



HAL
open science

Implication de la mémoire de travail dans la compréhension syntaxique chez des enfants avec troubles de la cognition mathématique

Flora Granados

► **To cite this version:**

Flora Granados. Implication de la mémoire de travail dans la compréhension syntaxique chez des enfants avec troubles de la cognition mathématique. Médecine humaine et pathologie. 2018. dumas-01828583

HAL Id: dumas-01828583

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01828583>

Submitted on 3 Jul 2018

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

MÉMOIRE DE RECHERCHE présenté pour l'obtention du
**CERTIFICAT DE CAPACITE D'ORTHOPHONISTE
ET DU GRADE DE MASTER 2 D'ORTHOPHONIE**

Présenté et soutenu le 21 juin 2018 par

GRANADOS Flora
Née le 01 avril 1994 à Perpignan

**IMPLICATION DE LA MEMOIRE DE TRAVAIL
DANS LA COMPREHENSION SYNTAXIQUE
CHEZ DES ENFANTS AVEC TROUBLES
DE LA COGNITION MATHEMATIQUE**

Directrice de Mémoire : **SCHON Ghislaine,**

Orthophoniste

Co-directrice de Mémoire : **THUBE-POLI Isabelle,**

Orthophoniste

Nice

2018

**Université Nice Sophia Antipolis – Faculté de Médecine – Département
d’Orthophonie**

MÉMOIRE DE RECHERCHE présenté pour l’obtention du
**CERTIFICAT DE CAPACITE D’ORTHOPHONISTE
ET DU GRADE MASTER 2 D’ORTHOPHONIE**

Par

GRANADOS Flora
Née le 01 avril 1994 à Perpignan

**IMPLICATION DE LA MEMOIRE DE TRAVAIL
DANS LA COMPREHENSION SYNTAXIQUE
CHEZ DES ENFANTS AVEC TROUBLES
DE LA COGNITION MATHEMATIQUE**

Directrice de Mémoire : **SCHON Ghislaine,**

Orthophoniste

Co-directrice de Mémoire : **THUBE-POLI Isabelle,**

Orthophoniste

Nice

2018



REMERCIEMENTS

*« Il est bien des choses qui ne paraissent impossibles que tant qu'on ne les a pas tentées. »
André Gide*

Tout d'abord, je tiens à remercier Ghislaine Schon et Isabelle Thubé-Poli pour leur accompagnement et leurs conseils au long de ce travail.

Un grand merci aux orthophonistes qui m'ont aidée à trouver des sujets de mémoire. Et mille mercis aux enfants et à leurs parents qui ont accepté de participer à cette étude. Merci de m'avoir accueillie avec sourires et enthousiasme.

Je remercie également mes maîtres de stages qui ont embelli mon quotidien. Merci Florence pour ton immense gentillesse ; merci Virginie M. pour ta confiance ; merci Virginie D. pour ta joie de vivre ; merci Marianne pour avoir si vite cru en moi. Enfin, merci Aurélie pour tous ces lundis matins qui ont ajouté tant de couleurs dans ma dernière année.

Des millions de mercis ne suffiraient pas pour les trois étoiles qui ont guidé mon parcours. Aurore, Anne-Maëlle et Lorette, vous avez été des piliers, tout en modestie et générosité. On arrive à Nice en pensant repartir avec un diplôme. Et on repart de Nice avec des amies. Finalement, « il nous restera ça ». Je vous souhaite de vous épanouir dans la « vraie vie », de croire en vous, car vous êtes des êtres de lumière. Vraiment.

Bien sûr, un merci tout particulier à ma grande famille qui m'a apporté soutien et amour même à des kilomètres. Alors merci à mes oncles et tantes, à mes cousins et cousines. Et surtout merci à mes grands-parents, Soledad et José, Marie-Carmen et Miguel. De penser à vous et à votre ténacité m'a empli le cœur de courage.

Merci Elise pour ta tendresse infinie.

Merci ma Lucie, ma boule d'énergie. Merci pour tes mots, pour tes chansons sous la douche qui ont bercé l'écriture de ce mémoire. Merci d'apporter autant de bonheur dans ma vie depuis 18 ans.

Et à mes parents qui n'ont cessé de croire en moi, un immense et profond MERCI. Pour tout. Pour votre confiance, votre ouverture d'esprit, votre façon de nous aimer et de nous porter. Merci maman et papa, de m'avoir permis de vivre cette aventure.

Enfin, une pluie de mercis à Alexis, mon soleil depuis neuf ans. Merci d'avoir été bien plus qu'un fiancé attentionné ; merci d'avoir été mon cuisinier, mon taxi, mon psy, mon informaticien. Merci pour tes petits plats qui m'ont donné la force de tenir cinq ans. Merci d'avoir tenu le cap face à nos tempêtes, malgré notre navire de 20m².

Pour finir, merci à mon vieil ordinateur de ne pas m'avoir lâchée, et d'avoir accepté tous nos rendez-vous nocturnes !

