalculie. Selon Von Aster & Shalev (2007), pour construire et automatiser une image spatiale des nombres ordinaux (sur la ligne numérique mentale), l'enfant doit mettre en lien la compréhension de la grandeur numérique avec les propriétés symboliques et spatiales du nombre. Cette automatisation requiert différentes fonctions cognitives telles que les compétences linguistiques ou la mémoire de travail. C'est pourquoi le bon développement de la ligne numérique mentale peut être entravé par différents déficits cognitifs. Une autre dissociation importante existe : dyscalculie isolée ou associée. En effet, la dyscalculie peut être isolée, c'est-à-dire qu'elle se présente seule,

mais elle peut aussi être associée à d'autres troubles des apprentissages. Ainsi, dans le cadre d'une dyscalculie développementale associée, différents troubles « dys », tels que la dyslexie, ou un trouble attentionnel (Trouble Déficit d'Attention avec ou sans Hyperactivité) peuvent être comorbides. Selon le modèle de Von Aster & Shalev (2007), la première étape est touchée isolément en cas de dyscalculie développementale primaire, mais les comorbidités ne sont pas à négliger. En effet, elles peuvent engendrer des difficultés supplémentaires pour les autres étapes de développement du modèle. Ainsi, un enfant dysphasique aura davantage de difficultés avec la seconde étape qui introduit une dimension linguistique. La symbolisation arabe qui intervient dans la troisième étape peut poser problème à un enfant dyspraxique (en particulier en cas de dyspraxie visuo-spatiale, en ce qui concerne l'organisation des nombres à plusieurs chiffres) ou à un enfant dyslexique (en raison des difficultés à reconnaître des symboles écrits et à leur associer une signification). De même, la dernière étape permettant la construction de la ligne numérique mentale requiert une dimension visuo-spatiale qui peut également être complexe pour un certain nombre d'enfants dyspraxiques.

2 Confrontation aux modèles théoriques.

Les modèles théoriques décrits précédemment portent des regards différents sur la dyscalculie. Chacun propose des hypothèses sur les déficits qui en sont à l'origine.

Pour rappel, selon le modèle du Triple Code (Dehaene, 1992), les traitements numériques reposent sur trois systèmes de représentation : le code analogique, le code verbal et le code arabe. La dyscalculie développementale serait due à un déficit du traitement du code analogique (Wilson et Dehaene, 2007). Les enfants dyscalculiques présenteraient donc un déficit du « sens du nombre ». Autrement dit, ils n'auraient pas de bonnes représentations des grandeurs numériques. Cela entraînerait des difficultés de traitement des quantités, tant au niveau du SNA que du SNP, c'est à dire des faiblesses concernant le subitizing, l'estimation, la comparaison et le calcul approximatif. Au vu de l'interconnexion entre les trois systèmes de représentations décrits par Dehaene, ce déficit du système analogique entraînerait alors des difficultés de représentation numérique lorsqu'un nombre est présenté sous forme orale ou arabe. Cette hypothèse est d'ailleurs également avancée par le modèle de Von Aster & Shalev (2007). Selon ce modèle, décrit précédemment, c'est la première étape qui serait touchée par la dyscalculie primaire, à savoir la représentation innée des grandeurs numériques par l'association des deux systèmes de représentation numérique SNA et SNP.

Au contraire, Feigenson et al. (2004), qui ont développé le modèle des deux systèmes numériques de base (le SNP et le SNA), pensent que ces systèmes numériques ne sont pas tous deux touchés dans la dyscalculie. En effet, ce trouble serait selon eux uniquement dû à un déficit du SNA. Seul le traitement approximatif des quantités supérieures à trois unités (ou cinq unités selon les auteurs) serait donc déficitaire chez les enfants dyscalculiques.

Par ailleurs, le modèle du Bootstrapping (Carey, 2004) donne une autre explication de la dyscalculie développementale. Elle résulterait d'un déficit du traitement précis des petites quantités, c'est-à-dire du SNP. Cette difficulté à subitizer les petites collections d'objets ne permettrait pas le développement précis du concept de nombre. En conséquence, la comptine numérique ne pourrait pas s'associer convenablement aux notions numériques, c'est-à-dire que les étiquettes verbales ne pourraient pas être attribuées de manière fiable et stable à des quantités.

Ainsi, chaque modèle théorique apporte un éclairage différent sur les modules déficitaires à l'origine de la dyscalculie. En lien avec ces divers points de vue théoriques, de nombreuses études ont cherché à mettre à jour des indices comportementaux permettant de mieux expliquer les dysfonctionnements qui causent la dyscalculie. Deux

hypothèses principales émergent de ces travaux : l'hypothèse du déficit du sens du nombre et l'hypothèse du déficit d'accès au sens du nombre.

3 Hypothèses autour du déficit à l'origine de la dyscalculie.

Lafay, Saint-Pierre, & Macoir (2014) ont rassemblé dans une revue les publications relatives « aux troubles cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale ». En effet, deux hypothèses cognitives ont été rapportées afin d'expliquer l'origine de la dyscalculie à savoir : le déficit du sens du nombre et le déficit d'accès au sens du nombre.

3.1 Hypothèse du déficit du sens du nombre.

L'hypothèse d'un déficit du sens du nombre a été introduite par Dehaene. Comme décrit ci-dessus, la dyscalculie serait le reflet d'un trouble spécifique concernant les grandeurs numériques (Wilson et Dehaene, 2007). En d'autres termes, les enfants dyscalculiques seraient en difficulté pour appréhender et traiter les quantités non symboliques, analogiques.

Plus particulièrement, certains auteurs estiment que les enfants dyscalculiques présentent des difficultés liées au SNP, qui permet de traiter de manière exacte les petites quantités (Andersson et Östergren, 2012 ; Ashkenazi et al., 2012 ; Desoete et Grégoire, 2006 ; Schleifer et Landerl, 2011). Ces difficultés liées au SNP s'illustrent, chez les dyscalculiques, par un temps de traitement anormalement long ou par un traitement moins précis que leurs pairs.

En revanche, pour certains auteurs, les enfants dyscalculiques n'auraient pas de difficultés pour subitiser les petites quantités mais plutôt pour traiter les grandes quantités présentées sous forme analogique. Selon Lafay et al., (2014), différentes études vont dans le sens de cette hypothèse (Ferreira et al, 2012 ; Landerl et Kölle, 2009 ; Mejias, Mussolin, Rousselle, Grégoire et Noël, 2011 ; Weerd et Pieters 2012). Ces difficultés liées au traitement des grandes quantités présentées en condition analogique se manifestent là encore par un temps de traitement anormalement long ou bien par un traitement moins précis chez les dyscalculiques.

On constate ainsi qu'il n'existe pas de consensus dans la communauté scientifique autour d'une atteinte du SNP ou du SNA pour expliquer la dyscalculie développementale. Cela introduit l'hypothèse de différents profils de dyscalculie. En revanche, toutes ces études convergent dans une direction : les enfants dyscalculiques sont en difficulté pour traiter des quantités non-symboliques. Ils présenteraient donc un déficit du sens du nombre.

3.2 Hypothèse du déficit d'accès au sens du nombre.

Si les différentes études décrites ci-dessus prônent l'hypothèse du déficit du sens du nombre, d'autres études penchent vers une seconde hypothèse, celle du déficit d'accès au sens du nombre à partir des codes symboliques.

Rousselle & Noël (2007) ainsi que Noël & Rousselle (2011) font émerger l'idée selon laquelle c'est la construction des représentations des quantités symboliques qui est déficitaire chez les dyscalculiques. Autrement dit, c'est l'accès au sens du nombre via les codes symboliques qui leur poserait initialement problème. Ce ne serait que plus tardivement dans le développement des dyscalculiques que ces difficultés en lien avec les représentations symboliques auraient un impact négatif sur les possibilités d'élaboration des représentations numériques approximatives (SNA), ce qui aurait pour conséquence une atteinte du sens du nombre. Selon Lafay et al., (2014), certains auteurs pensent que les enfants dyscalculiques présentent un déficit de traitement des représentations

mentales des nombres symboliques et non symboliques dans leurs premières années scolaires puis, en grandissant, ce déficit serait observable uniquement sur le traitement des représentations mentales du nombre (Andersson et Östergren, (2012) ; De Smedt & Gilmore (2011) ; Desoete, Ceulemans, De Weerd, & Pieters, (2012)).

Pour résumer, ce trouble neurodéveloppemental qu'est la dyscalculie peut se présenter sous différentes formes, ce qui est à mettre en lien avec ses multiples causes. En effet, la dyscalculie peut être due à un déficit numérique entraînant une incapacité à construire une bonne représentation des nombres (dyscalculie primaire), mais elle peut aussi être la conséquence d'un autre déficit cognitif (dyscalculie secondaire). Les différentes hypothèses concernant le déficit numérique sous-jacent à la dyscalculie sont probablement le reflet de l'existence de différents types de dyscalculies primaires.

IV La dyscalculie et l'accès automatique aux grandeurs numériques.

Puisque certains auteurs évoquent la possibilité qu'un déficit d'accès au sens du nombre à partir des codes symboliques soit à l'origine de la dyscalculie, il est pertinent de s'intéresser à l'accès automatique aux grandeurs numériques chez les sujets dyscalculiques. Cette automaticité a d'abord été étudiée chez des sujets adultes avec dyscalculie développementale, puis chez des enfants dyscalculiques.

1 L'accès automatique aux grandeurs numériques chez l'adulte dyscalculique.

Les premiers, Rubinsten & Henik (2005) ont étudié l'accès automatique aux grandeurs numériques chez des adultes avec dyscalculie développementale. Ils ont utilisé une tâche de type Stroop numérique en code arabe. Les résultats ont mis en évidence un effet de congruence de taille significativement plus faible chez les adultes dyscalculiques par rapport aux adultes du groupe contrôle. Les auteurs estiment que l'effet de congruence de taille pour le groupe dyscalculique était comparable à celui d'enfants tout-venant en fin de 1ère année de primaire : l'effet de congruence de taille n'est apparu que sous la composante facilitation, et non sous la composante interférence. D'après cette étude, l'automaticité du lien entre représentation arabe et grandeurs numériques chez les adultes dyscalculiques serait donc immature. Des résultats semblables ont ensuite été trouvés par les mêmes auteurs un an plus tard (Ashkenazi, Rubinsten, & Henik (2009), Kadosh et al. (2007) ; Rubinsten & Henik, 2006). Rubinsten & Henik (2006) ont plus précisément cherché à s'assurer que la faiblesse de l'effet de congruence de taille obtenu au Stroop n'était pas liée à un déficit global de certaines fonctions exécutives, telles que l'inhibition ou la flexibilité, mais bien à l'immaturité de l'automaticité des traitements numériques. Pour cela, ils ont proposé à la fois une tâche de Stroop numérique (à partir de nombres arabes) et une tâche de Stroop à partir de lettres à un groupe d'adultes dyscalculiques et à un groupe d'adultes dyslexiques. Ils ont constaté que le groupe dyscalculique échouait le Stroop numérique, mais pas le Stroop alphabétique. Le groupe dyslexique présentait le tableau inverse. Puisque les difficultés du groupe dyscalculique ont porté spécifiquement sur la tâche impliquant des stimuli numériques, ces résultats suggèrent que ce ne sont pas les fonctions exécutives nécessaires à la réalisation d'une tâche de Stroop qui font défaut, mais que le déficit concerne bien spécifiquement le domaine numérique. Ashkenazi, Rubinsten, & Henik (2009) ont proposé deux Stroop numériques à un groupe dyscalculique et à un groupe contrôle : un Stroop numérique classique et un Stroop numérique avec charge cognitive ajoutée. Ils ont d'abord confirmé le déficit d'automaticité du groupe dyscalculique. Ils ont également découvert que les sujets dyscalculiques présentaient le même pattern de réponse au Stroop numérique classique que les sujets contrôle au Stroop numérique avec charge cognitive. Autrement dit, il semblerait que les

sujets dyscalculiques face à une tâche de Stroop numérique se comportent comme des sujets tout-venant à qui on impose une charge cognitive supplémentaire, comme s'ils souffraient d'un déficit attentionnel. À partir de ce constat, les auteurs proposent l'hypothèse de difficultés attentionnelles spécifiques à la dimension numérique chez les dyscalculiques adultes, en plus du déficit de traitement des nombres. D'un point de vue anatomo-fonctionnel, on remarque à l'imagerie à résonance magnétique fonctionnelle une sous-activation du sillon intrapariétal droit chez les sujets dyscalculiques lors d'une tâche de Stroop numérique (Kadosh et al., 2007).

Actuellement, il est donc avéré que les adultes dyscalculiques présentent un déficit d'automatisme du lien entre les nombres en code arabe et la grandeur numérique qui leur correspond.

2 L'accès automatique aux grandeurs numériques chez l'enfant dyscalculique.

Au regard des conclusions apportées par les études chez l'adulte dyscalculique, on pourrait formuler l'hypothèse que les enfants dyscalculiques présentent également un déficit d'accès automatique aux grandeurs numériques.

Rousselle & Noël (2007) ont proposé différentes tâches à quarante-cinq enfants belges en difficulté en mathématiques en 2ème année de primaire, dont un Stroop numérique. Les enfants choisis pour intégrer le groupe d'enfants en difficulté avaient tous obtenu un score inférieur au percentile 15 à un test de mathématiques et avaient été signalés par leur instituteur. Il faut préciser que la tâche de Stroop proposée a été élaborée de manière particulière : d'abord une paire de nombres arabes de taille identique apparaît, puis, après un délai plus ou moins long, la taille d'un des deux nombres se modifie. Ce délai, différent pour chaque participant, est calculé en tenant compte de la différence entre le temps nécessaire à l'enfant pour réaliser une comparaison physique de nombres arabes et le temps nécessaire pour réaliser une comparaison numérique de nombres arabes. Par ce procédé, l'objectif des auteurs est de prendre en considération les différences de vitesse de traitement pour que les informations numériques et les informations physiques aient autant de chances l'une que l'autre d'influencer le processus de décision. En effet, il semblerait que certains auteurs aient échoué à montrer un effet de congruence de taille parce que le traitement numérique de leurs participants n'était pas assez rapide pour interférer avec le traitement physique (Landerl, Bevan, & Butterworth, 2004). Les résultats de Rousselle & Noël (2007) montrent des effets de congruence de taille comparables dans le groupe d'enfants en difficulté et dans le groupe contrôle composé de sujets contrôle appariés. Selon les auteurs, cela suggère que l'accès automatique aux grandeurs numériques est bien présent chez les enfants en difficulté si les conditions sont adaptées à leur vitesse de traitement numérique, vitesse plus faible que celle des tout-venant. De même, Heine et al. (2010) ont soumis trois groupes d'enfants allemands en 3ème année de primaire à un Stroop numérique avec des nombres arabes : des enfants avec un niveau en mathématiques élevé, normal ou faible. L'effet de congruence de taille a été observé dans tous les groupes, quel que soit le niveau en mathématiques. Cependant, une différence significative a été observée : l'effet de congruence de taille présenté par les enfants avec un haut niveau en mathématiques présentait à la fois les composantes interférence et facilitation, alors que seule la composante interférence était présente dans les performances des groupes à niveau normal et faible. En revanche, on peut noter qu'aucune différence significative n'a été observée entre les enfants dont le niveau en mathématiques est normal et les enfants faibles. Les auteurs signalent donc que leurs résultats sont difficiles à concilier avec l'hypothèse du déficit d'automatisme d'accès aux grandeurs numériques chez les enfants en difficultés mathématiques.

L'étude de Landerl & Kölle (2009) apporte un regard différent sur le sujet. Elle a inclus cinquante et un enfants allemands dyscalculiques (scores inférieurs ou égaux à -1,65

écarts-types à un test de mathématiques) en 1^{ère}, 2^{ème} et 3^{ème} année de primaire et un groupe d'enfants contrôle. Les tâches expérimentales proposées étaient une comparaison numérique analogique, des comparaisons de nombres arabes à un et deux chiffres ainsi qu'un Stroop numérique. En premier lieu, les enfants du groupe dyscalculique se sont montrés moins efficaces aux tâches de comparaison intentionnelle (comparaisons analogique et arabe). Il est aussi important de souligner qu'aucun effet de congruence de taille n'a été observé chez les enfants dyscalculiques lors de la tâche de Stroop, contrairement aux enfants contrôle qui ont présenté cet effet dès la 2^{ème} année. Ces résultats valideraient donc l'hypothèse d'un déficit d'automatisme d'accès aux grandeurs numériques chez les enfants dyscalculiques. Cependant, l'étude longitudinale de Landerl (2013) qui a suivi des enfants allemands dyscalculiques et contrôles de la 2^{ème} à la 4^{ème} année de primaire a mis en évidence un effet de congruence de taille pour le groupe dyscalculique comme pour le groupe contrôle dès la 2^{ème} année. De plus, aucune différence qualitative entre les effets de congruence de taille des deux groupes n'était visible puisque les effets observés présentaient pour les deux groupes à la fois les composantes interférence et facilitation. Cette dernière étude contredit donc les résultats de Landerl & Kölle (2009) en invalidant l'hypothèse d'un déficit d'accès automatique aux grandeurs numériques chez les enfants dyscalculiques.

Tableau 2. Récapitulatif des études portant sur l'automatisme chez l'enfant dyscalculique.

Auteurs / date	Population			Tâche	Effet de congruence
	N	Groupes et Age	Pays		
Rousselle et Noël, 2007.	45 par groupe.	En difficultés en mathématiques, Contrôle. 2 ^{ème} année.	Belgique (francophone)	Stroop numérique.	En difficultés en mathématiques et contrôle : SCI*.
Landerl et Kölle, 2009.	51 pour le groupe dyscalculique, 262 pour le groupe contrôle.	Dyscalculique, Contrôle. 1 ^{ère} année, 2 ^{ème} année, 3 ^{ème} année.	Allemagne	Stroop numérique.	Contrôle, 1 ^{ère} année : pas de SCI*. Contrôle, 2 ^{ème} et 3 ^{ème} années : SCI* Dyscalculique, 1 ^{ère} , 2 ^{ème} et 3 ^{ème} années : pas de SCI*.
Heine, Tamm, De Smedt, 2010.	21 pour le groupe faible, 23 pour le groupe normal, 22 pour le groupe haut.	Niveau faible, Niveau normal, Haut niveau en mathématiques. 3 ^{ème} année.	Allemagne	Stroop numérique, Comparaison numérique de nombres arabes	Faible, normal et haut niveaux : SCI*.
Landerl, 2013.	41 par groupe.	Dyscalculique, Contrôle. Début de 2 ^{ème} année, Début de 3 ^{ème} année	Allemagne	Stroop numérique.	Dyscalculique et contrôle, 2 ^{ème} année : SCI*.

*SCI : Size Congruity effect (« effet de congruence de taille »)

Pour résumer, contrairement aux résultats obtenus avec les adultes dyscalculiques, les conclusions des études sur les enfants dyscalculiques sont nuancées. Parmi les études qui se sont intéressées à l'accès automatique aux grandeurs numériques chez les enfants dyscalculiques, la plupart n'ont pas mis en évidence de différence significative avec les enfants contrôle (Heine et al. (2010) ; Rousselle & Noël (2007) ; Landerl (2013)). Les résultats d'une seule étude valideraient l'hypothèse selon laquelle les enfants dyscalculiques présentent un déficit d'automatisme d'accès aux grandeurs numériques (Landerl & Kölle, 2009). Parmi ces différents travaux, un seul porte sur une population d'enfants francophones (Rousselle & Noël, 2007) et il n'existe aucune donnée spécifique aux enfants français. Il est intéressant de souligner à nouveau que l'accès automatique aux grandeurs numériques n'a été étudié qu'à partir du code arabe, chez les enfants tout-venant comme chez les enfants dyscalculiques. Jamais une étude n'a proposé d'investiguer l'automatisme d'accès aux grandeurs numériques à partir du code oral.

Chapitre II

PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES

I Notions théoriques clés et question de recherche.

De ces différentes données de la littérature émanent quelques notions clés qui serviront le socle théorique à la présente recherche.

Tout d'abord, le modèle du Triple Code (Dehaene, 1992) propose une distinction entre code analogique (représentation non-symbolique des quantités), code visuel arabe et code auditif verbal (représentations symboliques).

En ce qui concerne l'automatisme, selon Henik & Tzelgov (1982), l'effet de congruence de taille du paradigme du Stroop numérique permet de mettre en évidence l'accès automatique aux grandeurs numériques via un code symbolique. D'ailleurs, l'accès automatique aux grandeurs numériques à partir du code arabe apparaît au plus tard à l'âge de 8 ans chez l'enfant tout-venant (Ben-Shalom et al. (2013), Girelli et al. (2000), Mussolin & Noël (2007), Rubinsten et al. (2002), White et al. (2012) et Zhou, Chen, Chen, Jiang, Zhang (2007)).

Deux hypothèses sont en concurrence pour expliquer l'origine de la dyscalculie développementale primaire : hypothèse du déficit du sens du nombre (Dehaene, 1992) et hypothèse du déficit d'accès au sens du nombre (Noël & Rousselle, 2011). Selon l'hypothèse du déficit d'accès, les enfants dyscalculiques présentent un déficit des processus numériques intentionnels à partir des codes symboliques. Les différentes études ne font pas consensus autour de l'existence ou non d'un accès automatique aux représentations numériques via un code symbolique chez l'enfant dyscalculique. De plus, jamais encore un Stroop numérique n'a été effectué en modalité orale (code auditif verbal), tant chez l'adulte, chez l'enfant, qu'auprès de sujets dyscalculiques. On ignore donc s'il existe un accès automatique aux grandeurs numériques à partir du code oral.

Des réflexions énoncées ci-dessus découle la question de recherche suivante : Existe-t-il un déficit de l'accès automatique aux grandeurs numériques via les codes symboliques arabe et oral chez l'enfant dyscalculique ?

II Objectifs

1 Objectif principal.

La question de recherche énoncée ci-dessus implique un objectif principal : identifier s'il existe un déficit d'accès automatique aux grandeurs numériques via les codes numériques symboliques chez les enfants dyscalculiques.

Cet objectif principal induit deux objectifs de recherche. Pour y parvenir, des étapes sont nécessaires. C'est la raison pour laquelle des objectifs préalables sont présentés.

2 Objectifs préalables.

Le premier objectif préalable (appelé « objectif préalable A ») est d'identifier s'il existe un déficit du sens du nombre chez les enfants dyscalculiques. Le second objectif préalable (« objectif préalable B ») a pour objet d'identifier s'il existe un déficit d'accès intentionnel (par opposition à l'accès automatique) au sens du nombre via le code arabe chez les enfants dyscalculiques. Pour finir, le troisième objectif préalable (« objectif préalable C ») est d'identifier s'il existe un déficit d'accès intentionnel au sens du nombre à partir du code oral chez les enfants dyscalculiques.

3 Objectifs de recherche.

Deux objectifs de recherche découlent de l'objectif principal de cette étude. Le premier objectif de recherche (nommé « objectif de recherche 1 ») vise à identifier s'il existe un déficit de l'accès automatique aux grandeurs numériques via le code arabe chez les enfants dyscalculiques. Le second objectif de recherche (« objectif de recherche 2 ») est d'identifier s'il existe un déficit de l'accès automatique aux représentations numériques via le code oral chez les enfants dyscalculiques.