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS.....	3
SOMMAIRE.....	4
INTRODUCTION.....	5
LISTE DES ABBREVIATIONS.....	7
PARTIE THEORIQUE.....	8
I. LA MEMOIRE DE TRAVAIL.....	9
1. <i>Bases théoriques de la mémoire de travail</i>	9
2. <i>Evolution du concept de mémoire de travail</i>	13
3. <i>Rôle de la mémoire de travail dans les acquisitions scolaires et langagières</i>	16
II. MEMOIRE DE TRAVAIL ET COGNITION MATHÉMATIQUE.....	18
1. <i>Les troubles de la cognition mathématique</i>	18
2. <i>Implication de la mémoire de travail dans la cognition mathématique</i>	23
3. <i>Troubles associés et comorbidités</i>	25
III. MEMOIRE DE TRAVAIL ET LANGAGE.....	26
1. <i>Développement de la morphosyntaxe</i>	26
2. <i>Implication de la mémoire de travail dans la syntaxe</i>	28
3. <i>Troubles associés : cognition mathématique et langage oral</i>	32
PARTIE PRATIQUE.....	33
I. PROBLEMATIQUE ET OBJECTIFS.....	34
1. <i>Problématique</i>	34
2. <i>Objectifs</i>	35
II. MATÉRIEL ET MÉTHODES.....	36
1. <i>Participants</i>	36
2. <i>Matériel et procédure</i>	37
III. RESULTATS.....	45
1. <i>Stratégies d'analyse des données</i>	45
2. <i>Objectif principal</i>	47
3. <i>Objectifs secondaires</i>	53
DISCUSSION ET PERSPECTIVES.....	62
I. INTERPRÉTATION DES RESULTATS.....	63
1. <i>Objectif principal</i>	63
2. <i>Objectif secondaire 1</i>	67
3. <i>Objectif secondaire 2</i>	71
II. PERSPECTIVES.....	75
CONCLUSION.....	76
BIBLIOGRAPHIE.....	77
TABLE DES ILLUSTRATIONS - TABLEAUX.....	87
TABLE DES ILLUSTRATIONS - FIGURES.....	88
ANNEXES.....	89
ANNEXE I : REMARQUES DES ORTHOPHONISTES SUR NOS PARTICIPANTS.....	90
ANNEXE II : ORDRE DE COMPLEXITÉ ET NATURE DES ÉNONCÉS (ECOSSE).....	95
ANNEXE III : TABLEAUX RESULTATS ET REMARQUES QUALITATIVES.....	96
ANNEXE IV : HISTOGRAMMES DES ERREURS À L'ÉCOSSE.....	100

INTRODUCTION

« Il n'a pas la bosse des maths » ; cette phrase-là, de nombreux enfants l'ont déjà entendue. Pourtant, il existe un trouble spécifique affectant les habiletés numériques : la dyscalculie, qui serait aussi répandue que la dyslexie. Cependant, la dyscalculie est moins reconnue et étudiée. Il s'agit pourtant d'un trouble persistant aux lourdes répercussions. La dyscalculie peut perturber le raisonnement logico-mathématique, l'estimation et la comparaison de quantités, la résolution de calculs et de problèmes mathématiques, ou encore le comptage. Ce trouble interfère donc avec la vie scolaire, quotidienne et sociale. Les enfants dyscalculiques peuvent développer une anxiété des mathématiques, et un sentiment d'échec perpétuel avec perte d'estime de soi. La dyscalculie, ou trouble de la cognition mathématique, est donc une affection neuro-développementale à étudier.

D'après plusieurs recherches, les enfants dyscalculiques peuvent présenter un dysfonctionnement de la mémoire de travail. Cette mémoire, selon le modèle initial de Baddeley, permet de maintenir des informations tout en effectuant un traitement cognitif. La mémoire de travail est sollicitée dans la compréhension orale, notamment pour les phrases complexes.

L'implication de la mémoire de travail dans la compréhension syntaxique a été étudiée et démontrée chez des enfants avec troubles du langage oral, mais pas chez des enfants dyscalculiques. Un déficit de la mémoire de travail pourrait-il affecter la compréhension syntaxique chez des enfants dyscalculiques ?

L'objectif de notre travail est donc d'analyser, chez des enfants avec troubles de la cognition mathématique, la part d'implication des capacités de mémoire de travail verbale dans la compréhension syntaxique. De plus, nous envisageons d'examiner les types de phrases engendrant le plus d'erreurs de compréhension chez ces sujets. Enfin, nous avons également pour objectif d'identifier les fonctions exécutives déficitaires chez ces enfants.

Dans la partie théorique, nous définirons tout d'abord la notion de mémoire de travail, pour comprendre son fonctionnement à travers différents modèles. Puis, nous examinerons l'implication de la mémoire de travail dans la cognition mathématique. Enfin, nous approfondirons le rôle de la mémoire de travail dans le langage, notamment dans la compréhension syntaxique.

INTRODUCTION

Dans notre partie pratique, nous présenterons notre protocole expérimental visant à évaluer les capacités mnésiques, exécutives et syntaxiques de nos sujets dyscalculiques. Puis, nous détaillerons les résultats obtenus à travers des analyses corrélationnelles, des analyses de régression linéaire et des analyses qualitatives.

Enfin, nous consacrerons notre dernière partie à la discussion et aux perspectives. Nous tenterons alors d'examiner, chez les participants dyscalculiques de notre étude, la part d'implication de la mémoire de travail verbale dans la compréhension syntaxique.

La finalité de ce travail est d'ouvrir la recherche sur un aspect peu étudié : la compréhension syntaxique chez les enfants avec troubles de la cognition mathématique, en lien avec leurs capacités mnésiques. Ce mémoire a pour but principal de chercher à comprendre les difficultés rencontrées par les enfants dyscalculiques, afin qu'ils soient accompagnés au mieux dans leur prise en charge mais également dans leur scolarité et dans leur quotidien.

LISTE DES ABBREVIATIONS

- AC** : Administrateur Central
BE : Buffer Episodique
BP : Boucle Phonologique
CCV : Consonne-Consonne-Voyelle
CM : Cognition Mathématique
CV : Consonne-Voyelle
CVS : Calepin Visuo-Spatial
DC : Dyscalculie
DL : Dyslexie
E.T : Ecart-type
FA : Faits Arithmétiques
FE : Fonctions Exécutives
MCT : Mémoire à Court Terme
MLT : Mémoire à Long Terme
MT : Mémoire de Travail
OO : Objet-Objet
OD : Objet Direct
OS : Objet-Sujet
OSV : Objet-Sujet-Verbe
OVS : Objet-Verbe-Sujet
P. : Percentile
PM : Pseudo-mots
SAS : Système Attentionnel Superviseur
SO : Sujet-Objet
SS : Sujet-Sujet
SVO : Sujet-Verbe-Objet
TA : Troubles des Apprentissages
TSDLO : Trouble Spécifique de Développement du Langage Oral

Partie I
PARTIE THEORIQUE

I. La mémoire de travail

Plusieurs études ont montré l'implication de la mémoire de travail (MT) dans plusieurs tâches cognitives complexes telles que la compréhension, l'apprentissage, et le raisonnement (*Miyake & Shah, 1999 ; Baddeley, 1992 ; Alloway & Alloway, 2010*).

1. Bases théoriques de la mémoire de travail

1.1. La mémoire de travail au sein du processus mnésique

Nous pouvons distinguer les mémoires à long terme (MLT) et les mémoires transitoires. Les mémoires transitoires se composent de la mémoire à très court terme (mémoire sensorielle), de la mémoire à court terme (MCT), et de la MT. Ces fonctions mnésiques sont interdépendantes bien que régies par des faisceaux neuronaux différents, ce qui rend possible l'atteinte d'un seul type de mémoire (*Mazeau & Glasel, 2017*).

Selon le modèle d'Atkinson et Shiffrin (*1968*), plusieurs étapes se succèdent lors du processus mnésique. Tout d'abord, les informations auditivo-verbales ou visuospatiales sont perçues et temporairement maintenues dans la mémoire sensorielle. Puis, les données passent de façon sérielle en MT où elles sont analysées. La MT permet alors de maintenir actives, quelques secondes, des informations séquentielles en nombre limité. Ces informations sont ensuite traitées simultanément (*Baddeley & Hitch, 1974 ; Barrouillet & Camos, 2017*). Pour ce faire, des données sont récupérées en MLT (sémantique, épisodique, procédurale) et confrontées aux informations entrantes. Enfin, les résultats de cette tâche cognitive sont oubliés ou conservés en MLT (*Atkinson & Shiffrin, 1968 ; Mazeau & Pouhet, 2014*).

1.2. Modèle de la mémoire de travail selon Alan Baddeley

En 1974, Baddeley et Hitch supposent l'existence d'une MT, qu'ils définissent comme un système de rétention temporaire d'informations pendant la réalisation de tâches cognitives. Cette mémoire dispose de capacités de stockage limitées, concernant la durée et le nombre d'informations maintenues (*Baddeley & Hitch, 1974*). Un modèle de MT à trois composantes est alors proposé par Alan Baddeley, qui le complète progressivement (*Baddeley, 1986 ; 1992 ; 2000 ; 2003*).

1.2.1. La boucle phonologique (BP), système de stockage

Cette composante permet de maintenir, de façon temporaire, des informations auditivo-verbales en nombre limité. La BP se compose de deux sous-systèmes : le stock phonologique, et la récapitulation articulatoire qui permet de conserver les informations durant le travail cognitif grâce à un phénomène de subvocalisation. Le nombre d'items maintenus est appelé « empan mnésique » et peut s'évaluer par des tâches de rétention/restitution de listes sérielles (chiffres, lettres, mots...). Il représente l'espace de stockage, de 1 à 9 items, pendant environ 2 secondes. L'empan est proportionnel à l'âge et au niveau intellectuel. De plus, la taille de l'empan mnésique dépend de la longueur des mots, de leur similarité phonologique, de la vitesse de récapitulation, et de la familiarité des éléments à mémoriser (*Baddeley, 1992 ; Mazeau & Pouhet, 2014*).

1.2.2. Le calepin visuo-spatial (CVS), système de stockage

Cette composante fonctionne de manière analogue à la BP mais stocke les informations visuelles et visuo-spatiales, ainsi que les images mentales produites au cours du travail cognitif (*Baddeley, 1992*).

1.2.3. L'administrateur central (AC)

L'AC joue un rôle central dans le schéma de Baddeley puisqu'il coordonne les deux systèmes « esclaves » décrits ci-dessus, en leur distribuant les ressources attentionnelles (*Baddeley, 1992*). Cette composante de la MT permet la gestion des données et non leur stockage : il rend possible la réalisation concomitante de deux tâches cognitives. L'AC est la part exécutive de la MT : il est en lien étroit avec l'attention (SAS), et les fonctions exécutives (*Miyake et al., 2000 ; Mazeau & Pouhet, 2014*).

1.2.4. Le buffer épisodique (BE)

Ce quatrième sous-système a été introduit par Baddeley (2000). Il s'agit d'un espace de stockage, également sous le contrôle de l'AC, qui rend possible les interactions avec la MLT. Il permet de récupérer des informations en MLT (épisodique, sémantique, procédurale) et d'y inscrire les données après leur traitement en MT (*Baddeley, 2000 ; Mazeau & Pouhet, 2014*).

Ainsi, la MT permet le maintien actif d'informations, dans le but de réaliser des actions à court terme. Cette mémoire est dépendante des fonctions attentionnelles et exécutives, comme toutes les fonctions mnésiques (*Mazeau & Glasel, 2017*).

1.3. Contrôle attentionnel et processus exécutifs

1.3.1. Système attentionnel superviseur (SAS)

L'AC est en relation directe avec le SAS (*Miyake & Shah, 1999 ; Mazeau & Pouhet, 2014*), puisqu'il permet la répartition des ressources attentionnelles entre la BP et le CVS. Le SAS intervient lorsqu'un évènement inhabituel ou complexe se produit pendant une activité routinière. Il confronte des informations issues de la MLT aux stimuli environnementaux, pour planifier une nouvelle solution, élaborer des stratégies, et inhiber les réponses non pertinentes (*Norman & Shallice, 1986*).

1.3.2. Fonctions exécutives (FE)

L'AC de la MT est également en lien étroit avec les fonctions exécutives (*Norman & Shallice, 1986 ; Miyake et al., 2000 ; Mazeau & Glasel, 2017*). Les FE sont des processus de haut niveau qui régulent les comportements, contrôlent les activités cognitives et coordonnent les actions dans un but donné (*Stuss & Alexander, 2000*). Elles s'activent pour permettre l'adaptation de l'individu lors de tâches nouvelles et complexes, quand les routines d'actions ou habiletés cognitives automatisées sont insuffisantes (*Miyake et al., 2000*). Elles permettent un ajustement flexible et rapide du comportement (*Zelazo et al., 2003*). Les FE froides ou cognitives permettent la planification, l'attention soutenue et sélective, la résolution de problèmes, l'élaboration de stratégies, la flexibilité cognitive, l'inhibition, la réalisation de doubles-tâches, et la MT (*Chan et al., 2008*).