III Hypothèses théoriques.

A chacun des objectifs énoncés ci-dessus correspond une hypothèse. L'hypothèse générale est la suivante : les enfants dyscalculiques présenteraient un déficit de l'accès automatique aux grandeurs numériques à partir des codes symboliques arabe et oral.

1 Hypothèses préalables

Selon la première hypothèse préalable (nommée « hypothèse préalable A »), les enfants dyscalculiques ne présenteraient pas de déficit du sens du nombre, en référence à l'hypothèse du déficit d'accès au sens du nombre (Noël & Rousselle, 2011). La seconde hypothèse (« hypothèse préalable B ») stipule que les enfants dyscalculiques présenteraient un déficit d'accès intentionnel aux grandeurs numériques à partir du code arabe. Selon la troisième hypothèse préalable (« hypothèse préalable C »), les enfants dyscalculiques présenteraient un déficit d'accès intentionnel aux représentations numériques à partir du code oral.

2 Hypothèses de recherche

Deux hypothèses de recherche sont formulées en lien avec les deux objectifs de recherche. La première hypothèse de recherche (« hypothèse de recherche 1 ») est la suivante : les enfants dyscalculiques présenteraient un déficit d'accès automatique aux représentations numériques à partir du code arabe. Selon la seconde hypothèse (« hypothèse de recherche 2 »), les enfants dyscalculiques présenteraient un déficit d'accès automatique aux grandeurs numériques à partir du code oral.

IV Hypothèses opérationnelles.

En lien avec chacune des hypothèses théoriques sont formulées des hypothèses opérationnelles.

1 Hypothèses opérationnelles préalables.

La première hypothèse opérationnelle préalable (« hypothèse opérationnelle préalable A ») suppose qu'à la tâche de comparaison analogique, les scores et les temps de réponse des enfants du groupe dyscalculique (DC) seraient similaires à ceux des enfants du groupe contrôle (Ctrl). La deuxième hypothèse opérationnelle (« hypothèse opérationnelle préalable B ») admet qu'à la tâche de comparaison numérique arabe, les scores des enfants du groupe DC seraient moins bons que ceux des enfants du groupe Ctrl et/ou leurs temps de réponse seraient allongés par rapport à ceux des enfants du groupe Ctrl. Pour finir, la troisième hypothèse opérationnelle préalable (« hypothèse opérationnelle préalable C ») présume qu'à la tâche de comparaison numérique orale, les scores des enfants du groupe DC seraient moins bons que ceux des enfants du groupe Ctrl et/ou leurs temps de réponse seraient allongés par rapport à ceux des enfants du groupe Ctrl.

2 Hypothèses opérationnelles de recherche

Deux hypothèses opérationnelles sont énoncées pour répondre à notre étude. La première (« hypothèse opérationnelle de recherche 1 ») stipule qu'à la tâche de Stroop numérique en modalité arabe, aucun effet de congruence de taille ne serait présent dans les performances des enfants du groupe DC. Autrement dit, aucune baisse des scores ni aucun allongement du temps de réponse aux items non congruents (par rapport aux items congruents et neutres) ne serait observé. La seconde hypothèse opérationnelle de recherche (« hypothèse opérationnelle de recherche 2 ») présume qu'à la tâche de Stroop numérique en modalité orale, aucun effet de congruence de taille ne serait présent dans les performances des enfants du groupe DC. Autrement dit, aucune baisse des scores ni aucun allongement du temps de réponse aux items non congruents (par rapport aux items congruents et neutres) ne serait observé.

Tableau 3. Récapitulatif des objectifs et hypothèses.

<u>Objectif</u>	<u>Hypothèse théorique</u>	<u>Hypothèse opérationnelle</u>
<u>Objectif principal :</u> Un déficit d'accès automatique aux grandeurs numériques via les codes numériques symboliques chez l'enfant dyscalculique ?	Un déficit d'accès automatique aux grandeurs numériques à partir des codes symboliques chez l'enfant dyscalculique.	En Stroop numériques arabe et oral, aucun effet de congruence de taille pour les DC (ni baisse des scores ni allongement du temps de réponse aux items non-congruents), mais effet de congruence de taille pour les Ctrl.
<u>Objectif préalable A :</u> Déficit du sens du nombre chez l'enfant dyscalculique ?	Pas de déficit du sens du nombre.	En comparaison analogique, scores et temps de réponse des DC similaires à ceux des Ctrl.
<u>Objectif préalable B :</u> Un déficit d'accès intentionnel au sens du nombre via le code arabe chez l'enfant dyscalculique ?	Un déficit d'accès intentionnel au sens du nombre à partir du code arabe.	En comparaison numérique arabe, scores des DC moins bons que ceux des Ctrl et/ou temps de réponse allongés.
<u>Objectif préalable C :</u> Un déficit d'accès intentionnel au sens du nombre via le code oral chez l'enfant dyscalculique ?	Un déficit d'accès intentionnel au sens du nombre à partir du code oral.	En comparaison numérique orale, scores des DC moins bons que ceux des Ctrl et/ou temps de réponse allongés.
<u>Objectif de recherche 1 :</u> Un déficit de l'accès automatique aux grandeurs numériques via le code arabe chez l'enfant dyscalculique ?	Un déficit d'accès automatique au sens du nombre à partir du code arabe.	En Stroop numérique arabe, aucun effet de congruence de taille pour les DC (ni baisse des scores ni allongement du temps de réponse aux items non-congruents).
<u>Objectif de recherche 2 :</u> Un déficit de l'accès automatique aux grandeurs numériques via le code oral chez l'enfant dyscalculique ?	Un déficit d'accès automatique au sens du nombre à partir du code oral.	En Stroop numérique oral, aucun effet de congruence de taille pour les DC (ni baisse des scores ni allongement du temps de réponse aux items non-congruents).

Chapitre III

PARTIE EXPERIMENTATION

I Participants.

1 Critères d'inclusion et d'exclusion de la population.

Les critères d'inclusion des participants à l'étude sont le niveau scolaire, l'âge et la langue des participants. Les enfants recrutés étaient scolarisés en classe de CE2, CM1 ou CM2, ils avaient entre 8 et 12 ans et leur langue maternelle était le français (bilinguisme accepté).

Les critères d'exclusion sont les suivants : trouble auditif, trouble visuel non-corrigé, déficience intellectuelle, déficience motrice, trouble psychiatrique, trouble de l'attention avec ou sans hyperactivité non médicamenté, trouble spécifique du langage et trouble praxique.

2 Caractéristiques de la population.

Tableau 4. Caractéristiques de la population.

Groupe	Contrôle (n=46)	Difficultés Subjectives en Mathématiques (n=21)	Dyscalculique (n=11)
Age moyen.	9 ans 11 mois (118.6 mois)	10 ans (120.6 mois)	10 ans 4 mois (124.5 mois)
Sexe :			
- Féminin	n= 25	n= 18	n= 6
- Masculin	n= 21	n= 3	n= 5
Classe :			
- CE2	n= 13	n= 2	n= 4
- CM1	n= 18	n= 8	n= 6
- CM2	n= 15	n= 11	n= 1
Latéralité :			
- Droite	n= 39	n= 18	n= 9
- Gauche	n= 7	n= 3	n= 2

3 Groupe contrôle et groupes expérimentaux.

3.1 Constitution du groupe contrôle.

Les enfants du groupe contrôle (Ctrl) ont été recrutés dans le cadre scolaire. Les passations ont eu lieu en école élémentaire, dans deux établissements différents (un dans le Rhône et un dans les Alpes de Haute Provence). Afin d'obtenir un échantillon le plus proche de la norme possible, les enfants ayant doublé ou sauté une classe ont été exclus. Les enfants bénéficiant d'une rééducation orthophonique de « dyscalculie ou de troubles logico-mathématiques », ceux obtenant un score pathologique, c'est-à-dire inférieur à -1,65 écarts-types, à une batterie d'habiletés mathématiques (Zareki-R. M. Von Aster, 2006. Adaptation française par G. Dellatolas) développé dans « Matériel ») et ceux obtenant un score pathologique, c'est à dire inférieur ou égal au percentile 10, à un test de raisonnement non verbal (Raven, 1977), ont également été exclus.

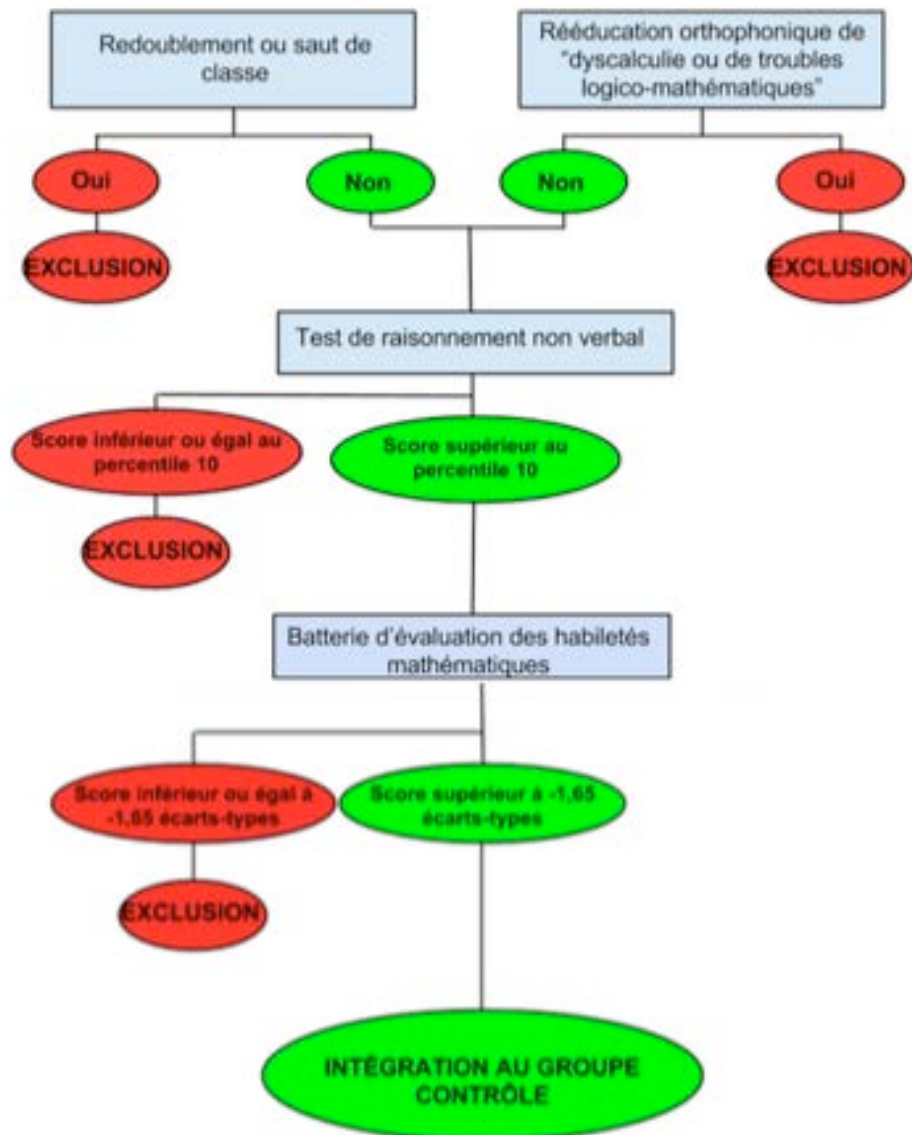


Figure 4 : Protocole de recrutement groupe Ctrl

3.2 Constitution des groupes expérimentaux.

Les enfants des groupes expérimentaux ont été recrutés par l'intermédiaire d'orthophonistes exerçant en libéral. Les orthophonistes sollicitées ont alors recensé leurs patients volontaires pour participer à l'étude. Il s'agissait d'enfants qui suivaient une « rééducation de dyscalculie ou de troubles logico-mathématiques », selon les termes de la nomenclature. Les enfants ayant obtenu un score pathologique, c'est à dire inférieur ou égal au percentile 10, à un test de raisonnement non verbal (Raven, 1977) ont été exclus. Parmi ces enfants, certains ont présenté un score Z au Zareki-R inférieur ou égal à -1,65 écarts-types, d'autres obtenaient un score Z supérieur à ce seuil. Sur ce critère, deux groupes expérimentaux distincts ont été constitués : un groupe nommé « dyscalculique » (DC), présentant à la fois une plainte en mathématiques, bénéficiant d'un suivi orthophonique et présentant un score sous le seuil de suspicion de trouble, et un autre appelé « en difficultés subjectives en mathématiques » (DSM), présentant certes une plainte mathématiques et bénéficiant d'un suivi orthophonique, mais présentant un score au-dessus du seuil de suspicion de trouble. Le groupe DC rassemble les enfants qui ont

obtenu un score Z au Zareki-R inférieur ou égal à -1,65 écarts-types. Le groupe DSM est constitué d'enfants dont le score Z au Zareki était supérieur à -1,65 écarts-type.

Pour résumer, les deux critères de constitution des groupes sont le suivi orthophonique pour « rééducation de dyscalculie ou de troubles logico-mathématiques » et le score Z obtenu au Zareki-R (M. Von Aster, 2006. Adaptation française par G. Dellatolas). Le groupe Ctrl est constitué d'enfants qui ne bénéficient pas de « rééducation de dyscalculie ou de troubles logico-mathématiques » et dont les habiletés mathématiques sont correctes (score Z au Zareki-R non pathologique). Le groupe DSM est composé d'enfants suivis pour « rééducation de dyscalculie ou de troubles logico-mathématiques » et dont les habiletés mathématiques sont correctes selon le Zareki-R (score Z non pathologique). Enfin, le groupe DC est formé par les enfants qui à la fois bénéficient d'une « rééducation de dyscalculie ou de troubles logico-mathématiques » et présentent un déficit des habiletés en mathématiques (score Z au Zareki-R inférieur ou égal à -1,65 écarts-types). L'effectif du groupe Ctrl est de 46, celui du groupe DSM est de 21, celui du groupe DC est de 11.

Le groupe DSM est un groupe exploratoire, constitué *a posteriori*, suite aux expérimentations. En effet, il a été choisi de ne pas exclure de l'étude des enfants présentant une plainte en mathématiques et bénéficiant d'un suivi orthophonique, malgré le fait qu'ils n'aient pas de scores inférieurs au seuil pathologique. Pour cette raison, aucune hypothèse ne les concernant spécifiquement n'avait été précédemment formulée. S'il s'agit d'enfants tout-venant simplement faibles en mathématiques, alors l'hypothèse les concernant est que leur profil soit similaire à ceux des Ctrl. En revanche, s'il s'agit en fait d'enfants présentant une forme de dyscalculie, l'hypothèse les concernant est que leur profil soit semblable à celui des DC.

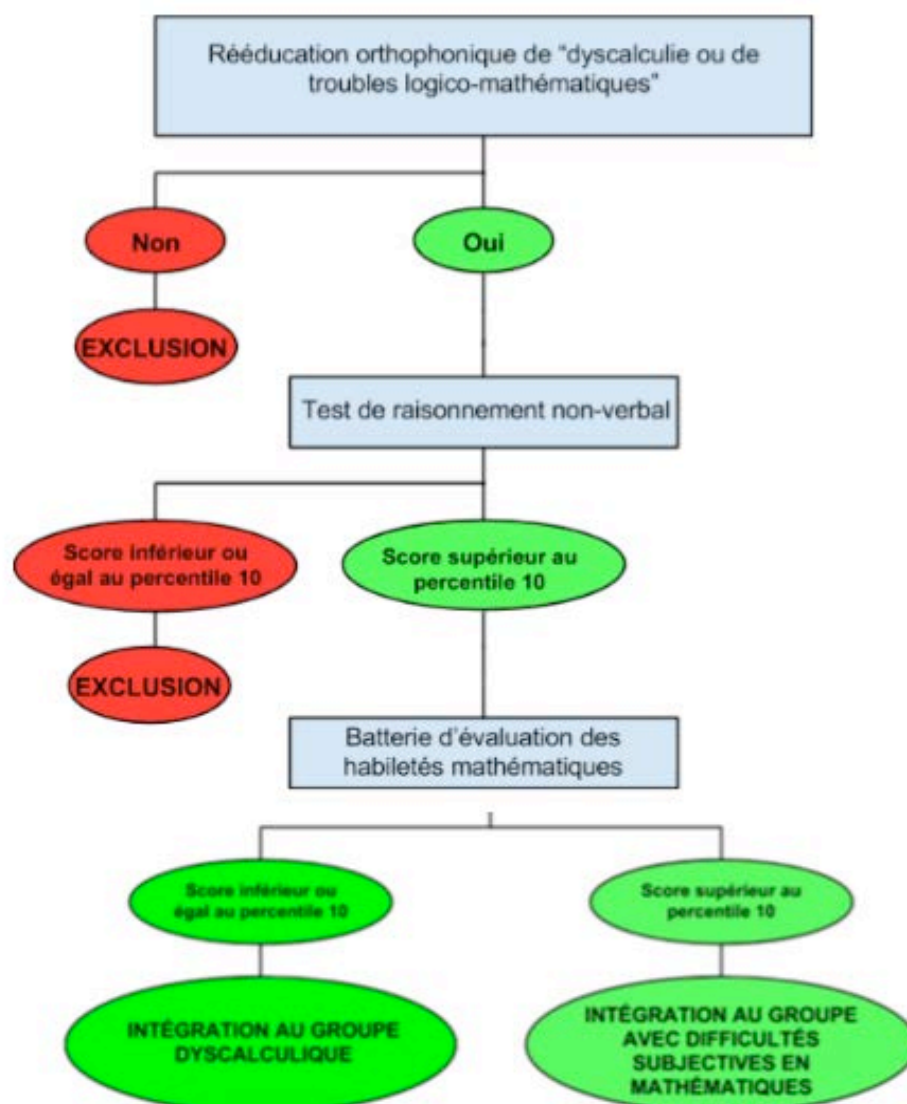


Figure 5 : Protocole de recrutement groupes DC et DSM.

II Matériel.

1 Evaluation cognitive.

Le protocole de passation inclut des épreuves destinées à l'évaluation cognitive des participants dans le but de caractériser au mieux leur profil cognitif général.

1.1 Habiletés mathématiques.

Afin d'objectiver les habiletés mathématiques de chaque participant, le Zareki-R (M. Von Aster, 2006. Adaptation française par G. Dellatolas) a été proposé. Il s'agit d'une batterie pour l'évaluation du traitement des nombres et du calcul chez l'enfant. La note totale au Zareki-R est obtenue par la somme de onze épreuves mathématiques :

dénombrement de points, comptage oral à rebours, dictée de nombres, calcul mental oral (additions, soustractions, multiplications), lecture de nombres, positionnement de nombres sur une échelle, comparaison de deux nombres présentés oralement, estimation visuelle de quantités, estimation qualitative de quantités en contexte, problèmes arithmétiques présentés oralement, comparaison de deux nombres écrits.

Cependant, les caractéristiques de l'échantillon d'étalonnage français du Zareki-R ne correspondent pas à celles de la population de cette étude. En effet, 50,6 % de l'échantillon d'étalonnage du Zareki-R est constitué d'enfants scolarisés en établissements situés en Zone d'Education Prioritaire ZEP et 28 % n'est pas de langue maternelle française. De plus, cette batterie a été étalonnée de janvier à mars. Afin d'obtenir un étalonnage plus conforme à l'échantillon de la présente étude, il a été choisi d'établir une référence qui lui soit spécifique et respectant davantage les critères d'une normalisation (tous les enfants sont francophones par exemple), sur la base des résultats des enfants rencontrés en école dans le cadre de cette étude. A partir de cet étalonnage, il a ensuite été attribué à chaque enfant un score Z obtenu au Zareki-R.

1.2 Raisonnement non verbal.

Il a été décidé d'obtenir pour chaque enfant une valeur de raisonnement non verbal, elle-même corrélée au quotient intellectuel (Wilkes & Weigel, 1998) Dans ce but, Les Matrices Progressives Colorées de Raven (Raven, 1977) ont été incluses au protocole. Elles ont été administrées selon les consignes du manuel PM-47C. Ce test est composé de 36 items répartis en trois ensembles. Chaque page représente un dessin dont une partie manque. L'enfant doit choisir parmi les six morceaux situés en bas de la page celui qui complète le dessin. L'examineur comptabilise les réponses justes (score max. = 36). Cela a permis d'objectiver le niveau de raisonnement non verbal de chaque participant. Ainsi, les enfants présentant un niveau situé sous le percentile 10 ou égal au percentile 10 ont été supprimés des analyses.

1.3 Identification de mots écrits.

Afin d'évaluer le niveau d'identification de mots écrits de chaque participant, L'Alouette (Lefavrais, 1967) a été administrée. Ce test consiste à lire à haute voix un texte standard dont la signification est peu évidente. Il est demandé de combiner vitesse et exactitude. La lecture est interrompue après 3 minutes (à moins que l'enfant n'ait terminé de lire le texte avant cette limite). L'examineur note les erreurs, le nombre de mots lus et la durée de la lecture. La cotation prend en compte ces trois éléments pour aboutir à un niveau de lecture en âge. Ainsi, le niveau de lecture des participants à cette étude est contrôlé.

1.4 Inhibition.

Un score d'inhibition a été obtenu pour chaque participant grâce au subtest Inhibition de la NEPSY II (Korkman, Kirk, Kemp, 2012). Cette épreuve est composée de deux parties : Formes et Flèches. Chacune comprend trois étapes, mais seules les deux premières ont été analysées pour cette étude. La première étape consiste à dénommer la forme (rond ou carré) ou la direction dans laquelle pointe la flèche (en haut ou en bas). Lors de la deuxième étape, il est demandé à l'enfant d'énoncer la forme ou la direction opposée à celle de chaque item (dire « rond » quand il voit un carré par exemple). L'enfant doit combiner vitesse et exactitude. Pour chaque étape, des items d'exemples sont prévus. Les tâches sont composées de 40 items. L'examineur chronomètre et comptabilise les erreurs et les autocorrections. Deux scores sont ainsi obtenus : un score de dénomination rapide (score max. = 40) et un score d'inhibition (score max. = 40).

1.5 Mémoire à court terme et mémoire de travail auditivo-verbale.

Afin d'obtenir un score en mémoire à court terme et de travail auditivo-verbale, les résultats de l'épreuve Mémorisation et Répétition Orale de Nombres du Zareki-R (M. Von Aster, 2006) ont été recueillis. Cette épreuve est constituée de deux subtests : Répétition de nombres à l'endroit et Répétition de nombres à l'envers. Pour chacun, les items sont des suites de nombres énoncées par l'examineur que l'enfant doit répéter dans l'ordre pour le premier subtest et à l'envers pour le second. Ces suites sont de longueur croissante au fil du subtest. L'examineur comptabilise le nombre d'items réussis (score max. empan endroit = 12 ; score max. empan envers = 12).

2 Tâches expérimentales.

Dans le but de tester les hypothèses de l'étude, sept tâches expérimentales informatisées ont été mises au point et programmées avec le logiciel DMDX (Forster & Forster, 2003). Pour que chaque participant puisse donner ses réponses, certaines touches des ordinateurs utilisés ont été colorées : une gommette bleue a été placée sur la touche « alt gauche » du clavier, une gommette jaune sur la touche « alt droit », une gommette rouge sur la touche « ctrl » à droite du clavier et une gommette verte sur la touche « ctrl » à gauche du clavier.