Les composantes principales du centre exécutif sont la flexibilité mentale, l'inhibition et la mise à jour (*Miyake et al., 2000 ; Fayol, 2017 ; Roy & Lodenos, 2017*).

La flexibilité mentale (ou shifting) représente la capacité de passer d'un processus cognitif à une autre. Elle implique également d'envisager différentes stratégies face à une situation problème, et de s'adapter à un changement impromptu.

L'inhibition est l'aptitude à supprimer de la pensée les éléments non pertinents pour exécuter une tâche, comme par exemple les réponses automatiques inadaptées à une

situation. L'inhibition se décomposerait en sous-composantes autonomes : inhibition des réponses réflexes, résistance à l'interférence, inhibition des distracteurs (*Friedman & Miyake, 2004*).

Enfin, la *mise à jour* permet d'actualiser les informations contenues en MT, de remplacer celles non pertinentes par celles adaptées à la situation. Il s'agit d'une fonction essentielle puisque la MT a des capacités de stockage limitées.

Ces FE sont à la fois liées et séparables, donc interdépendantes et ainsi évaluables séparément (*Miyake et al., 2000 ; Miyake & Friedman, 2012*).

Ainsi, les FE s'organisent autour de trois opérations mentales élémentaires : actualisation des représentations mentales (*mise à jour*), renversement des règles préétablies (*flexibilité*) et inhibition (*Miyake et al., 2000*).

Les FE sont donc des processus nécessaires à réalisation de tâches cognitives complexes, en lien avec la MT (*Mazeau & Glasel, 2017*).

1.3.3. Processus exécutifs et mémoire de travail

Les FE et les fonctions attentionnelles dépendent des régions préfrontales (*Stuss, 2011 ; Collette & Van der Linden, 2002*). Or, les réseaux cérébraux préfrontaux sont également consacrés à l'AC de la MT (*Wager & Smith, 2003 ; Miyake et al., 2000*). La région latérale du cortex préfrontal serait la structure corticale spécifique à l'AC (*Koechlin & Summerfield, 2007*). Puisque la MT sous-tend un maintien actif et un contrôle exécutif (*Miyake & Shah, 1999*), elle ne peut fonctionner qu'en partenariat avec l'attention et les FE (*Mazeau & Glasel, 2017*). Ces processus exécutifs, mnésiques et attentionnels sont si imbriqués qu'il est souvent difficile de les dissocier (*Mazeau & Pouhet, 2014*).

Le fonctionnement de la MT s'appuie d'une part sur les fonctions attentionnelles pour saisir les informations, et d'autre part sur les FE afin de gérer les données en MT (*Miyake et al., 2000*). Par conséquent, l'AC est directement compris dans les FE, il est la composante exécutive de la MT. L'AC permet notamment la mise à jour des informations en MT, la répartition des ressources attentionnelles, et l'inhibition pour résister aux interférences (*Mazeau & Pouhet, 2014*).

Ainsi, en plus de sa fonction de stockage, la MT permet un traitement actif des données grâce aux processus exécutifs et attentionnels. Par ailleurs, le rôle du contrôle exécutif dans la MT est également démontré par des modèles alternatifs de la MT.

2. Evolution du concept de mémoire de travail

2.1. Apports et limites du modèle de Baddeley

Baddeley présente la MT comme composée de modules interdépendants. Il s'agit du modèle pionnier, le plus employé, et socle des recherches ultérieures (*Séron, 2007*). Cependant, la MT est un concept évolutif, très variable selon les chercheurs (*Miyake & Shah, 1999*). Le modèle de Baddeley n'a donc cessé d'être enrichi (*Séron, 2007*).

Selon plusieurs auteurs, la MT serait moins cloisonnée que le prétend le modèle initial de Baddeley (*Majerus, 2010*). Il s'agirait plutôt d'un ensemble de systèmes de stockage, temporaires et spécialisés, sous-tendu par le cortex préfrontal (*Postle, 2006*).

De plus, le modèle initial de Baddeley ne tiendrait pas assez compte des fortes relations entre MCT auditivo-verbale (BP) et connaissances langagières en MLT (*Majerus & Linden, 2003*). Or, au fil de ses études, Baddeley lui-même a introduit les liens entre BP et langage et entre BE et MLT épisodique (*Baddeley, 2003a*). Par ailleurs, le modèle initial de la MT ne s'attarderait pas suffisamment sur la rétention de l'ordre sériel (*Gigleux & Renard, 2015 ; Attout et al., 2012*). Enfin, pour Baddeley, le stockage temporaire d'informations est permis par la BP, une sous-partie de la MT permettant le stockage à court terme. A contrario, des études contemporaines dissocient la MCT verbale de la MT verbale (*Cowan, 2008 ; Majerus, 2010*).

2.2. Mémoire de travail et mémoire à court terme

Pour Baddeley, la rétention/restitution simple (tâche d'empan endroit) implique une composante de la MT : la boucle phonologique. Alors que pour d'autres chercheurs, cette tâche mettrait plutôt en jeu la MCT, système mnésique dissocié de la MT (*Cowan, 2008 ; Majerus, 2010*). Pour Cowan (2008), la MCT est un processus qui sous-tend le stockage passif de données verbales ou visuo-spatiales pendant environ une minute. En revanche, la MT permet, en plus de maintenir des données, d'effectuer un traitement cognitif sur ces informations afin d'atteindre un but (*Stuss & Alexander, 2000*). Pour

Swanson, Jerman et Zheng (2008), la MT se différencie de la MCT verbale par les processus exécutifs qui la contrôlent pour permettre les doubles tâches.

A l'appui de cette hypothèse de distinction MCT/MT, l'imagerie fonctionnelle montre des activations cérébrales différentes selon les tâches mnésiques. La région dorso-latérale du cortex préfrontal s'active uniquement lorsque le maintien nécessite l'élaboration de stratégies exécutives, et non lorsqu'il s'agit d'un maintien passif (Lévy & Volle, 2007). Le stockage passif active les aires dites de Broca et de Wernicke de l'hémisphère gauche (Wager & Smith, 2003). Ainsi, les régions activées lors du simple maintien d'informations (MCT) et celles activées lors du maintien et de la manipulation de données sont différentes mais proches. MCT et MT seraient donc des mémoires « partiellement indépendantes » (Mazeau & Pouhet, 2014). Les épreuves permettant d'évaluer la MCT et la MT sont alors différentes. L'épreuve standard pour tester la MCT verbale est la tâche d'empan endroit ou d'empan simple (Barrouillet & Camos, 2007). Alors que la MT verbale s'évalue par des tâches d'empan complexes qui impliquent un travail cognitif pendant le maintien des items, afin d'engager les processus attentionnels et exécutifs de l'AC (Barrouillet & Camos, 2007 ; Kane et al., 2007).

Ainsi, la MCT verbale représente le stockage passif d'informations verbales, alors que la MT verbale permet un traitement cognitif en parallèle, sollicitant le contrôle exécutif et attentionnel.

Si pour Baddeley, les tâches de MCT verbale n'impliquent pas de processus exécutifs, d'autres études supposent que ces tâches activent des capacités attentionnelles (Majerus et al., 2009 ; Majerus, 2010).

2.3. Modèle A-O-STM de Steve Majerus

Steve Majerus avance une théorie alternative à celle de Baddeley et Hitch. D'après lui, les tâches d'empan endroit sollicitent à la fois le système langagier, l'attention sélective, et le traitement de l'ordre sériel (Majerus, 2008b ; Majerus et al., 2009 ; Majerus, 2010).

Concernant la relation entre MCT verbale et **système langagier**, les performances aux tâches d'empan de mots dépendraient des connaissances phonologiques, sémantiques et lexicales (Majerus & Linden, 2003) ; comme le justifie l'effet de lexicalité : empan de mots meilleur que l'empan de non-mots (Baddeley, 1992). De plus, les régions

temporales, impliquées dans le traitement langagier, s'activent pendant les tâches de MCT verbale. Cette mémoire correspondrait alors à l'activation temporaire du système langagier (*Majerus, 2008a*).

Lors des tâches d'empan endroit, les **capacités attentionnelles**, notamment l'attention sélective, seraient également sollicitées (*Majerus et al., 2009*). En effet, les tâches de MCT verbale activeraient le cortex dorso-latéral préfrontal, intimement lié aux fonctions exécutives et attentionnelles (*Chen & Desmond, 2005 ; Majerus et al., 2008a*).

Majerus détaille également l'implication de l'**ordre sériel** dans les tâches de MCT verbale (*Majerus, 2008b ; Majerus et al., 2009 ; Majerus, 2010*), aspect non approfondi par Baddeley (*Gigleux & Renard, 2015*). Lors d'une tâche d'empan simple, il faut maintenir et restituer deux types d'informations : l'information « items » et l'information « ordre sériel » ; c'est-à-dire les éléments ainsi que leur ordre de présentation. Les connaissances langagières vont influencer le rappel de l'information « items » (*Nairne & Kelley, 2004*) mais pas le rappel de l'information « ordre sériel » (*Majerus et al., 2008b*). Or, ce traitement de l'ordre sériel a été peu étudié.

En conclusion, le maintien d'informations en MCT verbale serait sous-tendu par l'activation simultanée du système langagier, des processus attentionnels, et du traitement de l'ordre sériel (*Majerus, 2013*) plutôt que par un espace de stockage spécifique et dédié comme le supposait Baddeley (*Majerus, 2010*). Majerus a donc proposé un modèle de la MCT verbale à trois composantes, le modèle A-O-STM (*Majerus, 2012*). D'après ce modèle, les résultats d'une tâche d'empan simple reflètent l'interaction de différents processus cognitifs : système langagier, processus exécutifs et attentionnels, et traitement de l'ordre sériel (*Majerus, 2008b ; Majerus et al., 2009 ; Majerus, 2010*).

Ainsi, le modèle de la MT de Baddeley est sans cesse enrichi. Que ce soit dans le modèle de Baddeley ou dans celui de Majerus, les processus exécutifs et attentionnels tiennent un rôle majeur dans le fonctionnement de la MCT et de la MT. Ils sont donc à tester lorsque l'on évalue ces mémoires (*Mazeau & Glasel, 2017*).

De plus, il est difficile de résumer l'état actuel des théories sur la MT, tant elles sont variées, ce qui montre qu'il s'agit d'un processus au centre du fonctionnement cognitif et de la cognition complexe (*Séron, 2007*).

3. Rôle de la mémoire de travail dans les acquisitions scolaires et langagières

La MT est impliquée dans l'acquisition du langage, du lexique, et de la lecture (*Baddeley et Hitch, 1974 ; Baddeley, 1992.*). De plus, des déficits exécutifs ou attentionnels en lien avec l'AC peuvent entraver les processus d'apprentissages scolaires (lecture ou mathématiques) et l'acquisition du langage oral (*Boutard, 2015*).