2.1 Description des tâches.

Pour chacune des tâches expérimentales, l'enfant est face à un écran d'ordinateur. Au lancement de la tâche, la consigne s'affiche à l'écran. La consigne est lue à l'enfant et des explications orales sont données de façon à s'assurer de la bonne compréhension. Puis, à chaque item de la tâche, l'enfant doit appuyer sur une des touches de couleur pour donner sa réponse. Les temps de réponse et les réponses de l'enfant sont enregistrés directement par le programme informatique.

Pour les cinq tâches de comparaison (décrites ci-après), trois items d'exemple sont proposés pour commencer. Les items de ces cinq tâches sont présentés dans un ordre randomisé. Chaque item reste à l'écran jusqu'à la réponse de l'enfant, suivie par une durée de 500 millisecondes. L'image disparaît après 4000 millisecondes si l'enfant ne répond pas. Le nombre de réponses à droite et le nombre de réponses à gauche sont identiques.

2.1.1 Tâches de réaction motrice.

a Tâche de réaction motrice droite.

Cette tâche a été créée afin d'obtenir le temps de réaction avec la main droite de chaque enfant. La consigne qui s'affiche est la suivante : « Appuie sur **la touche rouge** dès que tu vois la lettre X à l'écran. Appuie une seule fois, le plus rapidement possible. Quand tu es prêt, appuie sur ESPACE pour commencer. » Une croix de fixation est présentée à l'écran et l'enfant doit presser la touche rouge avec son index droit. Vingt croix sont présentées avec quatre délais différents entre chaque stimulus : 250, 500, 1000 ou 1500 millisecondes. La variable dépendante mesurée est le temps de réponse.

b Tâche de réaction motrice gauche.

Cette tâche est en tout point similaire à la tâche de réaction motrice droite, à la seule différence près que l'enfant doit presser la touche verte avec son index gauche.

De même, la consigne qui s'affiche est la suivante : « Appuie sur la touche **verte** dès que tu vois la lettre X à l'écran. Appuie une seule fois, le plus rapidement possible. Quand tu es prêt, appuie sur ESPACE pour commencer. »

2.1.2 Tâches de comparaison numérique.

a Tâche de comparaison numérique analogique.

Cette tâche a été créée afin d'obtenir des données sur les habiletés de comparaison analogique de chaque participant. La consigne qui s'affiche est la suivante : « Tu vas voir deux images : une avec des points bleus et une avec des points jaunes. Quelle image a le plus de points ? Pour répondre, appuie sur la touche **bleue à gauche** ou **jaune à droite**. Appuie une seule fois, le plus rapidement possible. Quand tu es prêt, appuie sur ESPACE pour commencer les exemples. »

Cette tâche est composée de vingt-quatre paires d'images de points. Les points sont de tailles différentes car la surface couverte par les points est contrôlée (les deux images de chaque paire présentent des surfaces couvertes par les points égales) grâce à un programme développé par Price, Palmer, Battista & Ansari (2012). Les deux images sont séparées de 2 centimètres.

Les items ont été créés en tenant compte du système numérique et de la distance numérique. Ainsi, douze paires relèvent du Système Numérique Précis (SNP) et douze du Système Numérique Approximatif (SNA). De même, pour douze paires, la distance numérique entre les nombres est de 1. Pour les douze autres, la distance numérique est de 3 (cf. Annexe II, 1).

Les variables dépendantes mesurées sont la précision de réponse et le temps de réponse.

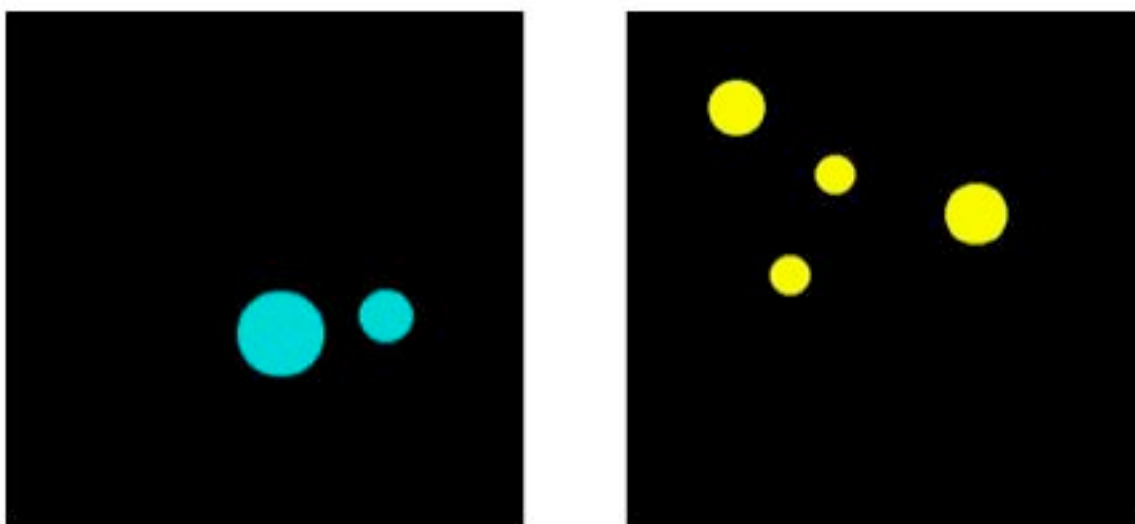


Figure 6 : Exemple d'item tâche de comparaison numérique analogique.

b Tâche de comparaison numérique de nombres arabes.

Cette tâche a été créée afin d'obtenir des données sur les habiletés de comparaison numérique de nombres arabes de chaque participant. La consigne qui s'affiche est la suivante : « Tu vas voir deux nombres. Quel est le plus grand nombre ? Pour répondre, appuie sur la touche **bleue à gauche** ou **jaune à droite**. Appuie une seule fois, le plus rapidement possible. Quand tu es prêt, appuie sur ESPACE pour commencer les exemples. » Oralement, il est bien précisé à l'enfant qu'il doit désigner le plus grand nombre sur le plan numérique, et non pas le plus grand nombre en taille physique.

Cette tâche est composée de vingt-quatre paires de nombres en code arabe (de 1 à 9). La répartition des items est identique à celle de la tâche analogique (cf. Annexe II, 1).



Figure 7 : Exemple d'item tâche de comparaison numérique de nombres arabes.

c Tâche de comparaison numérique de nombres oraux.

Cette tâche a été créée afin d'obtenir des données sur les habiletés de comparaison numérique de nombres oraux de chaque participant. La consigne qui s'affiche est la suivante : « Tu vas voir deux casques parce que tu vas entendre deux nombres. Quel est le plus grand nombre ? Pour répondre, appuie sur la touche **bleue à gauche** ou **jaune à droite**. Appuie une seule fois, le plus rapidement possible. Quand tu es prêt, appuie sur ESPACE pour commencer les exemples. »

Les stimuli et la procédure sont similaires à ceux de la tâche de comparaison numérique analogique et de nombres arabes (cf. Annexe II, 1). Les vingt-quatre paires de nombres en code oral (de /un/ à /neuf/) sont énoncées successivement et les deux nombres de chaque paire sont séparés par 1000 ms. Les stimuli ont été enregistrés en chambre sourde. Les paires ont été réalisées avec le logiciel Praat (Boersma, Paul (2001).

L'écoute des nombres oraux est accompagnée d'un support visuel : une paire de casques audio s'affiche à l'écran (celui de gauche est bleu, celui de droite est jaune).



Figure 8 : Exemple d'item tâche de comparaison numérique de nombres oraux.

*Sur l'écran n'apparaît que l'image des deux casques. Dans cet exemple, [deux] et [quatre] ne sont pas affichés, mais présentés de manière auditive.

2.1.3 Tâches de Stroop numérique.

a Tâches de Stroop numérique en modalité arabe.

Cette tâche de type Stroop numérique est une comparaison physique de nombres arabes. Elle a été créée pour analyser l'automatisme d'accès aux grandeurs numériques à partir des nombres arabes des participants. La consigne qui s'affiche est la suivante : « Tu vas voir deux nombres. Quel nombre est écrit avec la plus grande écriture ? Pour répondre, appuie sur la touche **bleue à gauche** ou **jaune à droite**. Appuie une seule fois, le plus rapidement possible. Quand tu es prêt, appuie sur ESPACE pour commencer les exemples. »

Cette tâche est composée de soixante-douze paires de nombres en code arabe (de 1 à 9). Les deux nombres de la paire ont une taille physique visiblement différente (1,2 cm vs. 2,5 cm, police noire). Les variables sont la congruence (item congruent, neutre ou non congruent), le système numérique (SNP ou SNA) et la distance numérique (distance de 0, de 1 ou de 3).

Dans cette étude, en modalité arabe, la congruence est définie comme suit : un item congruent est une paire pour laquelle le plus grand nombre de la paire physiquement est également le plus grand numériquement (ex : 1 vs 4). À l'inverse, un item non congruent est une paire pour laquelle le plus grand nombre physiquement est le plus petit numériquement (ex : 1 vs 4). Les items neutres sont des paires pour lesquelles les deux nombres présentés sont égaux numériquement (ex : 1 vs 1).

La répartition des items est la suivante : vingt-quatre paires sont des items neutres (distance numérique de 0), vingt-quatre sont congruentes et vingt-quatre sont non congruentes. De même, vingt-quatre paires ont une distance numérique de 0 (correspondant aux paires neutres), vingt-quatre ont une distance de 1 et vingt-quatre ont une distance numérique de 3. Concernant le système numérique, trente-six items relèvent du SNP et trente-six du SNA. Enfin, le côté de la réponse exacte est contrôlé : pour trente-six paires, la réponse correcte est le nombre de droite ; pour les trente-six autres, la bonne réponse est à gauche (cf. Annexe II, 2).

Les variables dépendantes mesurées sont la précision de réponse et le temps de réponse.

Compte-tenu du nombre important d'items, une pause est proposée à la moitié de l'épreuve.



Figure 9 : Exemple d'item tâche de Stroop numérique en modalité arabe.

b Tâches de Stroop numérique en modalité orale.

Cette tâche de Stroop numérique est une comparaison physique de nombres oraux. Elle a été créée pour analyser l'automatisme d'accès aux grandeurs numériques à partir des nombres oraux des participants. La consigne qui s'affiche est la suivante : «Tu vas voir deux images de casques parce que tu vas entendre deux nombres. L'un est fort, l'autre est faible. Quel nombre est dit avec la voix la plus forte ? Si c'est le premier nombre le plus fort, appuie sur la touche **bleue à gauche**. Mais si c'est le deuxième nombre le plus fort, appuie sur la touche **jaune à droite**. Appuie une seule fois, le plus rapidement possible. Quand tu es prêt, appuie sur ESPACE pour commencer les exemples. »

Cette tâche est composée de soixante-douze paires de nombres en code oral, énoncés successivement (de /un/ à /neuf/) et séparés par 1000 ms. Les deux nombres ont une intensité différente (50 dB vs. 70 dB). Les variables sont la congruence, le système numérique et la distance numérique. Les quantités d'items proposés et leur répartition sont les mêmes que pour la tâche Stroop numérique en modalité arabe (cf. Annexe II, 2). Les stimuli ont été enregistrés en chambre sourde. Les paires ont été réalisées avec le logiciel Praat (Boersma, Paul 2001).

Dans notre étude, en modalité orale, la congruence est définie comme suit : un item congruent est un item pour lequel le nombre dont l'intensité est la plus forte est également le nombre le plus grand numériquement ; un item non congruent est un item pour lequel le nombre dont l'intensité est la plus forte est numériquement le plus petit des deux nombres. Les items neutres sont des paires pour lesquelles les deux nombres entendus sont égaux numériquement.

Comme pour la tâche de comparaison numérique de nombres oraux, l'écoute des nombres oraux est accompagnée d'un support visuel : une paire de casques audio s'affiche à l'écran (celui de gauche est bleu, celui de droite est jaune).

Compte tenu du nombre important d'items, une pause est proposée à la moitié de l'épreuve.



Figure 10 : Exemple d'item tâche de Stroop numérique en modalité orale.

*Sur l'écran n'apparaît que l'image des deux casques. Dans cet exemple, [deux] et [quatre] ne sont pas affichés, mais présentés de manière auditive.

III Procédure.

1 Conditions de passation.

Les passations ont eu lieu entre le 5 mai et le 2 juillet 2014. Les passations des enfants du groupe contrôle se sont déroulées au sein de leur établissement scolaire. Pour rappel, deux établissements scolaires ont participé à l'étude : un dans le Rhône et un dans les Alpes de Haute Provence. Les enfants recrutés par l'intermédiaire d'un orthophoniste ont été rencontrés à leur domicile ou au cabinet de leur orthophoniste, selon une entente préalable avec leur famille. Le consentement parental (cf. Annexe III, 1 et Annexe III, 2) a été obtenu pour chaque participant. Les directeurs des deux écoles où ont eu lieu les passations du groupe contrôle ont également donné leur accord.

Les passations ont été effectuées individuellement en présence d'un expérimentateur (Emilie Julien ou Eve Marcon). Pour chacun, l'environnement était calme et propice à la concentration.

En moyenne, la passation de l'ensemble du protocole de test a duré quatre-vingt-dix minutes. Pour chaque participant, une pause d'une durée moyenne de dix minutes a été ménagée (en plus des très courtes pauses proposées au cours des tâches de Stroop numérique).

2 Ordre de passation.

L'ordre de passation des tâches du protocole complet est pseudo-randomisé, en appliquant deux contraintes : pas plus de deux tâches expérimentales ou pas plus de deux épreuves de l'évaluation cognitive successives et pas plus de deux tâches expérimentales ayant le même code (arabe ou oral) successives. De cette manière, dix ordres de passation différents ont été créés et appliqués successivement toutes les dix passations.

Chapitre IV

PRESENTATION DES RESULTATS

Les analyses statistiques obtenues en tâches cognitives mais également en tâches expérimentales ont été effectuées avec le logiciel de traitement statistique SPSS version 22 et Statistica version 6. En ce qui concerne l'analyse des post-hoc des effets, le test statistique de correction Bonferroni a été utilisé. En revanche, pour l'analyse des post-hoc des interactions, c'est le test statistique de correction Tukey qui a été utilisé.

I Age.

Une ANOVA (ANalysis Of VAriance) a été réalisée pour analyser l'âge des sujets selon le plan expérimental $S_{78} < G_3 >$ où S représente le facteur aléatoire Sujet, G représente le facteur fixe à mesures indépendantes Groupe à trois modalités (Contrôle vs. DC vs. DSM). L'analyse ne montre aucun effet de Groupe ($F(2,75)=2.77, p= 0.69$) : les trois groupes ont donc des âges moyens comparables.

II Tâches cognitives.

1 Evaluation cognitive.

1.1 Raisonnement non verbal.

Une ANOVA a été réalisée pour analyser les résultats aux Matrices Progressives de Raven selon le plan expérimental $S_{78} < G_3 >$ où S représente le facteur aléatoire Sujet et G représente le facteur fixe à mesures indépendantes Groupe à trois modalités (Contrôle vs. DC vs. DSM). L'analyse des scores montre un effet de Groupe significatif ($F(2,75)=5.63, p<.05$). L'analyse post-hoc révèle que les Ctrl et les DSM sont significativement meilleurs que les DC. Cette différence significative ne se retrouve pas entre les DSM et les Ctrl ($p= 1.00$).

1.2 Identification de mots écrits.

Une ANOVA a été réalisée pour analyser l'âge en mois de lecture à l'Alouette selon le même plan expérimental. L'analyse statistique révèle un effet de Groupe marginal ($F(2,75)= 3.05, p=.053$). L'analyse post-hoc montre que les Ctrl sont marginalement meilleurs que les DC ($p=.058$). Lorsque les scores de raisonnement non verbal est covariable des analyses (ANCOVA), l'effet décrit ci-dessus devient non significatif ($F(2,74)=1.85, p=.16$).

1.3 Inhibition.

1.3.1 Dénomination.

Une ANOVA a été réalisée pour analyser les résultats de l'épreuve Dénomination selon le même plan expérimental. L'analyse des scores à l'épreuve de dénomination ne montre aucun effet de groupe ($F(2,75) = 2.55, p=.085$).

1.3.2 Inhibition.

Une ANOVA a été réalisée pour analyser les résultats de l'épreuve Inhibition selon le même plan expérimental.

L'analyse des scores à l'épreuve d'inhibition montre un effet de Groupe significatif ($F(2,75)=9.76, p<.05$). L'analyse post-hoc révèle que les Ctrl sont significativement meilleurs que les DSM et les DC. Cette différence significative ne se retrouve pas entre les DSM et les DC ($p=.49$). Lorsque les scores de raisonnement non verbal est covariable des analyses (ANCOVA), l'effet décrit ci-dessus reste significatif ($F(2,74)= 7.58, p<.05$).

1.4 Mémoire à court terme et mémoire auditivo-verbale.

Une ANOVA a été réalisée pour analyser les résultats de l'épreuve de mémoire (comprenant la mémoire verbale à court terme et la mémoire de travail) selon le même plan expérimental.

L'analyse des scores à l'épreuve de mémoire montre un effet de Groupe significatif ($F(2,75)=9.22$, $p<.05$). L'analyse post-hoc révèle que les Ctrl sont significativement meilleurs que les DC mais également que les DSM sont significativement meilleurs que les DC. Cette différence significative ne se trouve pas entre les Ctrl et les DSM ($p=1.00$).

Une MANOVA a été réalisée pour analyser les sous-scores correspondant aux deux types de mémoire, à savoir mémoire verbale à court terme et mémoire de travail selon le même plan expérimental.

L'analyse révèle un effet de Groupe significatif en mémoire verbale à court terme ($F(2,75) = 4.40$, $p<.05$). Cependant, cet effet n'est pas retrouvé en mémoire de travail ($F(2,75) = 2.53$, $p=.086$).

2 Tests d'habiletés mathématiques.

Une ANOVA a été réalisée pour analyser le score total au Zareki-R selon le même plan expérimental que l'analyse du score aux Matrices Progressives de Raven. L'analyse montre un effet de Groupe significatif ($F(2,75)=32.60$, $p<.05$) sur le score total du Zareki-R. L'analyse post-hoc révèle que Ctrl ont significativement de meilleurs résultats que les DSM et les DC, mais également que les DSM ont de meilleurs résultats que les DC ($p<.05$). Lorsque les scores de raisonnement non verbal, d'inhibition, de mémoire verbale à court terme et l'âge de lecture sont covariables des analyses (ANCOVA), l'effet décrit ci-dessus reste significatif ($F(2,71)=15.75$, $p<.05$).

Une MANOVA a été réalisée pour analyser les sous-scores correspondant aux onze subtests mathématiques du Zareki-R selon le même plan expérimental.

L'analyse révèle un effet global de Groupe (test de Lambda-Wilks ; $F(22,130) = 3.77$, $p<.05$). Plus précisément, l'analyse montre un effet de Groupe significatif en Dénombrement ($F(2,75) = 3.94$, $p<.05$), Comptage ($F(2,75) = 6.74$, $p<.05$), Dictée ($F(2,75) = 9.07$, $p<.05$), Calcul mental oral ($F(2,75) = 26.08$, $p<.05$), Lecture ($F(2,75) = 3.76$, $p<.05$), Echelle, ($F(2,75) = 3.75$, $p<.05$), Comparaison orale ($F(2,75) = 9.02$, $p<.05$), Estimation ($F(2,75) = 5.94$, $p<.05$), Résolution de problèmes ($F(2,75) = 20.37$, $p<.05$), mais pas d'effet de Groupe pour les deux subtests Estimation contextuelle ($F(2,75) = 1.54$, $p=.22$), et Comparaison arabe ($F(2,75) = 0.99$, $p=.38$). Lorsque les scores de raisonnement non verbal, d'inhibition, de mémoire verbale à court terme et l'âge de lecture sont covariables des analyses (MANCOVA), l'effet de Groupe dans les épreuves de dénombrement, de comptage, de dictée, de calcul, de comparaison orale et de problème est resté significatif alors que l'effet de Groupe pour les épreuves de lecture de nombre, d'échelle, d'estimation et d'estimation en contexte n'apparaît plus comme significatif.

Tableau 5. Moyenne (écart type) des performances.

	Ctrl (n = 46)	DSM (n = 21)	DC (n = 11)
Âge en mois	118.4 (9.3)	124.5 (9.8)	120.6 (11.8)
Matrices Colorées de Raven	28.9 (3.0)	28.8 (3.5)	25.3 (3.3)
Alouette	114.4 (19.8)	107.5 (18.7)	99.5 (15.1)
Dénomination	10.2 (3.1)	9.0 (2.8)	8.1 (3.3)
Inhibition	10.8 (3.2)	8.5 (2.2)	6.9 (3.1)
Mémoire (MCT et MDT)	13.6 (2.6)	13.4 (2.3)	10.0 (2.5)
-Mémoire (MCT uniquement)	7.3 (1.7)	6.9 (1.2)	5.3 (1.5)
-Mémoire (MDT uniquement)	6.3 (1.7)	6.5 (1.5)	4.7 (1.8)

Zareki (score total)	138.8 (14.7)	129.3 (7.6)	104.2 (12.2)
- Dénomination	5.7 (0.6)	5.2 (0.9)	5.3 (0.7)
- Comptage	3.5 (0.7)	3.2 (1.1)	2.4 (1.4)
- Dictée	15.5 (1.3)	14.7 (1.5)	13.3 (2.7)
- Calcul	35.1 (6.8)	30.5 (5.2)	20.3 (5.0)
- Lecture	15.6 (1.1)	15.9 (0.4)	14.7 (2.1)
- Echelle	17.5 (4.4)	17.5 (2.1)	14.2 (2.7)
- Comparaison orale	14.5 (1.6)	13.0 (2.2)	12.1 (2.6)
- Estimation	4.1 (1.2)	3.9 (1.3)	3.4 (1.2)
- Estimation en contexte	8.5 (2.2)	8.5 (1.3)	6.0 (3.3)
- Problèmes	9.0 (3.1)	7.1 (2.3)	3.2 (2.2)
- Comparaison arabe	9.7 (0.6)	9.7 (0.6)	9.4 (0.8)

III Tâches expérimentales.

1 Tâches de réaction motrice.

Une ANOVA a été réalisée pour analyser les réponses correctes à la tâche de réaction motrice selon le plan expérimental $S_{78} < G_3 > * T_2$ où S représente le facteur aléatoire Sujet, G représente le facteur fixe à mesures indépendantes Groupe à trois modalités (Contrôle vs. DC vs. DSM) et T représente le facteur fixe à mesures répétées Tâche à deux modalités (Tâche de réaction motrice avec main droite vs. Tâche de réaction motrice avec main gauche).

L'analyse des temps de réponse montre un effet de Groupe significatif ($F(2,150)=5.34$, $p<.05$). En particulier, l'analyse des post-hoc montre que les Ctrl sont significativement plus rapides que les DC. Cette différence de temps de réponse n'est, en revanche, pas significative entre les DSM et les DC de même que pour les DSM et les Ctrl. Aucun autre effet ni aucune autre interaction ne sont significatifs. Lorsque les scores de raisonnement non verbal, d'inhibition, de mémoire verbale à court terme et l'âge de lecture sont covariables des analyses (ANCOVA), l'effet de Groupe décrit ci-dessus n'est pas resté significatif.

Tableau 6. Moyenne (Ecart-type) des performances aux Tâches de réaction motrice.

	Ctrl (n=46)	DSM (n=21)	DC (n=11)
Réaction motrice à droite	465.69 (136.94)	540.31 (144.44)	530.77 (120.01)
Réaction motrice à gauche	482.65 (136.00)	523.95 (128.95)	609.89 (201.10)
Total	474.17 (135.99)	532.13 (135.49)	570.33 (166.60)

2 Tâches de comparaison numérique.

2.1 Tâche de comparaison numérique analogique.

Une ANOVA a été réalisée pour analyser les réponses correctes et les temps de réponse (correctes) à la tâche de comparaison analogique selon le plan expérimental $S_{78} < G_3 > * Sy_2 * D_2 * R_2$ où S représente le facteur aléatoire Sujet, G représente le facteur fixe à mesures indépendantes Groupe à trois modalités (Contrôle vs. DC vs. DSM), Sy représente le facteur fixe à mesures répétées Système à deux modalités (SNP vs. SNA), D représente le facteur fixe à mesures répétées Distance à deux modalités (Distance 1 vs. Distance 3), et R représente le facteur fixe à mesures répétées Réponse à deux modalités (Droite vs. Gauche).

2.1.1 Analyse des scores.

L'analyse des scores ne montre aucun effet de Groupe ($F(2,600)= 0.60, p=.55$). En revanche, l'effet de Système ($F(1, 600)= 115.89, p<.05$) et l'effet de Distance ($F(1, 600)= 115.31, p<.05$) sont tous deux significatifs. Les trois groupes réussissent mieux à comparer des paires de nombres appartenant au SNP que des paires de nombres appartenant au SNA. De même, ils réussissent mieux à comparer des nombres éloignés (distance de 3) que proches (distance de 1). Une interaction Système x Distance significative est mise en évidence ($F(1, 600)= 55.12, p<.05$), indiquant que l'effet de Distance est d'autant plus important pour les paires du SNA que les paires appartenant au SNP. Aucun autre effet ni aucune autre interaction ne sont significatifs. Lorsque les scores de raisonnement non verbal, d'inhibition, de mémoire à court terme verbale et l'âge de lecture sont covariables des analyses (ANCOVA), les effets et interactions décrits ci-dessus sont restés significatifs.

2.1.2 Analyse des temps de réponse.

L'analyse des temps de réponse montre que l'effet de Groupe ($F(2, 600)= 3.68, p<.05$) est significatif. En particulier, l'analyse post-hoc montre que les Ctrl sont plus rapides que les DSM, mais aussi que les DC sont aussi rapides que les Ctrl et les DSM. De plus, l'effet de Système ($F(1, 600)= 35.54, p<.05$) et l'effet de Distance ($F(1, 600)= 19.32, p<.05$) sont significatifs. Les trois groupes sont plus rapides pour comparer des paires de nombres appartenant au SNP que des paires de nombres appartenant au SNA. Ils sont aussi plus rapides pour comparer des nombres éloignés (distance de 3) que proches (distance de 1). Une interaction Système x Distance marginale est mise en évidence ($F(1, 600)= 3.78, p=.05$). Aucun autre effet ni aucune autre interaction ne sont significatifs. Lorsque les scores de raisonnement non verbal, d'inhibition, de mémoire verbale à court terme et l'âge de lecture sont covariables des analyses (ANCOVA), les effets et interactions décrits ci-dessus sont restés significatifs à l'exception de l'effet de Groupe ($F(2,596)=1.42, p=.24$).

Tableau 7. Moyenne (Ecart-type) des performances à la tâche de comparaison analogique.

Système	Distance	Réponse	Ctrl (n=46)		DSM (n=21)		DC (n=11)	
			Score	Temps	Score	Temps	Score	Temps
SNP	1	Droite	.94 (.15)	1018.74 (152.84)	.90 (.24)	1102.65 (320.31)	.91 (.22)	1277.63 (262.60)
		Gauche	.93 (.16)	1077.04 (293.51)	.98 (.07)	1241.51 (218.90)	.94 (.13)	1165.01 (224.26)
	3	Droite	.99 (.05)	785.52 (175.61)	1.00 (.00)	950.33 (205.62)	1.00 (.00)	902.25 (171.83)
		Gauche	.99 (.07)	937.00 (192.17)	.98 (.07)	901.87 (174.31)	.97 (.10)	1099.44 (369.08)
	1	Droite	.65 (.28)	1276.01 (515.84)	.62 (.28)	1463.52 (890.26)	.70 (.38)	1237.24 (774.22)
		Gauche	.64 (.20)	1325.77 (408.75)	.60 (.33)	1275.56 (668.58)	.61 (.20)	1132.12 (448.47)
SNA	3	Droite	.96 (.13)	1129.09 (260.24)	.97 (.10)	1199.66 (292.99)	.85 (.23)	1257.77 (248.54)
		Gauche	.97 (.09)	1161.63 (277.01)	.92 (.15)	1253.01 (333.55)	.94 (.13)	1203.92 (284.74)
	Total		.88 (.21)	1088.85 (346.28)	.87 (.24)	1173.51 (477.81)	.86 (.23)	1159.42 (392.57)

2.2 Tâche de comparaison numérique arabe.

Une ANOVA a été réalisée pour analyser les réponses correctes et les temps de réponses (correctes) à la tâche de comparaison numérique de nombres arabes selon le même plan expérimental que la tâche de comparaison analogique.

2.2.1 Analyse des scores.

L'analyse des scores ne montre aucun effet de Groupe ($F(2,600) = 0.91, p = .40$). En revanche, l'effet de Système ($F(1,600) = 15.45, p < .05$) et l'effet de Distance ($F(1,600) = 19.33, p < .05$) sont tous deux significatifs. Les trois groupes réussissent mieux à comparer des paires de nombres appartenant au SNP que des paires de nombres appartenant au SNA. De même, ils réussissent mieux à comparer des nombres éloignés (distance 3) que proches (distance 1). Une interaction Groupe x Réponse significative est mise en évidence ($F(2,600) = 0.335, p < .05$). L'analyse post-hoc montre que les DSM font moins d'erreurs lorsque le nombre le plus grand numériquement se trouve à gauche alors que pour les Ctrl et DC, on ne retrouve pas cet effet de Réponse. De plus, une interaction Système x Réponse est également significative ($F(1,600) = 5.11, p < .05$) indiquant que les paires appartenant au SNA sont mieux réussies si elles entraînent une réponse à gauche. Aucun autre effet ni aucune autre interaction ne sont significatifs. Lorsque les scores de raisonnement non verbal, d'inhibition, de mémoire verbale à court terme et l'âge de lecture sont covariables des analyses (ANCOVA), les effets et interactions décrits ci-dessus sont restés significatifs.

2.2.2 Analyse de temps de réponse.

L'analyse des temps de réponse montre un effet de Groupe significatif ($F(2,591) = 48.24, p < .05$). Les post-hoc révèlent que les DSM et les Ctrl sont plus rapides que les DC mais également que les Ctrl sont plus rapides que les DSM ($p < .05$). On retrouve également un effet de Système ($F(1,591) = 9.79, p < .05$) et un effet de Distance ($F(1,591) = 36.69, p < .05$) significatifs. À l'image des résultats obtenus lors de l'analyse des scores, les trois groupes réussissent à comparer plus rapidement des paires de nombres appartenant au SNP que des paires de nombres appartenant au SNA. De même, ils réussissent plus rapidement à comparer des nombres éloignés (distance 3) que proches (distance 1). Une interaction Système x Distance significative ($F(1,591) = 4.33, p < .05$) est également mise en avant. L'analyse post-hoc indique que les trois groupes sont plus rapides pour comparer des paires de nombres éloignés, d'autant plus s'ils appartiennent au SNP. Aucun autre effet ni aucune autre interaction ne sont significatifs. Lorsque les scores de raisonnement non verbal, d'inhibition, de mémoire à court terme verbale et l'âge de lecture sont covariables des analyses (ANCOVA), les effets et interactions décrits ci-dessus sont restés significatifs.

Tableau 8. Moyenne (Ecart-type) des performances à la tâche de comparaison numérique de nombres arabes.

Système	Distance	Réponse	Ctrl (n=46)		DSM (n=21)		DC (n=11)	
			Score	Temps	Score	Temps	Score	Temps
SNP	1	Droite	.98 (.08)	920.89 (173.44)	.94 (.13)	1002.96 (257.00)	.97 (.10)	1147.37 (275.59)
		Gauche	.97 (.09)	848.37 (168.65)	.97 (.10)	1081.78 (250.10)	.91 (.22)	1172.06 (351.49)
	3	Droite	.99 (.05)	745.66 (141.04)	1.00 (.00)	826.03 (134.86)	1.00 (.00)	982.84 (349.02)
		Gauche	.99 (.05)	765.31 (162.35)	1.00 (.00)	874.32 (231.41)	1.00 (.00)	998.63 (370.54)

SNA	1	Droite	.89 (.17)	954.80 (180.74)	.90 (.21)	1091.38 (274.04)	.85 (.23)	1063.50 (218.27)
		Gauche	.91 (.15)	982.75 (239.69)	.98 (.07)	1032.84 (176.49)	.91 (.22)	1174.24 (338.36)
	3	Droite	.99 (.07)	849.95 (168.85)	.90 (.15)	982.86 (233.52)	.94 (.13)	1077.63 (298.04)
		Gauche	.96 (.10)	839.25 (134.57)	1.00 (.00)	950.00 (180.89)	.97 (.10)	1120.92 (303.20)
	Total		.96 (.11)	863.10 (189.63)	.96 (.12)	979.44 (233.83)	.94 (.15)	1092.48 (312.39)

2.3 Tâche de comparaison numérique orale.

Une ANOVA a été réalisée pour analyser les réponses correctes et les temps de réponses (correctes) à la tâche de comparaison numérique de nombres oraux selon le même plan expérimental que précédemment.

2.3.1 Analyse des scores.

L'analyse des scores montre un effet de Groupe significatif ($F(2,600) = 4.80, p < .05$). En particulier, l'analyse des post-hoc montre que les Ctrl sont significativement meilleurs que les DC. De même, les DSM sont marginalement meilleurs que les DC. En revanche, les résultats obtenus par les DSM et les Ctrl ne diffèrent pas significativement. On retrouve également un effet de Système ($F(1,600) = 8.05, p < .05$) : les trois groupes arrivent mieux à comparer les paires appartenant au SNP que celles appartenant au SNA. Une interaction Groupe x Système significative ($F(2,600) = 3.61, p < .05$) est mise en avant. L'analyse post-hoc montre que les DC traitent mieux les paires appartenant au SNP par rapport aux paires appartenant au SNA. En revanche, pour les Ctrl et DSM, l'appartenance d'une paire de nombres au SNP ou au SNA n'influence pas leur résultat. En d'autres termes, on observe un effet de Groupe pour les paires appartenant au SNA : les Ctrl et DSM sont significativement plus performants ($p < .05$) que les DC. Cependant, cet effet de groupe n'est pas significatif pour les paires appartenant au SNP. Une seconde interaction est significative : l'interaction Système x Réponse ($F(1,600) = 7.97, p < .05$). L'analyse post-hoc indique que les paires appartenant au SNA sont mieux réussies si elles entraînent une réponse à droite. Aucun autre effet ni aucune autre interaction ne sont significatifs. Lorsque les scores de raisonnement non verbal, d'inhibition, de mémoire verbale à court terme et l'âge de lecture sont covariables des analyses (ANCOVA), les effets et interactions décrits ci-dessus sont restés significatifs à l'exception de l'effet de Groupe ($F(2,596) = 0.62, p = .53$).

2.3.2 Analyse des temps de réponse.

L'analyse des temps de réponse montre que l'effet de Groupe ($F(2,586) = 9.99, p < .05$) est significatif. L'analyse post-hoc montre que les DSM et les Ctrl sont significativement plus rapides ($p < .05$) que les DC ; la différence entre les DSM et Ctrl est quant à elle non significative ($p = .12$). De plus, l'effet de Distance ($F(1,586) = 10.18, p < .05$) et l'effet de Système ($F(1,586) = 147.90, p < .05$) sont significatifs. Les trois groupes sont plus rapides pour comparer des paires de nombres appartenant au SNP que des paires de nombres appartenant au SNA. Ils sont également plus rapides pour comparer des nombres éloignés (Distance 3) que proches (Distance 1). L'effet de Réponse ($F(1,586) = 5.63, p < .05$) significatif indique que les paires entraînant une réponse à droite nécessitent un temps de réponse plus rapide que celles entraînant une réponse à gauche. Une interaction Système x Réponse ($F(1,586) = 4.09, p < .05$) est significative. L'analyse post-hoc indique que les paires appartenant au SNP entraînent un temps de réponse plus rapide si elles nécessitent une réponse à droite. Une seconde interaction est significative : l'interaction Groupe x Réponse ($F(1,586) = 9.94, p < .05$). L'analyse de cette dernière indique un effet de groupe lorsque les paires nécessitent une réponse à droite. En effet,

l'analyse post-hoc montre que les Ctrl sont significativement plus rapides ($p < .05$) que les DC lorsque la paire de nombres présentée entraîne une réponse à droite. Aucun autre effet ni aucune autre interaction ne sont significatifs. Lorsque les scores de raisonnement non verbal, d'inhibition, de mémoire verbale à court terme, l'âge de lecture, et la durée des stimuli sont covariables des analyses (ANCOVA), les effets et interactions décrits ci-dessus sont restés significatifs à l'exception de l'effet de Système ($F(1,582)=0.02, p=.87$).

Tableau 9. Moyenne (Ecart-type) des performances à la tâche de comparaison numérique de nombres oraux.

Système	Distance	Réponse	Ctrl (n=46)		DSM (n=21)		DC (n=11)	
			Score	Temps	Score	Temps	Score	Temps
SNP	1	Droite	.91 (.18)	2679.70 (299.00)	.89 (.16)	2829.71 (316.52)	.82 (.23)	2769.06 (266.17)
		Gauche	.95 (.14)	2809.81 (263.18)	.87 (.25)	2856.64 (303.18)	.94 (.13)	2930.57 (289.78)
	3	Droite	.93 (.18)	2445.85 (253.49)	.90 (.21)	2598.29 (289.32)	.94 (.13)	2713.34 (378.89)
		Gauche	.93 (.17)	2758.40 (310.20)	.94 (.13)	2838.66 (326.52)	.94 (.13)	2755.64 (280.26)
	1	Droite	.93 (.16)	3007.21 (235.17)	.97 (.10)	3024.55 (284.71)	.91 (.16)	3411.88 (311.81)
		Gauche	.88 (.21)	2992.61 (260.52)	.81 (.27)	3055.58 (270.40)	.76 (.30)	3157.47 (233.38)
SNA	3	Droite	.90 (.23)	2940.35 (211.17)	.94 (.13)	3035.52 (253.91)	.76 (.22)	3149.35 (292.93)
		Gauche	.88 (.22)	3142.89 (395.95)	.92 (.15)	2992.11 (255.40)	.70 (.38)	3099.06 (311.71)
	Total		.92 (.19)	2847.90 (348.43)	.90 (.19)	2902.97 (317.74)	.84 (.24)	2996.89 (370.22)

3 Tâches de Stroop numérique.

3.1 Tâche de Stroop numérique en modalité arabe.

Une ANOVA a été réalisée pour analyser les réponses correctes et les temps de réponses (correctes) à la tâche de Stroop numérique en modalité arabe selon le plan expérimental $S_{78} < G_3 > * Sy_2 * D_3 * R_2 * C_3$ où S représente le facteur aléatoire Sujet, G représente le facteur fixe à mesures indépendantes Groupe à trois modalités (Contrôle vs. DC vs. DSM), Sy représente le facteur fixe à mesures répétées Système à deux modalités (SNP vs. SNA), D représente le facteur fixe à mesures répétées Distance à trois modalités (Distance 0 vs. Distance 1 vs. Distance 3), R représente le facteur fixe à mesures répétées Réponse à deux modalités (Droite vs. Gauche), et C représente le facteur fixe à mesures répétées Congruence à trois modalités (Congruence vs. Non congruence vs. Neutre).

3.1.1 Analyse des scores.

L'analyse des scores ne montre aucun effet de Groupe ($F(2,1500)= 1.44, p=.24$). L'effet de Congruence ($F(1,1500)= 3.73, p= .054$) est marginal. L'analyse post-hoc montre que les trois groupes sont meilleurs dans les conditions neutre et congruente que dans la condition non congruente ($p < .05$). L'effet de Distance ($F(1,1500)= 9.64, p= < .05$) est significatif : les trois groupes réussissent mieux à comparer des paires de nombres proches (distance 1) et neutres (distance 0) qu'éloignées (distance 3). En revanche, les effets de Système ($F(1,1500)= 1.82, p=.18$) et de Réponse ($F(1,1500)= 0.12, p=.73$) sont

non significatifs. L'interaction Groupe x Congruence est significative ($F(2,1500)=6.78$, $p<.05$). L'analyse post-hoc montre que les Ctrl réussissent mieux les paires de nombres congruentes ou neutres que les paires non congruentes. En d'autres termes, les paires non congruentes ont été significativement plus échouées ($p<.05$) par les Ctrl alors que les DC et DSM ne montrent pas de différence. Une autre interaction est également significative : l'interaction Groupe x Congruence x Système ($F(2,1500)= 3.51$, $p<.05$). L'analyse post-hoc révèle que, pour les Ctrl, les paires congruentes sont significativement mieux réussies ($p<.05$) que les paires non congruentes ou neutres d'autant plus si elles appartiennent au SNP. Cette interaction ne se retrouve pas pour les DC et DSM ni lorsque les paires de nombres appartiennent au SNA chez tous les groupes. Aucune autre interaction n'est significative. Lorsque les scores de raisonnement non verbal, d'inhibition, de mémoire verbale à court terme et l'âge de lecture sont covariables des analyses (ANCOVA), les effets et interactions décrits ci-dessus sont restés significatifs. De plus, un effet de Groupe significatif apparaît ($F(2,1496)= 5.89$, $p<.05$). Il semblerait alors que les DC réussissent mieux que les DSM qui réussiraient également mieux que les Ctrl.

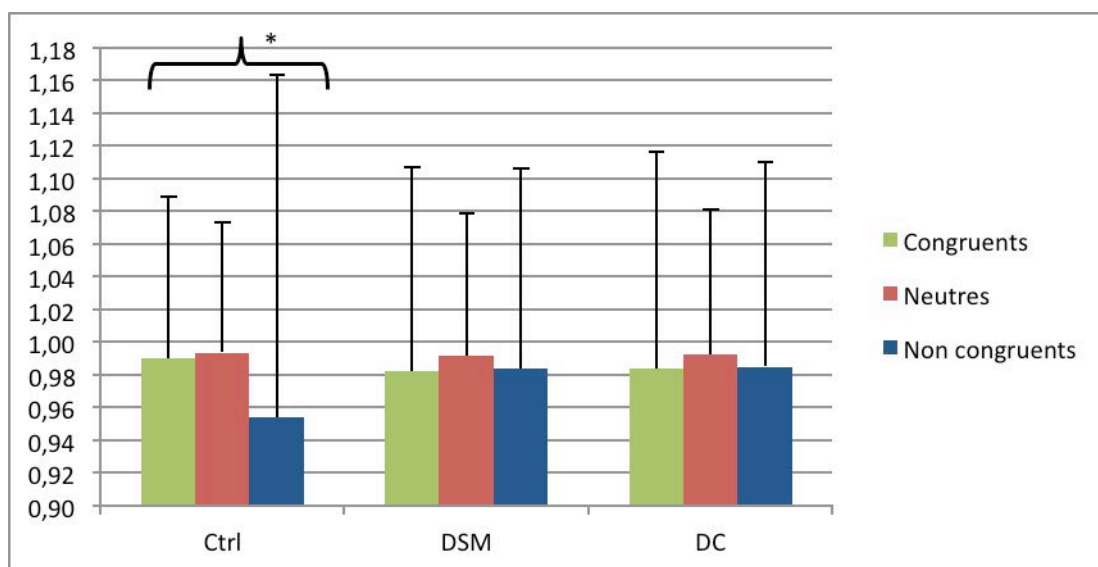


Figure 11 : Score en fonction des Groupes, en fonction de la Congruence à la tâche de Stroop numérique en modalité arabe.

3.1.2 Analyse des temps de réponse.

L'analyse des temps de réponse montre un effet de Groupe significatif ($F(2,1491)= 71.71$, $p<.05$). Les post-hoc montrent que les Ctrl sont significativement plus rapides que les DC et DSM. L'effet de Congruence ($F(1,1491)= 20.73$, $p<.05$) et l'effet de Réponse ($F(1,1491)= 10.00$, $p<.05$) sont également significatifs. Les trois groupes réussissent plus rapidement à comparer des paires de nombres congruentes et neutres alors qu'ils sont significativement plus lents ($p<.05$) pour comparer des paires non congruentes. De même, les trois groupes arrivent plus rapidement à comparer une paire de nombres si cette dernière entraîne une réponse à droite. Les effets de Système ($F(1,1491)= 1.92$, $p=.17$) et de Distance ($F(1,1491)= 3.02$, $p=.08$) sont non significatifs. Une interaction Groupe x Distance est également significative ($F(2,1491)= 3.45$, $p<.05$). L'analyse post-hoc montre que les Ctrl sont significativement plus rapides lorsqu'ils doivent comparer des paires de nombres avec une distance proche (Distance 1) voire nulle (Distance 0) qu'avec une distance éloignée (Distance 3). En revanche, cet effet de distance n'est pas observé pour les groupes DC et DSM : ils ne sont pas sensibles à la distance numérique de la paire de

nombre à analyser. D'autres interactions sont aussi significatives : l'interaction Congruence x Distance ($F(1,1491)= 5.80, p<.05$), l'interaction Congruence x Système ($F(1,1491)= 11.17, p<.05$), l'interaction Congruence x Distance x Système ($F(1,1491)= 13.59, p<.05$) et l'interaction Congruence x Distance x Système x Réponse ($F(1,1491)= 5.19, p<.05$). Aucune autre interaction n'est significative. Lorsque les scores de raisonnement non verbal, d'inhibition, de mémoire verbale à court terme et l'âge de lecture sont covariables des analyses (ANCOVA), les effets et interactions décrits ci-dessus sont restés significatifs.

Tableau 10. Moyenne (Ecart-type) des performances à la tâche de Stroop numérique en modalité arabe.