3.1. Limitations de la mémoire de travail

Le terme de « déficit de la MT » sous-tend des dysfonctionnements différents selon les auteurs. Certains parlent de MT déficitaire lorsque les fonctions de stockage et les processus exécutifs dysfonctionnent (*Pickering & Gathercole, 2004*). D'autres auteurs décrivent le déficit de la MT lorsque seules les fonctions de stockage sont altérées. C'est par exemple le cas de *Mazeau & Pouhet (2014)* qui défendent le diagnostic de « dysmnésie développementale ». Ce terme concerne le fonctionnement atypique d'un système mnésique, par rapport au niveau attendu en fonction de l'âge, des niveaux scolaire et intellectuel. Pour ces auteurs, la dysmnésie développementale est donc un « dys-diagnostic », un trouble cognitif spécifique (*Mazeau & Pouhet, 2014*). Le déficit isolé de la MT existe, or ce diagnostic est méconnu. En effet, les enfants avec « dysmnésie de travail » sont souvent diagnostiqués à tort de « multidys ». En réalité, le diagnostic premier devrait être le déficit de la MT, qui engendre plusieurs signes d'appel : vocabulaire pauvre, difficultés de compréhension de textes ou de consignes orales, difficultés en métaphonologie (dyslexie-symptôme), troubles du calcul (dyscalculie-symptôme). En résulte un échec scolaire global qui complique la pose du diagnostic adéquat (*Mazeau & Pouhet, 2014*).

Pour *Mazeau & Pouhet*, le déficit de la MT se diagnostique lors de l'atteinte des systèmes de stockage (MCT), avec intégrité du contrôle exécutif et attentionnel. Cependant, cette vision va dans le sens contraire des travaux de *Majerus* qui soulignent l'implication de capacités attentionnelles lors des tâches de MCT (*Majerus et al., 2009*). Le déficit de la MT des enfants avec troubles des apprentissages correspondrait plutôt à une altération exécutive (*Cowan, 2008 ; Swanson et al., 2008*).

3.2. Mémoire de travail et performances scolaires

Les capacités de MT sont fortement corrélées aux performances scolaires (*Gathercole et al., 2003*). Ces corrélations entre réussite scolaire et performances en MT semblent surtout liées aux déficits du contrôle exécutif (*Alloway et al., 2005*). En effet, les scores aux tâches d'empan complexes sont très prédictifs des résultats en lecture et en mathématiques (*Gathercole et al., 2004b*). Les empan complexes sont également de meilleurs prédicteurs de réussite scolaire que les empan simples (*Gathercole et al., 2003 ; Barrouillet et coll., 2007*).

Les capacités de MT représenteraient le facteur prédictif le plus important de la réussite scolaire, et un facteur de risque de TA futurs (*Maehler & Schuchardt, 2016 ; Gathercole et al., 2003*). Les performances en MT seraient même plus prédictives des résultats scolaires que le QI (*Alloway & Alloway, 2010*). Pour *Swanson & Siegel (2001)*, la perturbation de la MT serait un facteur causal de troubles des apprentissages (TA). Or, ce lien de cause à effet ne peut être affirmé avec certitude (*Fayol, 2017*).

3.3. Mémoire de travail et troubles des apprentissages

Certains chercheurs ont montré des liens entre MT et TA (*Schuchardt et al., 2008 ; Gathercole & Alloway, 2006*). En effet, plusieurs études relèvent une MT déficitaire chez des enfants avec TA (*Phye & Pickering, 2006 ; Cornoldi et al., 2014*). Ces enfants montreraient des dysfonctionnements attentionnels, et une limitation de la BP surtout présente chez les dyslexiques (*Swanson & Siegel, 2001 ; Gathercole et al., 2006 ; Schuchardt et al., 2008*).

Ainsi, la MT tient un rôle majeur dans l'acquisition des habiletés mathématiques et des capacités langagières (*Mazeau & Glasel, 2017*). De ce fait, les limitations de la MT ont de lourdes répercussions sur la scolarité (*Mazeau & Pouhet, 2014*). Il n'est donc pas étonnant que plusieurs études retrouvent une MT déficitaire chez les enfants dyscalculiques (*Geary et al., 2004 ; Geary et al., 2007 ; Geary et al., 2012b*).

II. Mémoire de travail et cognition mathématique

Les performances en MT, en particulier pour l'AC, apparaissent comme précurseurs des premiers apprentissages mathématiques (*Passolunghi et al., 2007*). De plus les capacités de MT à 5 ans sont prédictives des habiletés numériques six ans plus tard (*Alloway & Alloway, 2010*). Vers 7-8 ans, les performances en calcul et en MT sont fortement corrélées (*Gathercole et al., 2004a*).

Selon Von Aster et Shalev (*2007*), le développement de la MT sous-tend l'évolution des performances numériques. Ainsi, plus les capacités de MT sont faibles, plus forte est la probabilité d'échouer en mathématiques (*Holmes et al., 2009*). Par ailleurs, certains enfants avec troubles de la cognition mathématique (CM) disposent de capacités réduites en MT, voire en MCT (*Geary et al., 2012b*).

1. Les troubles de la cognition mathématique

Il existe un trouble neuro-développemental affectant les habiletés mathématiques (*Lafay, 2016*). Cependant, les troubles mathématiques sont moins étudiés et reconnus dans la société que les dyslexies (*Butterworth, 2005 ; Barrouillet & Camos, 2006*). Pourtant, avec une prévalence variant entre 3,6 et 7,7% en fonction des études, les troubles des habiletés numériques seraient aussi répandus que les dyslexies (*Butterworth, 2005 ; Barrouillet et coll., 2007*). Il est donc capital de s'intéresser à cette affection neuro-développementale aux lourdes répercussions. Les troubles étant persistants (*Shalev, Manor & Gross-Tsur, 2005*), ils interfèrent dans la scolarité, dans les activités de la vie quotidienne, et dans la vie sociale et professionnelle des adultes (*Parsons & Bynner, 2005 ; Lafay, 2016*).

1.1. Terminologie et définitions

Terminologie des troubles mathématiques

Plusieurs termes permettent de nommer un trouble spécifique des apprentissages numériques. En 1974, Kosc introduit le terme de « *dyscalculie développementale* », appellation reprise par Gross-Tsur, Manor et Shalev (*1996*), par Butterworth (*2005*), ou encore par Anne Lafay (*2016*). Récemment, l'émergence du terme de « troubles de la

cognition mathématique » a fait suite à l'appellation piagétienne de « troubles du raisonnement logico-mathématique ».