Congruence	Système	Distance	Réponse	Ctrl (n=46)		DSM (n=21)		DC (n=11)	
				Score	Temps	Score	Temps	Score	Temps
Neutre	SNP	0	Droite	.99	666.75	1.00	734.78	.98	753.95
				(.03)	(95.12)	(.00)	(117.36)	(.05)	(75.66)
			Gauche	.99	679.45	.98	761.35	1.00	737.43
				(.05)	(92.20)	(.06)	(150.17)	(.00)	(126.31)
	SNA	0	Droite	1.00	641.57	1.00	743.99	.98	660.27
				(.00)	(87.90)	(.00)	(139.66)	(.05)	(39.44)
			Gauche	1.00	668.72	.99	754.76	1.00	765.62
				(.02)	(101.64)	(.04)	(128.77)	(.00)	(100.57)
Congruent	SNP	1	Droite	.99	644.47	1.00	792.35	1.00	662.66
				(.05)	(111.59)	(.00)	(174.00)	(.00)	(131.04)
		Gauche	1.00	662.43	.98	735.49	1.00	740.51	
			(.00)	(104.02)	(.07)	(131.04)	(.00)	(120.08)	
		3	Droite	.99	610.48	.92	681.62	1.00	651.71
				(.07)	(92.71)	(.18)	(132.21)	(.00)	(68.41)
	SNA	1	Droite	.98	690.66	.98	716.94	.97	720.81
				(.08)	(100.96)	(.07)	(106.14)	(.10)	(93.25)
		Gauche	1.00	613.32	1.00	708.53	.97	745.35	
			(.00)	(115.52)	(.00)	(141.26)	(.10)	(139.29)	
		3	Droite	1.00	671.78	1.00	769.74	1.00	717.17
				(.00)	(106.52)	(.00)	(115.50)	(.00)	(122.58)
Non Congruent	SNP	1	Droite	.99	665.92	1.00	761.07	.97	767.17
				(.05)	(134.23)	(.00)	(170.95)	(.10)	(159.29)
		Gauche	.97	657.42	.97	744.21	.97	727.75	
			(.09)	(118.27)	(.10)	(149.28)	(.10)	(159.97)	
		3	Droite	.97	663.96	1.00	766.43	.97	650.78
				(.12)	(133.74)	(.00)	(141.07)	(.10)	(74.59)
	SNA	1	Droite	.96	677.97	1.00	797.80	1.00	772.63
				(.13)	(123.94)	(.00)	(244.08)	(.00)	(158.84)
		3	Droite	.92	753.25	.95	831.75	.97	818.22
				(.19)	(134.85)	(.12)	(149.08)	(.10)	(98.02)
		Gauche	.89	763.83	1.00	806.29	.97	810.14	
			(.23)	(176.17)	(.00)	(167.00)	(.10)	(156.37)	
Total	1	Droite	.97	654.69	.98	760.00	1.00	713.41	
			(.15)	(148.60)	(.07)	(130.55)	(.00)	(117.17)	
	3	Droite	.95	633.85	.98	749.38	1.00	841.22	
			(.12)	(89.07)	(.07)	(195.38)	(.00)	(131.91)	
	Gauche	.99	646.37	.95	744.46	.97	735.36		
		(.07)	(103.91)	(.12)	(131.60)	(.10)	(93.08)		
		Gauche	.98	708.52	1.00	717.37	1.00	767.99	
			(.08)	(112.17)	(.00)	(106.15)	(.00)	(124.19)	
			.98	668.56	.98	753.91	.99	738.35	
			(.10)	(120.85)	(.07)	(150.06)	(.06)	(125.28)	

3.2 Tâche de Stroop numérique en modalité orale.

Une ANOVA a été réalisée pour analyser les réponses correctes et les temps de réponses (correctes) à la tâche de Stroop numérique en modalité orale selon le même plan expérimental que précédemment.

3.2.1 Analyse des scores.

L'analyse des scores ne montre aucun effet de Groupe ($F(2,1500)= 1.00, p=.36$). En revanche, on retrouve un effet de Système ($F(2,1500)= 4.14, p<.05$) significatif. Les trois groupes arrivent mieux à comparer des paires de nombres appartenant au SNA que des paires de nombres appartenant au SNP. Une interaction Congruence x Distance est également significative ($F(1,1500)= 4.42, p<.05$). L'analyse post-hoc montre que pour les items non congruents, les trois groupes sont significativement meilleurs pour comparer des paires de nombres proches (Distance 1) par rapport aux paires de nombres éloignés (Distance 3). Une interaction Congruence x Système est marginale ($F(1,1500)= 3.74, p=.053$). Aucun autre effet ni aucune autre interaction ne sont significatifs. Lorsque les scores de raisonnement non verbal, d'inhibition, de mémoire verbale à court terme et l'âge de lecture sont covariables des analyses (ANCOVA), les effets et interactions décrits ci-dessus ne sont pas restés significatifs. De plus, un effet de Groupe apparaît significativement ($F(2,1496)= 4.13, p<.05$), où l'on remarque les DC et les DSM ont de meilleurs résultats que les Ctrl.

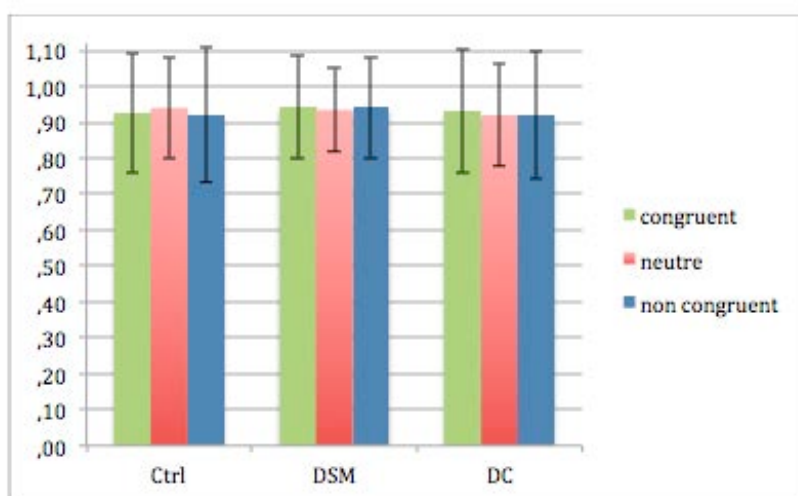


Figure 12 : Score en fonction des Groupes, en fonction de la Congruence à la tâche de Stroop numérique en modalité orale.

3.2.2 Analyse des temps de réponse.

L'analyse des temps de réponse montre un effet de Groupe significatif ($F(2,1482)= 3.22, p<.05$). Les post-hoc montrent que les Ctrl sont significativement plus rapides que les DSM mais également que les DC sont significativement plus rapides que les DSM ($p<.05$). L'effet de Congruence ($F(1,1482)= 30.31, p<.05$), l'effet de Distance ($F(1,1482)= 3.17, p<.05$), l'effet de Système ($F(1,1482)= 329.97, p<.05$) et l'effet de Réponse ($F(1,1482)= 20.77, p<.05$) sont également significatifs. L'analyse post-hoc de l'effet de Congruence montre que les trois groupes sont significativement plus rapides pour comparer des paires de nombres congruentes ($p<.05$) que des paires de nombres non congruentes mais également marginalement plus rapides à comparer des paires congruentes ($p=.054$) que des paires neutres. L'analyse de l'effet de Distance montre quant à lui que les trois groupes sont significativement plus rapides pour comparer des paires de nombres éloignés (Distance 3) par rapport aux paires de nombres proches (Distance 1). En ce qui concerne l'effet de Système, l'analyse montre que le temps de réponse des paires de nombres appartenant au SNP est plus rapide que le temps de réponse des paires de nombres appartenant au SNA. L'analyse de l'effet de Réponse montre que les trois groupes sont plus rapides lorsque la paire de nombre à comparer entraîne une réponse à droite. Il est à souligner que les deux effets ci-dessus ne perdurent pas si l'on considère la covariable « durée des stimuli ». Trois interactions sont

également significatives : l'interaction Système x Réponse ($F(1,1482)= 7.20, p<.05$), l'interaction Congruence x Système x Réponse ($F(1,1482)= 22.58, p<.05$) et l'interaction Congruence x Distance x Système x Réponse ($F(1,1482)= 25.26, p<.05$). Aucun autre effet ni aucune autre interaction ne sont significatifs. Lorsque les scores de raisonnement non verbal, d'inhibition, de mémoire verbale à court terme, l'âge de lecture, et la durée des stimuli sont covariables des analyses (ANCOVA), les effets et interactions décrits ci-dessus sont restés significatifs à l'exception de l'effet de Distance ($F(1,1478)= 1.02, p=.31$) et de l'effet de Système ($F(1,1478)= 1.98, p=.16$). De plus, deux interactions apparaissent significativement : une interaction Congruence x Distance ($F(1,1478)= 14.36, p<.05$) et une interaction Distance x Système ($F(1,1478)= 24.51, p<.05$).

Tableau 11. Moyenne (Ecart-type) des performances à la tâche de Stroop numérique en modalité orale.

Congruence	Système	Distance	Réponse	Ctrl (n=46)		DSM (n=21)		DC (n=11)		
				Score	Temps	Score	Temps	Score	Temps	
Neutre	SNP	0	Droite	.93 (.14)	2514.29 (179.10)	.93 (.12)	2562.26 (230.09)	.89 (.15)	2554.08 (195.73)	
			Gauche	.94 (.15)	2643.09 (180.29)	.93 (.14)	2694.36 (167.20)	.92 (.16)	2609.85 (199.42)	
		SNA	0	Droite	.93 (.16)	2756.46 (184.48)	.94 (.08)	2819.16 (279.38)	.91 (.16)	2777.55 (235.96)
				Gauche	.96 (.12)	2835.27 (172.31)	.94 (.12)	2827.39 (202.86)	.94 (.11)	2780.51 (287.50)
	Congruent	SNP	1	Droite	.91 (.18)	2468.56 (238.82)	.92 (.18)	2479.16 (282.20)	.94 (.13)	2510.10 (267.65)
				Gauche	.93 (.13)	2567.35 (176.85)	.97 (.10)	2653.64 (256.27)	.91 (.16)	2531.46 (297.46)
SNA		3	Droite	.93 (.15)	2334.32 (247.70)	.92 (.18)	2366.35 (242.15)	.85 (.31)	2336.41 (152.93)	
			Gauche	.94 (.16)	2647.11 (216.37)	.98 (.07)	2671.89 (334.68)	.97 (.10)	2593.82 (219.70)	
	SNA	1	Droite	.93 (.15)	2828.07 (219.44)	.95 (.12)	2738.25 (308.19)	.91 (.16)	2776.17 (177.68)	
			Gauche	.93 (.18)	2858.62 (226.24)	.92 (.18)	2966.64 (317.19)	.94 (.13)	2746.92 (156.24)	
SNA		3	Droite	.90 (.22)	2875.69 (188.66)	.95 (.12)	2825.66 (225.63)	.97 (.10)	2757.61 (158.36)	
			Gauche	.93 (.16)	2735.27 (198.44)	.94 (.17)	2651.44 (249.16)	.94 (.20)	2674.20 (201.99)	
	Non Congruent	SNP	1	Droite	.92 (.20)	2525.84 (198.75)	.95 (.16)	2618.56 (202.78)	.97 (.10)	2505.61 (246.30)
				Gauche	.92 (.17)	2643.41 (234.40)	.92 (.15)	2762.73 (354.55)	.97 (.10)	2514.48 (166.89)
3			Droite	.86 (.25)	2563.24 (225.76)	.92 (.15)	2659.55 (251.43)	.88 (.22)	2650.19 (374.48)	
			Gauche	.88 (.21)	2532.28 (272.95)	.89 (.19)	2506.23 (248.51)	.79 (.27)	2610.63 (235.04)	
SNA			1	Droite	.98 (.11)	2798.58 (219.86)	.98 (.07)	2860.22 (303.00)	.97 (.10)	2889.03 (168.27)
				Gauche	.95 (.14)	2896.75 (210.32)	.94 (.13)	2902.31 (222.56)	.91 (.22)	2903.53 (332.80)
SNA		3	Droite	.93 (.18)	2830.13 (208.43)	.94 (.17)	2836.78 (244.13)	.94 (.13)	2822.01 (209.93)	
			Gauche	.93 (.18)	2940.49 (264.97)	.98 (.07)	2951.26 (229.05)	.95 (.15)	2912.87 (192.21)	
		Total			.93 (.17)	2689.37 (269.31)	.94 (.14)	2718.53 (299.97)	.92 (.17)	2674.39 (268.73)

IV Corrélations.

Une analyse de corrélations a été réalisée pour identifier les liens potentiels entre les différentes tâches expérimentales et le Zareki-R. Le Tableau 8 présente les corrélations brutes (corrélations r de Pearson) entre les scores et les temps obtenus aux six tâches expérimentales et la note brute totale du Zareki-R. L'analyse de corrélations met en évidence une corrélation significative entre le Zareki-R et les tâches expérimentales suivantes : tâche de réaction motrice (temps), tâche de comparaison analogique (temps), tâche de comparaison numérique de nombres arabes (temps), tâche de comparaison numérique de nombres oraux (scores et temps), et tâche de Stroop numérique en modalité arabe (temps). Aucune autre corrélation n'est significative.

Tableau 12. Corrélations entre les tâches expérimentales et le Zareki-R.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Tâche de réaction motrice, temps. (1)	.04	.13	-.19	.18	-.34**	.26*	.14	.36**	-.13	.19	-.35**
Tâche de comparaison analogique, scores. (2)		.17	.28*	-.17	.11	.03	.03	.01	.02	-.05	.17
Tâche de comparaison analogique, temps. (3)			.08	.51**	.09	.25*	-.02	.47**	.05	.19	-.25*
Tâche de comparaison numérique de nombres arabes, scores. (4)				.07	.48**	-.06	.07	-.07	.37**	.04	.20
Tâche de comparaison numérique de nombres arabes, temps. (5)					-.06	.30**	.03	.50**	.03	.25*	-.49**
Tâche de comparaison numérique de nombres oraux, scores. (6)						-.11	.05	-.07	.48**	-.05	.28*
Tâche de comparaison numérique de nombres oraux, temps. (7)							-.15	.34**	-.09	.52**	-.27*
Tâche de Stroop numérique arabe, scores. (8)								-.02	.10	-.07	.09
Tâche de Stroop numérique arabe, temps. (9)									-.01	.31**	-.29**
Tâche de Stroop numérique orale, scores. (10)										.03	.18
Score Zareki-R total (11)											.05

*La corrélation est significative au niveau 0.05.

**La corrélation est significative au niveau 0.01.

Note : pour des raisons de lisibilité, les chiffres de 1 à 11 de la première ligne correspondent respectivement aux onze tâches énoncées à gauche en colonne.

Chapitre V

DISCUSSION DES RESULTATS

I Introduction :

La présente recherche a pour appui théorique principal le modèle du Triple Code développé par Dehaene (1992). Ce modèle fait état du fonctionnement cognitif numérique de base par trois systèmes de représentations du nombre, à savoir le code analogique, le code oral et le code arabe. Le modèle en quatre étapes de Von Aster & Shalev (2007) a décrit les liens entre les différentes représentations numériques d'un point de vue développemental. Par la suite, de nombreuses études ont mis en évidence l'existence d'un lien automatique entre le code symbolique arabe et le code analogique. Ce lien a notamment été observé chez les enfants tout-venant en fin de 1^{ère} année de primaire, c'est à dire à l'âge de 6-7 ans environ (Bugden & Ansari (2011) ; Rubinsten et al. (2002) ; Soltész et al. (2011); White et al. (2012)). Cependant, malgré plusieurs études (Heine et al. (2010) ; Landerl & Kölle (2009); Rousselle & Noël (2007)), on ignore encore si cette automaticité d'accès aux grandeurs numériques est présente ou déficitaire chez les enfants dyscalculiques.

C'est pourquoi l'objectif de recherche de cette étude est d'identifier s'il existe un déficit d'accès automatique aux grandeurs numériques via les codes numériques symboliques chez les enfants dyscalculiques. Pour ce faire, il faut répondre à trois objectifs préalables, à savoir : identifier s'il existe chez les enfants dyscalculiques : A) un déficit du sens du nombre ; B) un déficit d'accès intentionnel au sens du nombre via le code arabe ; et C) un déficit d'accès intentionnel au sens du nombre via le code oral. A ces trois objectifs préalables succèdent deux objectifs de recherche : identifier s'il existe chez les enfants dyscalculiques : 1) un déficit de l'accès automatique aux grandeurs numériques via le code arabe et 2) un déficit de l'accès automatique aux grandeurs numériques via le code oral.

Pour répondre à ces différentes questions de recherche, dans un premier temps, les résultats obtenus seront interprétés et discutés, c'est à dire que les résultats des tâches de comparaison numérique seront mis en lien avec les objectifs préalables A, B et C et les résultats des tâches de Stroop numérique seront confrontés aux objectifs de recherche 1 et 2. Puis, dans un second temps, un regard critique sera posé sur cette étude, ce qui permettra d'en déterminer les limites et les forces, et les implications pratiques et théoriques. Pour finir, une ouverture sur différentes perspectives de recherche clora la discussion.

II Interprétation des résultats.

A la lumière des résultats précédemment présentés et de la littérature scientifique, chacune des hypothèses correspondant aux objectifs de l'étude sera discutée ci-dessous.

1 Résultats en lien avec les objectifs préalables.

1.1 Objectif préalable A : identifier s'il existe un déficit du sens du nombre chez les enfants dyscalculiques.

Le premier objectif préalable formulé est d'identifier s'il existe un déficit du sens du nombre chez les enfants dyscalculiques. L'hypothèse est la suivante : les enfants dyscalculiques ne présenteraient pas de déficit de sens du nombre (Noël & Rousselle, 2011). Pour rappel, selon le modèle du Triple Code (Dehaene, 1992), c'est le code analogique qui correspond véritablement au sens du nombre. Il s'agit de la représentation des grandeurs numériques, d'un système non symbolique qui traite la sémantique du nombre. Les résultats obtenus à la tâche de comparaison analogique proposée montrent que les enfants dyscalculiques (DC) sont aussi performants et aussi rapides que les

enfants contrôle (Ctrl), alors que les enfants avec difficultés subjectives en mathématiques (DSM) sont plus lents que les Ctrl. Ces résultats suggèrent ainsi une préservation du sens du nombre chez les DC mais un trouble du sens du nombre chez les DSM. La préservation du sens du nombre chez les DC n'est donc pas compatible avec l'hypothèse de Wilson & Dehaene (2007) selon laquelle le déficit du sens du nombre est caractéristique de la dyscalculie. En revanche, cette hypothèse du déficit du sens du nombre peut être mise en lien avec le trouble du sens du nombre que semblent présenter les DSM. Selon cette hypothèse, les DSM présentent donc un profil cognitif de dyscalculie.

Par ailleurs, lorsque les covariables de raisonnement non-verbal, inhibition, mémoire verbale à court terme et âge de lecture sont prises en considération, la différence entre les DSM et les Ctrl n'apparaît plus. Cela signifie que la lenteur des DSM par rapport aux Ctrl est associée à des difficultés cognitives générales des DSM. Plus précisément, les résultats mettent en évidence un déficit d'inhibition chez les DSM. Ainsi, on peut suggérer que les DSM présentent un trouble du sens du nombre associé à un déficit cognitif général, ou plus précisément à un défaut d'inhibition. Il faut souligner que le déficit d'inhibition peut être un facteur aggravant des difficultés en mathématiques ((Barrouillet, Fayol, & Lathulière, (1997) ; De Visscher & Noel (2014)).

Les résultats à cette tâche ne montrent aucune différence entre les groupes au niveau du traitement des systèmes numériques de base : quel que soit le groupe, les paires relevant du système numérique précis (SNP) sont mieux réussies et sont traitées plus rapidement que celles relevant du système numérique approximatif (SNA). La lenteur du groupe DSM par rapport au groupe Ctrl porte donc tant sur le SNP que sur le SNA, c'est-à-dire sur l'ensemble du code analogique. Cela concorde avec le modèle du Triple Code (Dehaene, 1992) et le modèle en quatre étapes (Von Aster & Shalev, 2007) selon lesquels la base du développement numérique est le sens du nombre dans son ensemble. Wilson et Dehaene (2007) précisent effectivement que le trouble du sens du nombre cause des difficultés de traitement des quantités aussi bien au niveau du SNA que du SNP. Selon eux, la dyscalculie correspond donc à la fois à un déficit du traitement précis et rapide des petites quantités et à un déficit du traitement approximatif des quantités plus grandes. Cependant, l'absence de différence entre les groupes au niveau du traitement des systèmes numériques de base dans la présente étude va à l'encontre des modèles de Carey (2004) et de Butterworth (1999) qui stipulent que les dyscalculiques présentent un déficit spécifique du SNP (voir les études Andersson et Östergren (2012) ; Ashkenazi, Mark-Zigdon, & Henik (2012) ; Canizares, Crespo, & Alemany (2013) ; Desoete & Gregoire (2006) ; Schleifer & Landerl (2011)) et de Feigenson et al. (2004) qui estime que les enfants dyscalculiques présentent un déficit du SNA (voir les études Landerl & Kölle (2009), Lafay (en préparation), Mejias, Mussolin, Rousselle, Grégoire, & Noël (2012) et De Weerd et Pieters (2012)). La présente étude suggère plutôt que les enfants avec trouble du sens du nombre (i.e. DSM) présentent un déficit portant sur l'ensemble du code analogique, c'est-à-dire tant sur le SNP que sur le SNA.

Pour conclure, l'hypothèse préalable A envisageant que les enfants dyscalculiques ne présentent pas de déficit de sens du nombre est validée pour le groupe DC. Elle est en revanche invalidée pour le groupe DSM. Ainsi, il est probable que ces deux groupes correspondent à deux types de dyscalculies primaires : une dyscalculie avec déficit du sens du nombre pour les DSM et une dyscalculie avec sens du nombre préservé pour les DC (profil discuté par la suite).

1.2 Objectif préalable B : identifier s'il existe un déficit d'accès intentionnel au sens du nombre via le code arabe chez les enfants dyscalculiques.

Le deuxième objectif préalable consiste à identifier s'il existe un déficit d'accès intentionnel au sens du nombre via le code arabe chez les enfants dyscalculiques.

L'hypothèse est la suivante : les enfants dyscalculiques présenteraient un déficit d'accès intentionnel aux représentations numériques via le code arabe. Les résultats à la tâche de comparaison numérique de nombres arabes montrent que les DC sont plus lents que les DSM, eux-mêmes plus lents que les Ctrl. Autrement dit, les groupes DC et les DSM présentent tous deux un déficit de traitement des nombres via le code arabe, déficit d'autant plus sévère chez les DC.

Puisque, comme expliqué ci-dessus, les DC ne présentent pas d'atteinte du sens du nombre, ce déficit sévère du traitement intentionnel des grandeurs numériques via le code arabe est concordant avec l'hypothèse du déficit d'accès au sens du nombre (Noël & Rousselle, 2011). De Smedt & Gilmore (2011), Desoete et al. (2012) et Rousselle & Noël (2007) avaient eux aussi observé chez les groupes dyscalculiques un temps de réponse allongé en comparaison arabe, alors que la comparaison analogique était préservée. Ce profil numérique montre d'ailleurs qu'un déficit concernant l'une des étapes du développement numérique (Von Aster et Shalev, 2007) peut être à l'origine d'une dyscalculie. Autrement dit, le déficit de la représentation des grandeurs numériques, première étape du développement numérique selon le modèle de Von Aster et Shalev (2007), ne serait pas la seule cause possible de la dyscalculie. En l'occurrence, les DC de la présente étude présenteraient une difficulté spécifique à accéder intentionnellement au sens du nombre à partir du code symbolique arabe. Cette difficulté ne s'exprimant que sur les temps de réponse, cela justifie d'autant plus la question de l'automatisme d'accès aux grandeurs numériques, qui est au cœur de la problématique de l'étude.

Concernant les DSM, la lenteur en tâche de comparaison numérique de nombres arabes pourrait s'expliquer par l'atteinte du sens du nombre discutée précédemment : comme le sens du nombre sous-tend toutes les activités numériques (Dehaene, 1992), s'il est déficitaire, tout traitement du nombre est rendu difficile (Wilson et Dehaene, 2007). En effet, selon le modèle développemental de Von Aster et Shalev (2007), la représentation de grandeurs numériques, c'est-à-dire le sens du nombre, est la première étape du développement numérique. C'est le socle de l'acquisition du nombre. Par ailleurs, à cette tâche de comparaison numérique de nombres arabes, les DSM ont un meilleur score sur les paires dont le nombre le plus grand numériquement se trouve à gauche. Or, selon Dehaene, Bossini et Giraux (1991), les tâches de comparaison numérique de nombres arabes avec des populations occidentales adultes révèlent un effet SNARC (Spatial Numerical Association of Response Code), c'est-à-dire un effet de côté de réponse tel que : le score est meilleur pour les paires dont le nombre le plus grand numériquement est situé à droite de la paire. Cet effet est considéré comme étant révélateur de l'orientation de gauche à droite de la ligne numérique. Dans cette étude, les DSM montrent donc un effet de côté de réponse inverse à l'effet conventionnel chez l'adulte. On peut alors s'interroger sur l'intégrité de leur ligne numérique mentale, dont le développement est sûrement perturbé. La ligne numérique étant fortement liée au sens du nombre (Dehaene et al. 1991), le fait qu'elle soit perturbée chez les DSM est un nouvel argument appuyant le déficit du sens du nombre dans ce groupe.

L'hypothèse préalable B selon laquelle les enfants dyscalculiques présentent un déficit d'accès intentionnel au sens du nombre via le code arabe est validée, tant pour le groupe DC que pour le groupe DSM. En ce qui concerne les DSM, il faut apporter une nuance : ce n'est pas l'accès aux grandeurs numériques qui est déficitaire, mais les grandeurs numériques elles-mêmes, puisqu'il existe un trouble du sens du nombre. Cela amène à conclure à une dyscalculie avec déficit d'accès au sens du nombre pour les DC et renforce l'idée d'une dyscalculie avec déficit du sens du nombre pour les DSM.

1.3 Objectif préalable C : identifier s'il existe un déficit d'accès intentionnel au sens du nombre via le code oral chez les enfants dyscalculiques.

Le dernier objectif préalable consiste à identifier s'il existe un déficit d'accès intentionnel au sens du nombre via le code oral chez les enfants dyscalculiques.

L'hypothèse est la suivante : les enfants dyscalculiques présenteraient un déficit d'accès intentionnel aux représentations numériques via le code oral. Les résultats de la tâche de comparaison numérique de nombres oraux montrent qu'en termes de scores, les DC sont moins bons que les Ctrl et marginalement moins bons que les DSM. L'analyse des vitesses de réponse montre que les DC sont aussi plus lents que les DSM et que les Ctrl. Autrement dit, en score comme en temps, les DC sont en difficultés en comparaison numérique de nombres oraux. Ils présentent donc un déficit d'accès au sens du nombre via le code oral. Précédemment, aucune étude ne s'est intéressée à l'accès au sens du nombre à partir du code oral. Ces résultats pourraient s'inscrire dans l'hypothèse du déficit d'accès au sens du nombre via un code symbolique de manière globale. Ainsi, non seulement les dyscalculiques présenteraient un déficit d'accès au sens du nombre via le code arabe (Noël & Rousselle, 2011), mais ils auraient plus généralement un déficit d'accès au sens du nombre via un code symbolique, quel qu'il soit. Cela concorde avec l'étude de Lafay (en préparation) qui met en évidence chez les enfants dyscalculiques un déficit d'accès aux grandeurs numériques à la fois à partir du code arabe et du code oral. Ces résultats sont cohérents avec l'hypothèse de Noël & Rousselle (2011) selon laquelle le système numérique symbolique est la base du développement numérique.

Parmi les résultats de la présente étude, il est également intéressant de prendre en compte le fait que les DC ont de meilleurs scores aux paires relevant du SNP qu'à celles du SNA. D'ailleurs, si l'on s'intéresse aux seules paires du SNA, les DC ne diffèrent pas des Ctrl en score. Il semble donc que, pour les DC, l'accès au sens du nombre via le code oral est d'autant plus difficile pour les nombres relevant du SNA. Lafay (en préparation) obtient des résultats similaires : les enfants dyscalculiques présentent des difficultés d'accès au SNA à partir du code oral, alors que l'accès au SNP est préservé. Cela pourrait s'expliquer par le fait que tout enfant est plus fréquemment exposé aux nombres oraux du SNP (/un/, /deux/, /trois/, /quatre/), les premiers mots-nombres, qu'à ceux du SNA. D'ailleurs, à de nombreuses reprises, les résultats de la présente étude montrent que les paires relevant du SNP sont plus facilement traitées que celles relevant du SNA : en comparaison numérique analogique, en score et en temps, en comparaison numérique arabe, en score et en temps, et en comparaison numérique orale, en score. Le traitement des nombres relevant du SNA serait donc généralement plus complexe. Les DC ayant des difficultés globales de traitement des nombres, il est cohérent que leurs difficultés soient majorées pour le SNA.

D'autres part, la différence de score entre les DC et les deux autres groupes n'apparaît plus lorsque les covariables de raisonnement non-verbal, inhibition, mémoire verbale à court terme et âge de lecture sont prises en considération. En effet, les résultats de l'évaluation cognitive mettent en évidence des difficultés dans chacun de ces domaines chez les DC. Cela signifie que les mauvais scores des DC en comparaison numérique orale sont associés chez eux à d'autres difficultés cognitives. Ces déficits peuvent aggraver les difficultés en mathématiques. D'ailleurs, il existe des difficultés en mathématiques associées à des dyslexies (Barbarelli, Katusic, Colligan, Weaver, & Jacobsen, 2005), à des troubles des fonctions exécutives (Barrouillet, Fayol, and Lathulière (1997) ; De Visscher & Noel, (2014) et à des troubles de la mémoire de travail (Geary, 1993). Quant aux DSM, aucune différence n'existe entre eux et les Ctrl en comparaison numérique orale, aussi bien en performance qu'en vitesse. Les capacités d'accès au sens du nombre via le code oral des DSM semblent donc préservées. Pourtant, il a été observé plus haut que la comparaison numérique analogique était déficitaire chez les DSM. Ces observations ne sont pas cohérentes avec le modèle développemental de Von Aster & Shalev (2007) d'après lequel l'acquisition du code oral n'est que la deuxième étape du développement, la première étape, étape-socle, étant la représentation analogique des grandeurs numériques. Cela ouvre donc des possibilités vers une évolution de ce modèle, possibilités qui seront abordées plus loin. Les enfants dyscalculiques présentent un déficit d'accès intentionnel aux grandeurs numériques via le

code oral. Cette hypothèse C est validée en ce qui concerne le groupe DC. Elle est en revanche invalidée pour le groupe DSM.

1.4 Synthèse : profil cognitif numérique des groupes en difficultés mathématiques DC et DSM

Suite à l'examen de chacun des objectifs et hypothèses préalables, il apparaît deux profils distincts : celui du groupe DC et celui du groupe DSM. Pour le groupe DC, l'ensemble des hypothèses préalables est validé. Les DC présentent donc une dyscalculie avec déficit d'accès au sens du nombre à partir des deux codes symboliques (arabe et oral), le sens du nombre lui-même étant préservé. Cela va dans le sens de l'hypothèse de Noël & Rousselle, (2011) selon laquelle la base du développement numérique est le système numérique symbolique arabe. Le groupe DSM présenterait plutôt une dyscalculie avec déficit du sens du nombre. C'est ce déficit qui serait responsable des difficultés de traitement du code arabe, ce qui concorde avec le modèle du Triple Code (Dehaene, 1992) et le modèle en quatre étapes (Von Aster & Shalev, 2007) selon lesquels le sens du nombre est la base du développement numérique. Ainsi, les deux groupes expérimentaux DC et DSM sont représentatifs de deux types de dyscalculie évoqués par la littérature : la dyscalculie avec déficit d'accès au sens du nombre (Noël & Rousselle, 2011) et la dyscalculie avec déficit du sens du nombre (Wilson et Dehaene, 2007).

2 Résultats en lien avec les objectifs de recherche.

Les trois objectifs préalables ont permis de cerner le profil cognitif numérique de chaque groupe de participants et de répondre désormais à la question de recherche : « Existe-t-il un déficit de l'automatisme d'accès aux représentations numériques via les codes symboliques arabe et/ou oral chez les enfants dyscalculiques ? ». Elle a été décomposée en deux objectifs et hypothèses de recherche.

2.1 Objectif de recherche 1 : identifier s'il existe un déficit de l'accès automatique aux représentations numériques via le code arabe chez les enfants dyscalculiques.

Le premier objectif de recherche est d'identifier s'il existe un déficit de l'accès automatique aux représentations numériques à partir du code arabe chez les enfants dyscalculiques. L'hypothèse formulée est la suivante : les enfants dyscalculiques présentent un déficit d'accès automatique aux grandeurs numériques via le code arabe. Les résultats de la tâche de Stroop Numérique en modalité arabe montrent que les Ctrl ont de meilleurs scores aux paires neutres et congruentes qu'aux paires non congruentes. Il s'agit là de l'effet de congruence de taille qui témoigne d'un accès automatique aux représentations numériques. Cet effet se présente ici sous la composante interférence. Mussolin & Noël (2007) ont montré que les enfants belges francophones présentent un accès automatique aux grandeurs numériques dès la 2ème année de primaire. La présente étude confirme que les enfants français ont un accès automatique aux représentations numériques en 3ème, 4ème et 5ème année de primaire. En revanche, ni les scores ni les temps de réponse des DC et des DSM ne varient avec la congruence : il n'existe pas de différences entre les paires neutres, congruentes ou non congruentes. Autrement dit, les DC et les DSM ne présentent pas d'effet de congruence de taille. Cela suggère que les deux groupes en difficultés en mathématiques de cette étude présentent un déficit de l'accès automatique aux grandeurs numériques à partir du code arabe. Ces résultats vont dans le sens de ceux obtenus par Landerl & Kölle (2009) qui ont comparé des enfants allemands contrôle et dyscalculiques de 1ère, 2ème et 3ème années de primaire. Néanmoins, ils ne sont pas congruents avec les études de Heine et al. (2010), de Landerl (2013) et de Rousselle & Noël (2007) qui concluent à une préservation de l'automatisme d'accès aux grandeurs numériques chez les enfants en difficultés en

mathématiques. La population de l'étude de Rousselle & Noël (2007), était pourtant constituée d'enfants francophones (belges). La différence fondamentale entre cette étude et la présente étude réside dans l'élaboration de la tâche de Stroop numérique en modalité arabe. En effet, Rousselle & Noël (2007) ont instauré un délai plus ou moins long avant le changement de taille physique en tenant compte des vitesses de traitement physique et numérique de nombres arabes de chaque participant (cf. Chapitre I pour plus de détails). Cela avait pour but d'éviter que l'effet de congruence de taille ne soit absent parce que le traitement numérique des participants n'est pas assez rapide pour interférer avec le traitement physique. Dans la présente étude, aucun aménagement tenant compte des vitesses de traitement n'a été fait. Puisque c'est la lenteur de traitement numérique intentionnel qui est susceptible de causer un déficit d'automatisme d'accès aux grandeurs numériques, il a été décidé que la vitesse de traitement numérique et l'automatisme d'accès aux grandeurs numériques ne seraient pas dissociées. Comme signalé précédemment, on remarque d'ailleurs que les DC et les DSM présentent une lenteur de traitement intentionnel des nombres arabes. Il faut préciser que l'interaction groupe/congruence de taille reste significative en ajoutant aux analyses statistiques la covariable vitesse de réaction motrice. ($F(2, 1499) = 6,79$ $p < .05$)

Lorsque les covariables de raisonnement non-verbal, inhibition, mémoire verbale à court terme et âge de lecture sont prises en considération, les résultats restent les mêmes. Cela signifie que les autres troubles cognitifs que présentent les DC et les DSM n'expliquent pas leur déficit d'automatisme d'accès au sens du nombre. C'est donc bien le profil numérique des enfants qui est seul responsable des résultats obtenus.

Ainsi, l'hypothèse de recherche 1 concernant le déficit de l'accès automatique aux grandeurs numériques à partir du code arabe chez l'enfant dyscalculique est validée : les deux groupes en difficultés mathématiques de cette étude présentent ce déficit. Cette conclusion est cohérente avec le fait que l'enfant dyscalculique ait un déficit d'accès intentionnel au sens du nombre à partir du code arabe (hypothèse préalable 2).

2.2 Objectif de recherche 2 : identifier s'il existe un déficit de l'accès automatique aux représentations numériques via le code oral chez les enfants dyscalculiques.

Le second objectif de recherche est d'identifier s'il existe un déficit de l'accès automatique aux représentations numériques à partir du code oral chez les enfants dyscalculiques. L'hypothèse est la suivante : les enfants dyscalculiques présentent un déficit d'accès automatique aux grandeurs numériques via le code oral. Les résultats de la tâche de Stroop numérique en modalité orale montrent que les trois groupes Ctrl, DSM et DC sont plus rapides pour comparer les paires congruentes que les paires neutres et non-congruentes. Ainsi, tous les groupes présentent pour cette tâche l'effet de congruence de taille (sous la composante facilitation), ce qui signifie que les Ctrl, les DSM et les DC ont un accès automatique aux grandeurs numériques à partir du code oral. Cela suggère qu'à partir de la 3ème année de primaire (CE2), tous les enfants français, qu'ils soient ou non dyscalculiques, présentent une automatisme d'accès aux représentations numériques via le code oral. Or, comme détaillé précédemment, les enfants dyscalculiques présentent un déficit d'automatisme d'accès aux grandeurs numériques via le code arabe. Pour les dyscalculiques, il existe donc une dissociation entre le code arabe et le code oral. Cette différence est concordante avec le modèle développemental de Von Aster & Shalev (2007) selon lequel le code oral s'acquiert avant le code arabe. En effet, l'exposition au code oral est très précoce et sa compréhension est spontanée alors que l'acquisition du code arabe est plus tardive et nécessite un apprentissage explicite. L'acquisition du code oral étant plus précoce, cela explique que même les enfants dyscalculiques lient automatiquement ce code aux grandeurs numériques. Il est néanmoins surprenant que

les DC présentent cette activation automatique alors qu'ils montrent un déficit d'accès intentionnel au sens du nombre via le code oral. Les caractéristiques de la tâche de Stroop numérique en modalité orale sont peut-être à prendre en considération pour expliquer cela (cf. III- Limites).

Ici aussi, lorsque l'on prend en considération les covariables de raisonnement non-verbal, inhibition, mémoire verbale à court terme et âge de lecture, les résultats restent les mêmes. Les troubles cognitifs non-numériques présentés par les DC et les DSM n'ont donc aucune influence sur leurs performances en tâche de Stroop numérique oral.

D'après les résultats de la tâche de Stroop numérique oral, l'hypothèse de recherche 2 concernant le déficit de l'accès automatique aux représentations numériques à partir du code oral chez l'enfant dyscalculique est invalidée. En effet, les deux groupes en difficultés en mathématiques de cette étude présentent un accès automatique aux représentations numériques, tout comme le groupe contrôle.

2.3 Synthèse : le traitement automatique des codes symboliques chez les DC et les DSM.

L'examen des deux hypothèses de recherche amène à conclure qu'il existe chez les DC comme chez les DSM un déficit d'accès automatique aux grandeurs numériques à partir du code arabe mais que cette automaticité serait préservée à partir du code oral. Il est intéressant de souligner que bien que les DC et des DSM semblent présenter deux types de dyscalculies différents, leurs profils au niveau de l'accès automatique aux représentations numériques sont similaires. Il est donc possible que les différentes dyscalculies se distinguent au niveau du traitement numérique intentionnel, mais que le traitement automatique des codes symboliques soit semblable quel que soit le type de dyscalculie.

III Limites.

Malgré tout le soin apporté à la conception et à la réalisation de cette étude, un regard critique met en évidence quelques limites.

1 Mode de recrutement.

1.1 Choix d'inclusion et d'exclusion.

Différents choix méthodologiques ont été faits lors de la constitution des groupes de cette étude. En effet, il a été décidé de constituer les groupes d'enfants ayant des difficultés en mathématiques (DC et DSM) uniquement si ces derniers étaient pris en soin chez un orthophoniste pour rééducation de "dyscalculie ou de troubles logico-mathématiques".

De ce fait, les enfants rencontrés en établissement scolaire qui avaient un score pathologique au Zareki-R n'ont pas été inclus dans les groupes de l'étude. Pourtant, ces derniers ont peut-être un profil cognitif ou un profil numérique spécifique qu'il aurait été intéressant de prendre en compte.

De plus, il faut rappeler que les DSM n'ont pas obtenu de score pathologique au Zareki-R, même avec l'étalonnage élaboré spécifiquement pour cette étude. Il paraît nécessaire de s'interroger sur le choix de les avoir considérés comme ayant des difficultés en mathématiques et donc de les avoir inclus dans la présente recherche : leur inclusion dans cette étude ne repose que sur leur plainte et le fait qu'ils soient pris en charge en orthophonie. Cependant, cette inclusion est finalement pleinement justifiée par le fait que les résultats des tâches expérimentales mettent en évidence un profil

numérique atypique, conforme aux hypothèses faisant actuellement référence dans la littérature au sujet de la dyscalculie.

1.2 DC et DSM, deux groupes présentant des dyscalculies avec troubles associés

L'évaluation cognitive qui a été proposée à tous les participants de cette étude a permis de statuer sur les habiletés cognitives de chaque groupe. Les résultats aux tâches expérimentales ont mis en évidence un profil de dyscalculie chez les DSM et l'évaluation cognitive a révélé qu'ils sont moins performants à la tâche d'inhibition de la NEPSY que les DC et les Ctrl. Leur profil correspond donc à celui d'une dyscalculie associée à des troubles d'inhibition, et possiblement à des troubles des fonctions exécutives en général. Cela signifie qu'il ne s'agit pas d'un groupe de participants présentant une dyscalculie "pure". À l'image des DSM, les résultats obtenus aux tâches expérimentales ont permis de mettre en évidence un profil numérique déficitaire chez les DC. Cette dyscalculie est également associée à divers troubles cognitifs. En effet, l'évaluation cognitive a montré que les DC sont moins performants aux épreuves de mémoire auditivo-verbale, de réaction motrice et de raisonnement non verbal. Ces déficits associés n'ont donc pas permis d'élaborer un groupe de participants présentant une dyscalculie "pure". Ceci dit, ces profils cognitifs ont été considérés en incluant les covariables (c'est à dire le raisonnement non verbal, l'inhibition, la mémoire verbale à court terme et l'âge de lecture) aux analyses statistiques.

2 Sensibilité de l'étalonnage du Zareki-R.

Comme cela a déjà été développé dans le Chapitre III, les caractéristiques de l'échantillon d'étalonnage français du Zareki-R (Von Aster, 2006. Adaptation française par G. Dellatolas) ne correspondent ni à celles de la population de la présente étude ni à la population générale française. Pour rappel, plus de 50% de l'échantillon d'étalonnage est constitué d'enfants scolarisés en établissement ZEP et 28% ne parle pas le français à la maison. D'ailleurs, en appliquant cet étalonnage, aucun enfant suivi en orthophonie pour rééducation de « dyscalculie ou de troubles logico-mathématiques » n'obtenait de score pathologique. Cela montre bien le manque de sensibilité de l'étalonnage, causé par un score moyen trop faible par rapport au niveau des participants de l'étude (cf. Lafay, A., Saint-Pierr, M.-C., Macoir, J. (*soumis le 18 mars 2015, en révision*) Normalisation franco-qubécoise du test Zareki-R et du Tempo Test Rekenen pour l'évaluation des habiletés mathématiques auprès d'enfants de 8-9 ans.). Il a donc été préférable d'établir un étalonnage de référence sur la base des résultats de la totalité des enfants rencontrés en école dans le cadre de l'étude. C'est à partir de ce nouvel étalonnage qu'un score Z obtenu au Zareki a été attribué à chaque participant.

L'étalonnage de référence spécifique à cette étude a été élaboré à partir des cinquante six participants rencontrés dans le cadre scolaire. Plus précisément, dix-neuf enfants scolarisés en classe de CE2, vingt enfants scolarisés en classe de CM1 et dix-sept enfants scolarisés en classe de CM2 ont permis la réalisation de ces normes. Cependant, cette population reste de taille insuffisante pour permettre un étalonnage d'une grande fiabilité. Il est donc légitime de se questionner sur la sensibilité du score Z obtenu au Zareki-R par chaque participant. Cette hypothèse pourrait expliquer que les enfants DSM, bien que suivis en orthophonie (donc ayant une réelle plainte concernant leurs habiletés mathématiques), n'ont pas de score pathologique au Zareki-R. Cela dit, la répartition de l'étalonnage ainsi créé étant gaussienne, elle est statistiquement représentative. Par ailleurs, il est nécessaire de préciser que les scores des DSM n'étaient pas non plus pathologiques d'après l'étalonnage original du Zareki-R, alors que leurs résultats aux tâches expérimentales révèlent véritablement une dyscalculie. Cela pose donc une question plus large sur la sensibilité du Zareki-R de manière générale.

3 Validité de la tâche de Stroop numérique en modalité orale.

La tâche de Stroop numérique en modalité orale, créée avec le logiciel DMDX, n'a pas mis en évidence de différences de résultats entre les trois groupes de l'étude, alors que des disparités ont été observées dans toutes les autres tâches expérimentales. De plus, les analyses de corrélations montrent que le score au Zareki-R est corrélé à toutes les tâches expérimentales à l'exception de celle de Stroop numérique en modalité orale. Il est donc légitime de se questionner sur sa sensibilité.

En effet, une des particularités des tâches comportant des nombres oraux de cette étude est la séquentialité. Le participant entend le premier stimulus, puis le second. Autrement dit, il existe un délai entre l'énonciation du premier nombre de la paire et celle du second. Ce délai pourrait être suffisamment long pour que l'enfant active de manière intentionnelle, et non automatique, la grandeur numérique associée au nombre qu'il vient d'entendre. Ceci diminuerait la validité de cette tâche : elle testerait alors davantage le traitement intentionnel que le traitement automatique du nombre.

Pour ces raisons, cette tâche pourrait être modifiée afin d'être rendue plus valide et plus sensible. Par exemple, on pourrait envisager d'élaborer une tâche présentant les deux nombres oraux en écoute dichotique. Il faudrait alors tester sa validité sur des adultes tout-venant au préalable. Réduire le délai entre l'énonciation des deux nombres de la paire pourrait également permettre de tester de façon plus adéquate l'accès automatique aux représentations numériques à partir du code oral. Il est aussi possible de se questionner sur l'élaboration d'une tâche fondamentalement différente pour tester autrement cet accès automatique. On peut par exemple imaginer la tâche suivante : deux nombres arabes apparaissent de manière séquentielle sur un écran (un nombre arabe apparaît, puis il disparaît et un second apparaît) et le participant entend un nombre oral au moment de l'apparition du deuxième nombre arabe. La consigne serait « Le deuxième nombre qui apparaît à l'écran est-il plus grand ou plus petit que le premier ? ». En condition neutre, le nombre oral serait numériquement égal au deuxième nombre arabe. En condition congruente, le nombre oral serait numériquement plus petit que le premier nombre arabe si le deuxième nombre arabe l'est aussi et serait plus grand que le premier si le deuxième l'est aussi. En condition non-congruente, il serait numériquement plus petit que le premier nombre arabe si le deuxième nombre arabe est plus grand, et vice-versa. Cette suggestion serait à valider auprès d'adultes tout-venant avant de l'employer dans des études en dyscalculie.