Selon Jean Piaget, l'enfant doit savoir coordonner les structures logiques (classification, sériation, inclusion, conservation) pour accéder au concept de nombre et à son abstraction (*Piaget & Inhelder, 1959 ; Fayol, 2012*). Un trouble du raisonnement logico-mathématique est donc un défaut de mise en place des structures logiques (*Ménissier, 2014*). Nous ne pouvons nier le rôle majeur des opérations logiques dans le développement numérique (*Ménissier, 2014*), mais d'autres processus cognitifs sous-jacents sont également nécessaires pour l'acquisition des capacités numériques (*Fayol, 2012 ; Mazeau, 2017*).

L'émergence du terme de « troubles de la cognition mathématique » fait donc suite à la remise en question des dysfonctionnements logiques comme uniques causes de troubles numériques (*Barrouillet & Camos, 2006*). L'approche cognitiviste vient enrichir l'approche constructiviste qui reste essentielle. Le terme de « cognition mathématique » s'intéresse à un domaine plus large. Il englobe tous les processus nécessaires à la construction numérique, donc aussi bien les structures logico-mathématiques que les multiples fonctions cognitives impliquées dans l'arithmétique (*Ménissier, 2014*). Ainsi, les troubles de la CM peuvent être dus à un déficit des structures logiques, et/ou au dysfonctionnement de certains processus cognitifs (*Ménissier, 2014 ; Mazeau & Pouhet, 2014*).

Définitions et symptomatologie des troubles de la cognition mathématique

D'après le DSM-5, référence internationale, la dyscalculie (DC) fait partie des troubles spécifiques des apprentissages (*American Psychiatric Association, 2013*). Elle a une origine neuro-développementale, c'est-à-dire qu'elle apparaît pendant les apprentissages scolaires, et se caractérise par des déficits persistants malgré la mise en place de mesures ciblées. Dans une approche neuropsychologique, la DC serait un « dys-symptôme », au même titre que la dyslexie, car elle résulterait de troubles cognitifs spécifiques sous-jacents (mémoire, attention...). La DC représente alors les conséquences scolaires des anomalies structurelles, en lien avec les exigences environnementales (*Mazeau & Pouhet, 2014*).

Parmi les critères diagnostiques, le DSM-5 cite la présence de difficultés pour maîtriser le sens des nombres, les données chiffrées ou le calcul ; et/ou des difficultés de raisonnement mathématique. Le DSM-5 précise également que les compétences scolaires

sont nettement inférieures au niveau attendu compte tenu de l'âge chronologique du sujet. De plus, les difficultés d'apprentissage ne sont pas dues à un handicap intellectuel, un déficit sensoriel, neurologique ou mental, une perturbation psychosociale, un enseignement pédagogique inadapté (*American Psychiatric Association, 2013*).

La DC développementale étant un trouble très hétérogène, il existe de multiples caractéristiques comportementales (*Noël et coll., 2013*). On peut retrouver des difficultés pour stocker et récupérer en mémoire à long terme les faits arithmétiques¹ (*Barrouillet & Camos, 2006 ; Geary et al., 2012a*) et des erreurs atypiques lors de la récupération des FA (*Mazzocco et al., 2008*). Les enfants dyscalculiques peuvent également présenter des difficultés dans la résolution des problèmes mathématiques (*Noël et coll., 2013 ; Butterworth, 2005*) ; des erreurs et une lenteur lors du comptage et des calculs (*Geary et al., 2004*). On note aussi une utilisation de stratégies immatures comme le comptage digital (*Landerl, Bevan et Butterworth, 2004 ; Geary et al., 2012b*). De plus, la DC peut s'exprimer par des difficultés pour comprendre les concepts numériques basiques, ce qui perturberait les tâches de comparaison de quantités (*Geary, 2003*).

1.2. Modèles cognitifs du traitement numérique

Deux modèles permettent d'analyser le traitement cognitif des nombres (*Lafay, 2016*).

Modèle du Triple Code (*Dehaene, 1992*)

La manipulation mentale des nombres sollicite trois codes : le code analogique (représentation non symbolique), le code verbal et le code indo-arabe (représentations symboliques). Le *code analogique* permet la représentation quasi-innée des quantités (sens du nombre). Le *code verbal*, composé des mots-nombres, est impliqué dans le stockage et la récupération des faits arithmétiques. Le *code indo-arabe*, visuo-spatial, est composé des chiffres indo-arabes. Le code analogique permet l'estimation et les comparaisons (système numérique approximatif), alors que les codes verbal et indo-arabe permettent la quantification exacte (système numérique précis). Ces trois codes sont à la

¹ Les faits arithmétiques (FA) représentent les résultats d'opérations fréquentes et simples, comme les doubles, les tables de multiplication ou d'addition, les compléments à 10 (*Mazeau & Glasel, 2017*).

fois indépendants et interconnectés. En effet, la coordination entre le code analogique et les codes symboliques permet de donner du sens aux symboles numériques et à la quantité qu'ils représentent. Cette sémantique du nombre s'appelle aussi la magnitude.

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

En s'appuyant sur le modèle du Triple Code, Von Aster et Shalev décrivent quatre étapes successives lors de l'acquisition du nombre. D'abord, l'enfant développe la **magnitude**, c'est-à-dire la représentation non symbolique de la quantité. Puis, il acquiert les **représentations symboliques linguistiques** (mots-nombres). L'enfant peut alors associer des quantités et leurs étiquettes verbales. Ensuite, il développe les **chiffres indo-arabes** qu'il peut associer aux quantités perçues et aux mots-nombres. Enfin, il met en place la **ligne numérique mentale**. L'enfant relie les magnitudes et les propriétés symboliques des nombres. Cette acquisition se fait en lien avec l'amélioration progressive de la mémoire de travail et des capacités langagières (Von Aster & Shalev, 2007).