IV Perspectives.

1 Implications théoriques.

Aucun des modèles développementaux existants n'évoque l'automatisme d'accès aux grandeurs numériques. Pourtant, nombreuses sont les études qui s'y sont intéressées et, comme détaillé ci-dessus, les perspectives d'application cliniques sont importantes. Il serait donc judicieux désormais de concevoir un modèle développemental incluant l'émergence de l'accès automatique aux représentations numériques, tant à partir du code oral que du code arabe.

Par ailleurs, bien que ce ne soit pas l'objectif principal de cette étude, celle-ci a montré que les enfants dyscalculiques avec déficit du sens du nombre de 3ème, 4ème et 5ème année de primaire ont des capacités de traitement intentionnel du code oral préservées. Cela n'est pas cohérent avec le modèle développemental de Von Aster & Shalev (2007) selon lequel la représentation des grandeurs numériques doit être acquise pour permettre l'émergence du code oral, puis du code arabe. Le développement numérique n'est donc probablement pas si linéaire. Il est par exemple envisageable que l'acquisition des codes symboliques et leur utilisation participent au renforcement du sens du nombre. Ainsi, lors

des périodes d'acquisition des codes symboliques, les représentations numériques ne seraient pas complètement matures. Ce serait l'utilisation régulière des codes oral et arabe qui perfectionnerait et préciserait progressivement ces représentations. Il semblerait donc pertinent de proposer un modèle développemental incluant des boucles, comme par exemple, celui présenté ci-dessous.

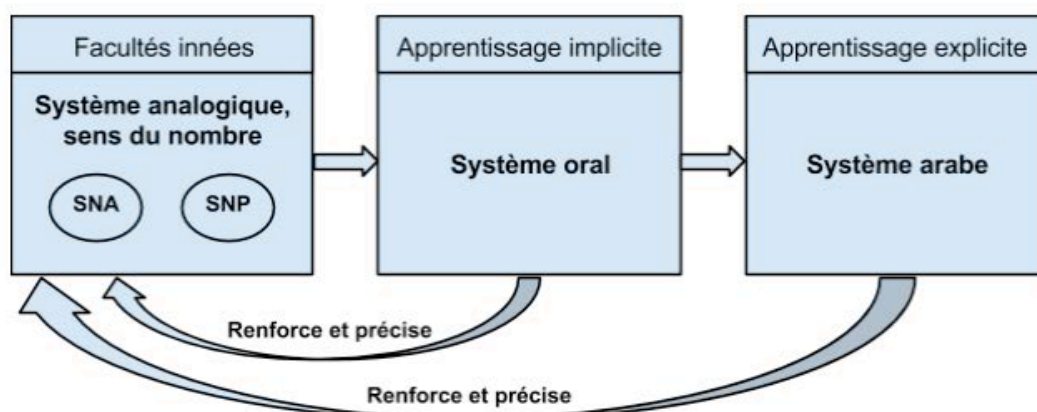


Figure 13 : Proposition de modèle développemental

2 Implications cliniques.

2.1 Déficit d'automatisme, futur élément de diagnostic ?

Cette étude valide l'hypothèse selon laquelle les enfants dyscalculiques présentent un déficit d'accès automatique aux représentations numériques à partir du code arabe. Ce déficit est observable aussi bien en cas de dyscalculie avec déficit du sens du nombre qu'en cas de dyscalculie avec déficit d'accès au sens du nombre. L'atteinte de l'automatisme d'accès aux représentations numériques serait donc un des éléments communs aux différents types de dyscalculie. Pour cette raison, il semble pertinent d'intégrer l'évaluation de l'accès automatique aux grandeurs numériques au bilan orthophonique de dyscalculie. On peut ainsi envisager qu'une tâche informatisée de type Stroop numérique fasse partie des épreuves proposées lors du bilan. Pour ce faire, il faudrait que soit étalonnée et éditée une telle épreuve et cela donne ouverture à de futures études cliniques. Le déficit d'accès automatique aux grandeurs numériques pourrait alors devenir un des éléments en faveur du diagnostic de dyscalculie.

2.2 Emergence de l'automatisme, futur indice d'évolution ?

L'accès automatique aux représentations numériques via le code arabe est absent chez les enfants dyscalculiques, alors que les enfants sans difficulté mathématique présentent cette automatisme. Il est donc possible que l'automatisme d'accès aux grandeurs numériques apparaisse à partir d'un certain niveau d'habiletés de traitement du nombre. Si cela est vrai, cela signifierait alors qu'on peut voir émerger cette automatisme chez l'enfant dyscalculique s'il atteint ce niveau d'habiletés de traitement du nombre. Dans ce cas, l'apparition de l'automatisme d'accès aux grandeurs numériques pourrait devenir une sorte de témoin des progrès de l'enfant. On peut alors imaginer que des

évaluations régulières de l'automatisme soient faites au fil de la prise en charge orthophonique afin de contrôler l'évolution de l'enfant.

2.3 Emergence de l'automatisme, futur objectif de la prise en charge orthophonique ?

Au cours d'une tâche numérique quelle qu'elle soit, l'accès automatique aux représentations numériques libère des ressources attentionnelles. Une plus grande quantité de ressources attentionnelles est alors disponible pour la réalisation de la tâche, qui a, de fait, d'autant plus de chances d'être réussie. De plus, la libération de ressources attentionnelles réduit la fatigabilité de l'enfant. L'apparition de l'automatisme d'accès aux représentations numériques chez l'enfant dyscalculique contribuerait donc à le soulager au quotidien de diverses difficultés. Cela constitue un argument qui justifierait qu'un des objectifs de la prise en soin orthophonique soit l'émergence de l'automatisme d'accès aux grandeurs numériques. On pourrait alors imaginer que l'orthophoniste propose à l'enfant des activités destinées à rendre cet accès automatique. Il serait alors préférable qu'il s'agisse de tâches informatisées, pour pouvoir contrôler la durée de présentation et le temps de réponse accordé. Il pourrait s'agir par exemple d'un jeu au cours duquel apparaissent sur l'écran des quantités en code analogique auxquelles l'enfant doit associer le mot oral (en l'énonçant le plus rapidement possible) ou le chiffre arabe (en le tapant sur le clavier) correspondant. Au cours d'une autre tâche, l'enfant pourrait entendre un nombre oralement ou voir un chiffre arabe, puis avoir à produire une collection correspondant à ce qu'il a entendu ou vu précédemment (en cliquant autant de fois que le nombre d'éléments qu'il souhaite inclure à la collection). Le niveau de difficulté serait progressivement augmenté par la réduction de la durée de présentation ou du temps de réponse accordé ou par l'augmentation des quantités proposées. Il serait aussi possible de jouer sur l'effet de distance, en proposant de discriminer des quantités de plus en plus proches.

3 Perspectives de recherche.

3.1 Evolution de l'automatisme chez l'enfant dyscalculique

La présente étude a montré qu'en 3ème, 4ème et 5ème année de primaire, l'automatisme d'accès aux représentations numériques à partir du code arabe est absent chez l'enfant dyscalculique, alors qu'elle existe chez l'enfant sans difficulté en mathématiques. Il est donc envisageable que cette automatisme apparaisse à partir d'un certain niveau d'habiletés de traitement du nombre. Comme expliqué plus haut, cela signifierait que, chez un enfant dyscalculique qui progresse en traitement du nombre, on pourrait voir émerger cet accès automatique. Cependant, il est aussi possible qu'au contraire, le déficit d'accès automatique aux représentations numériques soit une des caractéristiques intrinsèques à la dyscalculie. Il s'agirait alors du déficit qui perdure malgré les progrès et les compensations mises en place. Cette hypothèse est probable, puisque les études chez l'adulte dyscalculique montrent clairement ce déficit (Ashkenazi et al. (2009); Kadosh et al. (2007) ; Rubinsten & Henik (2005) ; Rubinsten & Henik (2006)). Pour répondre à cette interrogation, une étude longitudinale sur ce sujet serait souhaitable.

S'il est avéré que l'automatisme d'accès émerge à partir d'un certain niveau d'habiletés en traitement du nombre, il sera alors intéressant de mener des études dans le but de définir ce niveau. Il faut rappeler d'ailleurs que la littérature est toujours lacunaire en ce qui concerne l'émergence de cette automatisme chez l'enfant tout-venant français. Connaître cet âge d'apparition permettrait de savoir à partir de quel âge l'absence d'accès automatique aux grandeurs numériques via le code arabe peut être considérée comme un marqueur de dyscalculie.

Dans le cas où, au contraire, il soit prouvé que le déficit d'automatisme des dyscalculiques persiste malgré leurs progrès en habiletés numériques, des études décrivant les compensations mises en place seront pertinentes.

Le même type de questionnement émerge par rapport à l'accès automatique aux grandeurs numériques à partir du code oral. Une des conclusions de cette étude est qu'en 3ème année de primaire et au-delà, tous les enfants, dyscalculiques ou non, présentent un accès automatique aux représentations numériques à partir du code oral. Les enfants dyscalculiques auraient-ils, plus tôt dans leur développement, un déficit sur ce point ? Ou bien le déficit d'automatisme accès aux grandeurs numériques des dyscalculiques ne concerne-t-il que le code arabe ? Là encore, des recherches approfondies seraient nécessaires. Cela permettrait d'ailleurs d'obtenir des données développementales pour l'enfant tout-venant à propos de l'accès automatique aux grandeurs numériques à partir du code oral. Ce sujet reste en effet lacunaire.

3.2 Des profils cognitifs particuliers à découvrir ?

Comme signalé précédemment, certains enfants ayant obtenu un score pathologique au test d'habiletés mathématiques n'ont pas été inclus à l'étude car ils n'étaient pas suivis en orthophonie pour rééducation de "dyscalculie ou de troubles logico-mathématiques". Ces enfants et/ou leurs familles n'ont donc pas de plainte les amenant à consulter en orthophonie. Il serait sans doute intéressant de comparer les profils cognitifs et numériques de ces enfants avec ceux des enfants suivis en orthophonie. Sont-ils également dyscalculiques ? Si oui, le fait qu'ils ne soient pas demandeurs d'orthophonie s'explique-t-il par un profil cognitif particulier ? Une étude spécifique pourrait se pencher sur ces interrogations.

D'autre part, les dyscalculiques avec déficit d'accès au sens du nombre présentent probablement une dyslexie associée. On peut donc envisager qu'ils aient des difficultés générales pour reconnaître les symboles écrits, qu'il s'agisse des symboles du code arabe ou des graphies de l'alphabet, et pour les associer à leur signification (quantité ou sons) de façon automatique. Il serait intéressant de tester cette hypothèse.

V Conclusion.

Cette étude a été menée pour répondre à une question de recherche insuffisamment explorée, celle de l'accès automatique aux grandeurs numériques à partir des codes symboliques chez les enfants dyscalculiques. Elle montre que les enfants dyscalculiques français de CE2, CM1, CM2 (entre 8 et 12 ans) présentent un déficit d'accès automatique aux grandeurs numériques à partir du code arabe. Cependant le protocole de la présente étude ne met pas en évidence de déficit d'accès automatique aux représentations numériques via le code oral (bien qu'un déficit de traitement intentionnel des nombres oraux ait été mis en évidence). Cela concerne à la fois les enfants présentant une dyscalculie avec déficit du sens du nombre et ceux dont la dyscalculie est liée à un déficit d'accès au sens du nombre. Ces données ouvrent des possibilités quant au contenu du bilan de dyscalculie, au suivi orthophonique de l'enfant dyscalculique et à sa prise en charge. Elles viennent aussi interroger les modèles développementaux existants en incitant à y prendre en compte l'automatisme d'accès au sens du nombre. Les résultats obtenus soulèvent également des perspectives de recherche : l'évolution de l'automatisme d'accès aux grandeurs numériques chez les dyscalculiques au fil de leur développement, l'exploration des aptitudes en code oral ainsi que l'éventualité de nouveaux profils cognitifs de dyscalculies sont par exemple des pistes d'investigations futures.

CONCLUSION

Ce travail de recherche en cognition numérique repose sur les bases théoriques du modèle du Triple Code (Deahene, 1992) et du modèle développemental en quatre étapes (Von Aster et Shalev, 2007). Il s'est positionné dans le cadre des études sur l'accès automatique aux grandeurs numériques à partir des codes symboliques. Il s'est plus particulièrement intéressé au cas des enfants dyscalculiques et s'est pour cela référé aux définitions les plus récentes de la dyscalculie et aux hypothèses théoriques qui concernent ce trouble des apprentissages.

La question de recherche justifiant cette étude était la suivante : existe-t-il un déficit d'accès automatique aux représentations numériques à partir des codes symboliques chez l'enfant dyscalculique ? Elle a été décomposée en deux objectifs de recherche, le premier concernant l'accès automatique aux grandeurs numériques via le code arabe, le second s'intéressant à cette automaticité d'accès à partir du code oral. L'hypothèse principale propose que l'enfant dyscalculique ait un déficit d'accès automatique aux grandeurs numériques aussi bien à partir du code arabe que du code oral.

Les résultats obtenus grâce aux données recueillies lors des expérimentations ont montré que les enfants dyscalculiques en CE2, CM1 et CM2 (entre 8 et 12 ans) présentent un déficit d'accès automatique aux grandeurs numériques à partir du code arabe. En revanche, il semblerait, selon le protocole expérimental, que leur accès automatique aux représentations numériques via le code oral soit préservé. Le déficit d'accès automatique aux grandeurs numériques de l'enfant dyscalculique porterait donc uniquement sur le code arabe.

Ces nouvelles informations peuvent avoir des portées cliniques et théoriques conséquentes. Les pratiques orthophoniques dans le domaine de la dyscalculie pourraient par exemple s'en enrichir en évaluant l'automaticité d'accès aux grandeurs numériques dans le bilan de cognition numérique. Il est aussi envisageable d'inclure l'émergence de cette automaticité aux objectifs de la rééducation orthophonique ou de la considérer comme un indice d'évolution de l'enfant. Au niveau de la recherche, les résultats de cette étude contribuent à encourager la prise en compte de l'automaticité d'accès au sens du nombre dans les modèles développementaux de référence. Ils invitent également à entreprendre des travaux sur l'évolution de cette automaticité chez l'enfant dyscalculique. En effet, il n'existe aucune donnée sur son éventuelle émergence chez le sujet dyscalculique. Par ailleurs, les conclusions de la présente étude incitent à développer les recherches sur l'accès automatique aux grandeurs numériques à partir du code oral en général. Plus largement, la possibilité de l'existence de profils cognitifs de dyscalculies encore méconnus apparaît. Il serait particulièrement intéressant d'explorer ce champ de recherche.

REFERENCES

- American Psychiatric Association's. (2013). Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux. Paris, France: Elsevier Masson.
- Ashkenazi, S., Mark-Zigdon, N., & Henik, A. (2012). Do subitizing deficits in developmental dyscalculia involve pattern recognition weakness? *Developmental Science*, 16, 35–46.
- Ashkenazi, S., Rubinsten, O., & Henik, A. (2009). Attention, automaticity, and developmental dyscalculia. *Neuropsychology*, 23(4), 535–40.
- Barbarelli, W. J., Katusic, S. K., Colligan, R. C., Weaver, A. L., & Jacobsen, S. J. (2005). Math learning disorder: incidence in a population-based birth cohort, 1976-82, Rochester, Minn. *Ambulatory Pediatrics: The Official Journal of the Ambulatory Pediatric Association*, 5(Math LD), 281–289.
- Barrouillet, P., Fayol, M., & Lathulière, E. (1997). Selecting between Competitors in Multiplication Tasks: An Explanation of the Errors Produced by Adolescents with Learning Difficulties. *International Journal of Behavioral Development*, 21, 253–276.
- Barth, La Mont, Lipton, & Spelke. (2005). Abstract number and arithmetic in preschool children.
- Ben-Shalom, T., Berger, A., & Henik, A. (2013). My brain knows numbers! - an ERP study of preschoolers' numerical knowledge. *Frontiers in Psychology*, 4(October), 716.
- Booth, J. L., & Siegler, R. S. (2006). Developmental and individual differences in pure numerical estimation. *Developmental Psychology*, 42(6), 189–201.
- Bugden, S., & Ansari, D. (2011). Individual differences in children's mathematical competence are related to the intentional but not automatic processing of Arabic numerals. *Cognition*, 118(1), 32–44.
- Butterworth, B. (1999). Handbook of Mathematical Cognition: Chapter 26: Developmental Dyscalculia, 455–468.
- Canizares, D., Crespo, V., & Alemany, E. (2013). 232. Symbolic and non-symbolic number magnitude processing in children with developmental dyscalculia. *Clinical Neurophysiology*, 119(3), e156.
- Carey, S. (2004). Bootstrapping and the origin of concepts. *Dædalus Winter*, 59–68.
- 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.
- De Visscher, A., & Noel, M. P. (2014). Arithmetic facts storage deficit: The hypersensitivity-to-interference in memory hypothesis. *Developmental Science*, 3, 434–442.
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1–42.
- Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1991). The Mental Representation of Parity and Number Magnitude.
- Desoete, Ceulemans, De Weerdt, & Pieters. (2012). Can we predict mathematical learning disabilities from symbolic and non symbolic comparison tasks in kindergarten ? Findings from a longitudinal study, 64–81.
- Desoete, & Gregoire. (2006). Numerical competence in young children and in children with mathematics learning disabilities.
- Fayol, M., Perros, H. & Seron, X. (2004). Les représentations numériques : caractéristiques, troubles, développement.
- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307–314.
- Ferreira, F. D. O., Wood, G., Pinheiro-Chagas, P., Lonnemann, J., Krinzinger, H., Willmes, K., & Haase, V. G. (2012). Explaining school mathematics performance from symbolic and nonsymbolic magnitude processing: Similarities and differences between typical and low-achieving children. *Psychology and Neuroscience*, 5(2004), 37–46.

-
- 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.
- Geary, C. (1993). Mathematical Disabilities : Cognitive, Neuropsychological, and Genetic Components.
- Gebuis, T., Cohen, Æ. R., & Edward, K. Æ. (2009). Automatic quantity processing in 5-year olds and adults. *Cognitive Processing*, 10, 133–142.
- Girelli, L., Lucangeli, D., & Butterworth, B. (2000). The development of automaticity in accessing number magnitude. *Journal of Experimental Child Psychology*, 76(2), 104–22.
- Halberda, J., & Feigenson, L. (2008). Developmental change in the acuity of the “Number Sense”: The Approximate Number System in 3-, 4-, 5-, and 6-year-olds and adults. *Developmental Psychology*, 44(5), 1457–1465.
- Heine, A., Tamm, S., Smedt, B. De, Thaler, V., Torbeyns, J., & Stern, E. (2010). The Numerical Stroop Effect in Primary School Children : A Comparison of Low , Normal , and High Achievers. *Child Neuropsychology: A Journal on Normal and Abnormal Development in Childhood and Adolescence*, 16(February 2013), 37–41.
- Henik, A., & Tzelgov, J. (1982). Is three greater than five: The relation between physical and semantic size in comparison tasks.
- Kadosh, R., Kadosh, K., Schuhmann, T., Kaas, A., Goebel, R., Henik, A., & Sack, A. T. (2007). Virtual dyscalculia induced by parietal-lobe TMS impairs automatic magnitude processing. *Current Biology : CB*, 17(8), 689–93.
- 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.
- Lafay, A., & Macoir, J. (2013). Développement des systèmes numériques non symboliques et prédicteurs de réussite mathématique. *Glossa*, 112.
- Lafay, A., Saint-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (2014). Revue narrative de littérature relative aux troubles cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale : déficit du sens du nombre ou déficit de l' accès aux représentations numériques mentales ?, 55(3), 1–2.
- Lafay, A., Saint-Pierre, M.-C., Macoir, J. (*soumis le 18 mars 2015, en révision*). Normalisation franco-qubécoise du test Zareki-R et du Tempo Test Rekenen pour l'évaluation des habiletés mathématiques auprès d'enfants de 8-9 ans.
- Landerl, K. (2013). Development of numerical processing in children with typical and dyscalculic arithmetic skills-a longitudinal study. *Frontiers in Psychology*, 4(July), 459.
- Landerl, K., Bevan, A., & Butterworth, B. (2004). Developmental dyscalculia and basic numerical capacities: A study of 8-9-year-old students. *Cognition*, 93, 99–125.
- Landerl, K., & Kölle, C. (2009). Typical and atypical development of basic numerical skills in elementary school. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(4), 546–565.
- Mejias, S., Mussolin, C., Rousselle, L., Grégoire, J., & Noël, M.-P. (2012). Numerical and nonnumerical estimation in children with and without mathematical learning disabilities. *Child Neuropsychology*, 18(February 2012), 550–575.
- Mundy, E., & Gilmore, C. K. (2009). Children's mapping between symbolic and nonsymbolic representations of number. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(4), 490–502.
- Mussolin, C., & Noël, M.-P. (2007). The nonintentional processing of Arabic numbers in children. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 29(3), 225–34.
- Noël, M.-P., & Rousselle, L. (2011). Developmental changes in the profiles of dyscalculia : an explanation based on a double exact-and-approximate number representation model.
- Opfer, J. E., & Siegler, R. S. (2007). Representational change and children's numerical estimation. *Cognitive Psychology*, 55, 169–195.
-

-
- 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.
- Pinel, P., Piazza, M., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2004). Distributed and overlapping cerebral representations of number, size, and luminance during comparative judgments. *Neuron*, 41(6), 983–993.
- Price, G. R., Holloway, I., Räsänen, P., Vesterinen, M., & Ansari, D. (2007). Impaired parietal magnitude processing in developmental dyscalculia. *Current Biology*, 17(24), 1042–1043.
- Raven, J. C. (1977). *Standard Progressive Matrices. Manuel PM47*. (Editions S). Issy-les-Moulineaux.
- Rousselle, L., & Noël, M.-P. (2007). Basic numerical skills in children with mathematics learning disabilities: a comparison of symbolic vs non-symbolic number magnitude processing. *Cognition*, 102(3), 361–95.
- Rubinsten, O., & Henik, A. (2005). Automatic activation of internal magnitudes: a study of developmental dyscalculia. *Neuropsychology*, 19(5), 641–8.
- Rubinsten, O., & Henik, A. (2006). Double dissociation of functions in developmental dyslexia and dyscalculia. *Journal of Educational Psychology*, 98(4), 854–867.
- Rubinsten, O., Henik, A., Berger, A., & Shahar-shalev, S. (2002). The Development of Internal Representations of Magnitude and Their Association with Arabic Numerals. *J Exp Child Psychol.*, 92, 74–92.
- Schleifer, P., & Landerl, K. (2011). Subitizing and counting in typical and atypical development. *Developmental Science*, 14, 280–291.
- Soltész, F., White, S., & Szűcs, D. (2011). Event-related brain potentials dissociate the developmental time-course of automatic numerical magnitude analysis and cognitive control functions during the first three years of primary school. *Developmental Neuropsychology*, 36(6), 682–701.
- Starkey, & Cooper. (2011). The development of subitizing in young children. *The British Psychological Society*, 13(4), 399 – 420.
- Temple, E., & Posner, M. I. (1998). Brain mechanisms of quantity are similar in 5-year-old children and adults. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95(June), 7836–7841.
- Tzelgov et Ganor-Stern. (2005). Automaticity in Processing Ordinal Information.
- Von Aster & Shalev. (2007). Review Number development and developmental dyscalculia. *Dev Med Child Neurol.*, 868–873.
- White, S. L. J., Sz, D., Wagner, J., & Medical, H. (2012). Symbolic number: the integration of magnitude and spatial representations in children aged 6 to 8 years. *Front Psychol.*, 2(January), 1–11.
- Wilson, A.J ; Dehaene, S. (2007). Number Sense and Developmental Dyscalculia.
- Zhou, Chen, Chen, Jiang, Z. (2007). Chinese kindergartners ' automatic processing of numerical magnitude in Stroop-like tasks. *Mem Cognit.*, 35(3), 464–470.
-

ANNEXES

Annexe I : Tableau d'équivalence des niveaux scolaires.

Age minimum	6 ans	7 ans	8 ans	9 ans	10 ans	11 ans
<i>Canada (Québec), Belgique, Suisse,...</i>	1 ^{er}	2 ^e	3 ^e	4 ^e	5 ^e	6 ^e
<i>France</i>	CP	CE1	CE2	CM1	CM2	6 ^e

Annexe II : Tableaux de répartition des items

1. Tâches de comparaison numérique (en modalités analogique, arabe et orale).

		Systèmes			
		SNP (36)		SNA (36)	
Congruence	Distance	+ Droite	+ Gauche	+ Droite	+ Gauche
Neutre physique (24)	1	1-2	2-1	6-7	7-6
		2-3	3-2	7-8	8-7
		3-4	4-3	8-9	9-8
	3	1-4	4-1	5-8	8-5
		1-4	4-1	5-8	8-5
		1-4	4-1	6-9	9-6

2. Tâches de Stroop numérique (en modalités arabe et orale).

		Systèmes			
		SNP (24 sans neutres)		SNA (24 sans neutres)	
Congruence	Distance	+ Droite	+ Gauche	+ Droite	+ Gauche
Neutre numérique (12 à faire tourner 2 fois)	0	2-2	2-2	7-7	7-7
		3-3	3-3	8-8	8-8
		4-4	4-4	9-9	9-9
Congruent (24)	1	1-2	2-1	6-7	7-6
		2-3	3-2	7-8	8-7
		3-4	4-3	8-9	9-8
	3	1-4	4-1	5-8	8-5
		1-4	4-1	5-8	8-5
		1-4	4-1	6-9	9-6
Incongruent (24)	1	2-1	1-2	7-6	6-7
		3-2	2-3	8-7	7-8
		4-3	3-4	9-8	8-9
	3	4-1	1-4	8-5	5-8
		4-1	1-4	8-5	5-8
		4-1	1-4	9-6	6-9

Annexe III : Lettres d'information et de consentement destinées aux parents.

1. Lettre destinée aux parents des enfants suivis en orthophonie.

Madame, Monsieur,

Nous sommes étudiantes en 3^{ème} année d'orthophonie et nous vous sollicitons dans le cadre de notre mémoire de fin d'étude, dirigé par Anne Lafay, doctorante en Médecine expérimentale à l'Université de Laval (Québec).

Nous nous intéressons au traitement automatique de la valeur des nombres chez les enfants d'âge scolaire. Notre projet porte sur la **dyscalculie développementale**.

La dyscalculie développementale est définie comme un trouble du développement des mathématiques, qui se manifeste par un trouble numérique (c'est-à-dire des difficultés importantes et persistantes à traiter et à manipuler les nombres). Chez les enfants sans trouble en mathématiques, plusieurs études ont montré qu'il existe une activation automatique de la signification des nombres sur présentation d'un nombre en code arabe (par exemple « 3 »). Toutefois, les données sur ce sujet sont très rares concernant les enfants avec dyscalculie développementale. De plus, il n'existe pas d'études s'intéressant à l'activation automatique de la valeur des nombres sur présentation d'un nombre en code oral (par exemple /trois/).

L'objectif de cette étude est ainsi de déterminer s'il existe un accès automatique à **la valeur d'un nombre**, qu'il soit présenté en **code arabe** (par exemple « 3 ») ou en **code oral** (par exemple /trois/) chez les enfants avec difficultés importantes en mathématiques.

Nous sommes à la recherche d'enfants :

1. scolarisés **en CE2, CM1 ou CM2, respectivement nés en 2005, 2004, 2003, âgés de 8 ans à 11 ans 11 mois.**

2. dont la **langue maternelle est le français** (bilingues acceptés).

3. **avec difficultés en mathématiques** (enfants potentiellement dyscalculiques) OU **sans difficulté mathématiques** (enfants dits « témoins » ou « contrôle », pour le groupe de comparaison).

4. Qui n'ont pas :

- de trouble de la vue non-corrigé
- de surdité
- de trouble moteur
- de trouble intellectuel
- de trouble psychiatrique

Votre enfant correspond à ces critères. Il peut donc, si vous le souhaitez, participer à l'expérimentation.

Dans le cadre de cette étude, nous rencontrerons votre enfant une fois, pendant une durée de 1h30 environ. Plusieurs évaluations seront réalisées. Tout d'abord, nous évaluerons les capacités cognitives générales (lecture, inhibition, mémoire, vitesse d'exécution) au moyen de tests standardisés, dans le but de bien connaître le profil de chaque enfant. Puis, pour objectiver le niveau en mathématiques, nous procéderons à la passation d'une batterie d'évaluation du traitement du nombre et du calcul. Enfin, de courtes tâches informatisées (tâches expérimentales développées dans le cadre du projet de recherche) seront administrées. Il s'agit de tâches de **comparaisons de nombres présentés en code analogique** (c'est-à-dire en ensembles de points, ex : •••), **en code arabe, puis en code oral**. C'est cette partie de l'expérimentation qui permettra d'observer ou non l'activation automatique de la signification des nombres.

L'étude se déroulera au sein du cabinet d'orthophonie ou à votre domicile selon une entente entre vous et l'orthophoniste. Votre présence n'est pas requise durant la rencontre d'expérimentation.

Afin de confirmer votre accord, veuillez remplir le coupon ci-joint et nous le retourner par votre orthophoniste.

Nous restons à votre disposition pour vous fournir les résultats de votre enfant ainsi que les résultats de l'étude.

En participant, vous contribuez à l'avancement des connaissances dans le domaine du développement des mathématiques et du diagnostic de la dyscalculie.

Si vous avez des questions, n'hésitez pas à nous contacter. Nous vous remercions chaleureusement par avance pour votre collaboration.

Emilie Julien et Eve Marcon
Étudiantes en orthophonie (3ème année)

Contacts :

emiliejulien7@gmail.com
evemarcon93@gmail.com
anne.lafay.1@ulaval.ca

COUPON RÉPONSE

Je, soussigné(e) _____ (votre NOM, prénom),

autorise / n'autorise pas (rayer la mention inutile)

mon enfant _____ (NOM, prénom de votre enfant)

à participer aux activités menées dans le cadre du mémoire de Mlles JULIEN Emilie et MARCON Eve.

Signature du tuteur ou parent légal : _____ **date :** ____ / ____ / ____.

2. Lettre destinée aux parents des enfants rencontrés en école.

Madame, monsieur,

Nous sommes étudiantes en 3^{ème} année d'orthophonie et nous vous sollicitons dans le cadre de notre mémoire de fin d'étude, dirigé par Anne Lafay, doctorante en Médecine expérimentale à l'Université de Laval (Québec).

Nous nous intéressons au traitement automatique de la valeur des nombres chez les enfants d'âge scolaire. Notre projet porte sur la **dyscalculie développementale**.

La dyscalculie développementale est définie comme un trouble du développement des mathématiques, qui se manifeste par un trouble numérique (c'est-à-dire des difficultés importantes et persistantes à traiter et à manipuler les nombres). Chez les enfants sans trouble en mathématiques, plusieurs études ont montré qu'il existe une activation automatique de la signification des nombres sur présentation d'un nombre en code arabe (par exemple « 3 »). Toutefois, les données sur ce sujet sont très rares concernant les enfants avec dyscalculie développementale. De plus, il n'existe pas d'études s'intéressant à l'activation automatique de la valeur des nombres sur présentation d'un nombre en code oral (par exemple /trois/).

L'objectif de cette étude est ainsi de déterminer s'il existe un accès automatique à **la valeur d'un nombre**, qu'il soit présenté en **code arabe** (par exemple « 3 ») ou en **code oral** (par exemple /trois/) chez les enfants avec difficultés importantes en mathématiques.

Nous sommes à la recherche d'enfants :

1. scolarisés **en CE2, CM1 ou CM2, respectivement nés en 2005, 2004, 2003, âgés de 8 ans à 11 ans 11 mois.**

2. dont la **langue maternelle est le français** (bilingues acceptés).

3. **avec difficultés en mathématiques** (enfants potentiellement dyscalculiques) OU **sans difficulté mathématiques** (enfants dits « témoins » ou « contrôle », pour le groupe de comparaison).

4. Qui n'ont pas :

- de trouble de la vue non-corrigé
- de surdité
- de trouble moteur
- de trouble intellectuel
- de trouble psychiatrique

Votre enfant correspond à ces critères. Il peut donc, si vous le souhaitez, participer à l'expérimentation.

Dans le cadre de cette étude, nous rencontrerons votre enfant une fois, pendant une durée de 1h30 environ. Plusieurs évaluations seront réalisées. Tout d'abord, nous évaluerons les capacités cognitives générales (lecture, inhibition, mémoire, vitesse d'exécution, discrimination auditive et visuelle) au moyen de tests standardisés dans le

but de bien connaître le profil de chaque enfant. Puis, pour objectiver le niveau en mathématiques, nous procéderons à la passation d'une batterie d'évaluation du traitement du nombre et du calcul. Enfin, de courtes tâches informatisées (tâches expérimentales développées dans le cadre du projet de recherche) seront administrées. Il s'agit de tâches de **comparaisons de nombres présentés en code analogique** (c'est-à-dire en ensembles de points, ex : •••), **en code arabe, puis en code oral**. C'est cette partie de l'expérimentation qui permettra d'observer ou non l'activation automatique de la signification des nombres.

L'étude se déroulera au sein de l'école de votre enfant. Votre présence n'est pas requise durant la rencontre d'expérimentation.

Afin de confirmer votre accord, veuillez remplir le coupon ci-joint et nous le retourner par l'enseignant de votre enfant.

Nous restons à votre disposition pour vous fournir les résultats de votre enfant ainsi que les résultats de l'étude.

En participant, vous contribuez à l'avancement des connaissances dans le domaine du développement des mathématiques et du diagnostic de la dyscalculie.

Si vous avez des questions, n'hésitez pas à nous contacter. Nous vous remercions chaleureusement par avance pour votre collaboration.

Emilie Julien et Eve Marcon

Étudiantes en orthophonie (3ème année)

Contacts :

emiliejulien7@gmail.com

evemarcon93@gmail.com

anne.lafay.1@ulaval.ca

COUPON RÉPONSE

Je, soussigné(e) _____ (votre NOM, prénom),

autorise / n'autorise pas (rayer la mention inutile)

mon enfant _____ (NOM, prénom de votre enfant)

à participer aux activités menées dans le cadre du mémoire de Mlles JULIEN Emilie et MARCON Eve.

Signature du tuteur ou parent légal : _____ **date :** ____ / ____ / ____.

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Liste des tableaux :

Tableau 1. Récapitulatif des études portant sur l'automatlicité chez l'enfant tout-venant.	18
Tableau 2. Récapitulatif des études portant sur l'automatlicité chez l'enfant dyscalculique.....	24
Tableau 3. Récapitulatif des objectifs et hypothèses.....	29
Tableau 4. Caractéristiques de la population.....	31
Tableau 5. Moyenne (écart type) des performances.	44
Tableau 6. Moyenne (Ecart-type) des performances aux Tâches de réaction motrice.	45
Tableau 7. Moyenne (Ecart-type) des performances à la tâche de comparaison analogique.	46
Tableau 8. Moyenne (Ecart-type) des performances à la tâche de comparaison numérique de nombres arabes.	47
Tableau 9. Moyenne (Ecart-type) des performances à la tâche de comparaison numérique de nombres oraux.	49
Tableau 10. Moyenne (Ecart-type) des performances à la tâche de Stroop numérique en modalité arabe.	51
Tableau 11. Moyenne (Ecart-type) des performances à la tâche de Stroop numérique en modalité orale.	53
Tableau 12. Corrélations entre les tâches expérimentales et le Zareki-R.	54

Liste des figures:

Figure 1 : Modèle du Triple Code (Dehaene, 1992).	11
Figure 2 : Ligne numérique mentale (Dehaene, Bossini et Giraux, 1991).	12
Figure 3 : Modèle développemental de la cognition numérique (Von Aster & Shalev, 2007).	13
Figure 4 : Protocole de recrutement groupe Ctrl.....	32
Figure 5 : Protocole de recrutement groupe DC et DSM.	34
Figure 6 : Exemple d'item tâche de comparaison numérique analogique.....	37
Figure 7 : Exemple d'item tâche de comparaison numérique de nombres arabes.....	38
Figure 8 : Exemple d'item tâche de comparaison numérique de nombres oraux.	38
Figure 9 : Exemple d'item tâche de Stroop numérique en modalité arabe.	39
Figure 10 : Exemple d'item tâche de Stroop numérique en modalité orale.	40
Figure 11 : Score en fonction des Groupes, en fonction de la Congruence à la tâche de Stroop numérique en modalité arabe.	50
Figure 12 : Score en fonction des Groupes, en fonction de la Congruence à la tâche de Stroop numérique en modalité orale.	52
Figure 13 : Proposition de modèle développemental	65

TABLE DES MATIERES

ORGANIGRAMMES.....	2
1 Université Claude Bernard Lyon1	2
1.1 Secteur Santé :	2
1.2 Secteur Sciences et Technologies :	2
2 Institut Sciences et Techniques de Réadaptation FORMATION ORTHOPHONIE	3
REMERCIEMENTS	4
SOMMAIRE	5
INTRODUCTION	9
PARTIE THEORIQUE	10
I Modèles théoriques de base.	11
1 Modèle du Triple Code (Dehaene, 1992).....	11
1.1 Les trois codes numériques.	11
1.2 La ligne numérique.	12
2 Modèle en quatre étapes (Von Aster & Shalev, 2007).	13
3 Conclusion.	14
II L'accès automatique aux grandeurs numériques.	15
1 Le Stroop numérique.	15
2 L'accès automatique aux grandeurs numériques chez l'adulte.....	15
3 L'accès automatique aux grandeurs numériques chez l'enfant.	16
III La dyscalculie développementale.	19
1 Définitions.....	19
2 Confrontation aux modèles théoriques.....	20
3 Hypothèses autour du déficit à l'origine de la dyscalculie.....	21
3.1 Hypothèse du déficit du sens du nombre.....	21
3.2 Hypothèse du déficit d'accès au sens du nombre.	21
IV La dyscalculie et l'accès automatique aux grandeurs numériques.	22
1 L'accès automatique aux grandeurs numériques chez l'adulte dyscalculique.	22
2 L'accès automatique aux grandeurs numériques chez l'enfant dyscalculique.....	23
PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES.....	26
I Notions théoriques clés et question de recherche.	27
II Objectifs.....	27
1 Objectif principal.	27

2	Objectifs préalables.	27
3	Objectifs de recherche.....	28
III	Hypothèses théoriques.	28
1	Hypothèses préalables.....	28
2	Hypothèses de recherche	28
IV	Hypothèses opérationnelles.....	28
1	Hypothèses opérationnelles préalables.	28
2	Hypothèses opérationnelles de recherche	29
	PARTIE EXPERIMENTATION	30
I	Participants.....	31
1	Critères d’inclusion et d’exclusion de la population.....	31
2	Caractéristiques de la population.....	31
3	Groupe contrôle et groupes expérimentaux.	31
3.1	Constitution du groupe contrôle.	31
3.2	Constitution des groupes expérimentaux.....	32
II	Matériel.....	34
1	Evaluation cognitive.....	34
1.1	Habiletés mathématiques.....	34
1.2	Raisonnement non verbal.....	35
1.3	Identification de mots écrits.....	35
1.4	Inhibition.....	35
1.5	Mémoire à court terme et mémoire de travail auditivo-verbale.	36
2	Tâches expérimentales.....	36
2.1	Description des tâches.....	36
III	Procédure.....	41
1	Conditions de passation.....	41
2	Ordre de passation.	41
	PRESENTATION DES RESULTATS	42
I	Age.....	43
II	Tâches cognitives.....	43
1	Evaluation cognitive.....	43
1.1	Raisonnement non verbal.....	43
1.2	Identification de mots écrits.....	43
1.3	Inhibition.....	43

1.4	Mémoire à court terme et mémoire auditivo-verbale.	44
2	Tests d'habiletés mathématiques.....	44
III	Tâches expérimentales.....	45
1	Tâches de réaction motrice.	45
2	Tâches de comparaison numérique.....	45
2.1	Tâche de comparaison numérique analogique.....	45
2.2	Tâche de comparaison numérique arabe.	47
2.3	Tâche de comparaison numérique orale.	48
3	Tâches de Stroop numérique.....	49
3.1	Tâche de Stroop numérique en modalité arabe.....	49
3.2	Tâche de Stroop numérique en modalité orale.	51
IV	Corrélations.	54
	DISCUSSION DES RESULTATS	55
I	Introduction :	56
II	Interprétation des résultats.	56
1	Résultats en lien avec les objectifs préalables.....	56
1.1	Objectif préalable A : identifier s'il existe un déficit du sens du nombre chez les enfants dyscalculiques.	56
1.2	Objectif préalable B : identifier s'il existe un déficit d'accès intentionnel au sens du nombre via le code arabe chez les enfants dyscalculiques.....	57
1.3	Objectif préalable C : identifier s'il existe un déficit d'accès intentionnel au sens du nombre via le code oral chez les enfants dyscalculiques.....	58
1.4	Synthèse : profil cognitif numérique des groupes en difficultés mathématiques DC et DSM 60	
2	Résultats en lien avec les objectifs de recherche.	60
2.1	Objectif de recherche 1 : identifier s'il existe un déficit de l'accès automatique aux représentations numériques via le code arabe chez les enfants dyscalculiques.	60
2.2	Objectif de recherche 2 : identifier s'il existe un déficit de l'accès automatique aux représentations numériques via le code oral chez les enfants dyscalculiques.	61
2.3	Synthèse : le traitement automatique des codes symboliques chez les DC et les DSM.	62
III	Limites.....	62
1	Mode de recrutement.	62
1.1	Choix d'inclusion et d'exclusion.....	62
1.2	DC et DSM, deux groupes présentant des dyscalculies avec troubles associés.....	63
2	Sensibilité de l'étalonnage du Zareki-R.....	63
3	Validité de la tâche de Stroop numérique en modalité orale.....	64

IV Perspectives.	64
1 Implications théoriques.	64
2 Implications cliniques.	65
2.1 Déficit d'automatisme, futur élément de diagnostic ?	65
2.2 Emergence de l'automatisme, futur indice d'évolution ?	65
2.3 Emergence de l'automatisme, futur objectif de la prise en charge orthophonique ?	66
3 Perspectives de recherche.	66
3.1 Evolution de l'automatisme chez l'enfant dyscalculique	66
3.2 Des profils cognitifs particuliers à découvrir ?	67
V Conclusion.	67
CONCLUSION	68
REFERENCES	69
ANNEXES	72
Annexe I : Tableau d'équivalence des niveaux scolaires.	73
Annexe II : Tableaux de répartition des items	74
1. Tâches de comparaison numérique (en modalités analogique, arabe et orale).	74
2. Tâches de Stroop numérique (en modalités arabe et orale).	75
Annexe III : Lettres d'information et de consentement destinées aux parents.	76
1. Lettre destinée aux parents des enfants suivis en orthophonie.	76
2. Lettre destinée aux parents des enfants rencontrés en école.	78
TABLE DES ILLUSTRATIONS	80
TABLE DES MATIERES	81

DEFICIT DE L'ACCES AUTOMATIQUE AUX GRANDEURS NUMERIQUES A PARTIR DES CODES SYMBOLIQUES CHEZ L'ENFANT DYSCALCULIQUE

84 Pages

Mémoire d'orthophonie – UCBL- ISTR – Lyon 2015

RESUME

La recherche en cognition numérique s'est intéressée à l'accès automatique aux représentations mentales des grandeurs numériques. Pour le mettre en évidence, les précédentes études ont employé des tâches de type Stroop numérique et ont observé l'effet de congruence de taille, témoin de l'automatisme d'accès aux grandeurs numériques. La présente étude s'interroge sur l'existence d'un déficit de l'accès automatique aux grandeurs numériques à partir des codes symboliques (code arabe et code oral) chez l'enfant avec dyscalculie développementale. Dans ce cadre, des tâches de Stroop numérique ont été élaborées en modalité arabe et orale, ainsi que des tâches destinées à évaluer l'accès intentionnel aux grandeurs numériques des participants. Une évaluation cognitive a également été menée. Les performances de 78 enfants en classe de CE2, CM1 et CM2 ont été analysées : 46 enfants constituent le groupe Contrôle, 11 enfants forment le groupe Dyscalculique et 21 enfants appartiennent au groupe avec Difficultés Subjectives en Mathématiques. D'après les données issues des tâches nécessitant un accès intentionnel aux représentations numériques, le groupe Dyscalculique est composé d'enfants présentant une dyscalculie avec déficit d'accès au sens du nombre, alors que le groupe avec Difficultés Subjective en Mathématiques regroupe en fait des enfants qui présentent un profil cognitif de dyscalculie avec déficit du sens du nombre. Les résultats des groupes Dyscalculiques et avec Difficultés Subjectives en Mathématiques ne montrent pas d'effet de congruence de taille à la tâche de Stroop numérique en modalité arabe. En revanche, un effet de congruence de taille est observé à la tâche de Stroop numérique en modalité orale. Cela signifie que les enfants dyscalculiques présentent un déficit de l'accès automatique aux grandeurs numériques à partir du code arabe. Il semblerait, en revanche, que cet accès soit préservé à partir du code oral. Ces données apportent des informations nouvelles qui contribuent à cerner le profil cognitif des enfants dyscalculiques. Il pourrait être judicieux de les prendre en considération dans le diagnostic et la prise en charge de la dyscalculie.

MOTS-CLES

Dyscalculie développementale – accès automatique – enfants – Stroop numérique – effet de congruence de taille – codes symboliques arabe et oral.

MEMBRES DU JURY

THEROND Béatrice
CHAMBOST Sophie
DESCHAMPS Emmanuelle

DIRECTEUR DE MEMOIRE

Anne LAFAY

DATE DE SOUTENANCE

25 Juin 2015