1.3. Etiologies des troubles de la cognition mathématique

Même si les facteurs causaux des troubles de la CM sont encore débattus (Barrouillet & Camos, 2006), deux hypothèses étiologiques sont prégnantes : trouble cognitif général ou trouble cognitif spécifiquement numérique (Lafay, 2016).

Trouble cognitif spécifiquement numérique

La DC peut être un trouble primaire dû à un déficit numérique de base. Certains auteurs parlent alors de **dyscalculie-diagnostic** (Mazeau & Pouhet, 2014). Il existe des circuits neuronaux spécialisés dans les traitements numériques, comme le sillon intrapariétal (Dehaene et al., 2003). Or, des images d'IRMf chez des enfants dyscalculiques montrent une absence de spécialisation du sillon intrapariétal (Michels et al., 2017). Un dysfonctionnement neuro-anatomique sélectif pourrait donc être à l'origine des dyscalculies (Butterworth, 2005 ; Noël et coll., 2013).

VonAster et Shalev (2007) parlent de dyscalculie « pure », déficit de la magnitude qui perturberait précocement les aptitudes numériques, comme la comparaison de quantités. L'atteinte du « sens du nombre » serait à la base de la DC « pure » (Piazza et coll., 2010). Cette altération serait limitée au sens du nombre précis des petites quantités (Rousselle & Noël, 2007 ; Lafay, 2016).

Facteurs cognitifs généraux impliqués dans le traitement numérique

D'autres chercheurs supposent plutôt qu'un déficit cognitif général serait à l'origine des dyscalculies (*Barrouillet & Camos, 2006 ; Geary, 2010 ; Noël et coll., 2013*). En effet, le sens du nombre s'affine avec le développement de plusieurs fonctions cognitives (*Jordan & Baker, 2011*). Donc les troubles de la CM peuvent être dus à une atypie développementale affectant une ou plusieurs fonctions cognitives spécifiques, comme le langage, les habiletés visuospatiales, la MT, ou les fonctions exécutives et attentionnelles (*Barrouillet & Camos, 2006 ; Noël et coll., 2013*).

Il s'agirait de **dyscalculies-symptômes** (*Mazeau & Pouhet, 2014*), ou dyscalculies avec comorbidité (*Von Aster & Shalev, 2007*). La magnitude serait préservée. Mais ces DC seraient secondaires à des déficits cognitifs généraux. Ces dysfonctionnements perturberaient l'élaboration de la ligne numérique mentale, et causeraient des troubles associés comme la dyslexie (*Von Aster & Shalev, 2007*).

Pour reprendre ces deux hypothèses causales, la DC développementale est conséquente à une atteinte du sens du nombre. La DC « pure » est liée à un déficit de la magnitude (aspect inné du sens du nombre). La DC avec comorbidité est liée à une altération de la mise en place de la ligne numérique mentale, conséquente à des déficits sous-jacents (aspect acquis du sens du nombre). Les auteurs précisent tout de même que les dyscalculies « pures » représentent seulement 1/3 des dyscalculies (*Von Aster & Shalev, 2007*).

Ainsi, la MT joue un rôle incontestable dans la cognition mathématique. Les capacités de MT et les performances numériques évoluent de façon proportionnelle et synchrone (*Von Aster et Shalev, 2007*). De plus, les capacités de MT seraient prédictives des performances numériques futures (*Passolunghi et al., 2008*). Les tâches numériques et arithmétiques peuvent donc être affectées par les limitations de la MT (*Coleman, 2005*). Des études ont d'ailleurs montré des capacités réduites en MT, voir en MCT, chez des enfants dyscalculiques (*Geary et al., 2004 ; Geary et al., 2007 ; Geary et al., 2012b*).

2. Implication de la mémoire de travail dans la cognition mathématique

2.1. Limitations de la mémoire de travail et répercussions mathématiques

Puisque la MT auditivo-verbale et les FE sont impliquées dans le calcul mental et la résolution de problèmes mathématiques (*Geary et al., 2007 ; Coleman, 2005*), des limitations de la MT impactent ces tâches arithmétiques (*Barrouillet & Camos, 2017*).

Un déficit de la MT provoque d'une part des difficultés à mémoriser les FA (*Thévenot et coll., 2001*) ; et d'autre part une récupération rare et lente des FA (*Barrouillet & Lépine, 2005*). Un dysfonctionnement de la MT a donc pour conséquence des erreurs de comptage et l'utilisation de stratégies immatures, comme le comptage digital (*Geary et al., 2004*).

Des limitations de la MT impacteraient lourdement les tâches arithmétiques (*Barrouillet & Camos, 2017*). Certains auteurs ont alors cherché à savoir si les troubles de la CM étaient liés à une atteinte spécifique ou globale de la MT (*Wilson & Swanson, 2001 ; Geary et al., 2007*).

2.2. Composantes de la mémoire de travail altérées dans les troubles de la cognition mathématique

Certains chercheurs postulent l'existence d'un double déficit du CVS et de l'AC chez les enfants dyscalculiques (*Passolunghi & Mammarella, 2010*). D'autres études constatent plutôt un double déficit de la BP et de l'AC (*Wilson & Swanson, 2001 ; Geary et al., 2007*). Pour D'Amico & Guarnera (*2005*), les enfants dyscalculiques présenteraient une atteinte spécifique de la MCT verbale.

Pour d'autres auteurs, une BP déficitaire serait un prédicteur de dyslexie (DL), alors qu'un CVS déficitaire serait un prédicteur de DC (*Schuchardt et al., 2008*). Cependant, un déficit à la fois en MCT verbale et en MT serait caractéristique des enfants avec DL et DC associées (*Gathercole et al., 2006 ; Gathercole & Alloway, 2006*).

Ces résultats sont contradictoires car les études sont peu comparables en termes d'outils d'évaluation et de critères de sélection des sujets (*Schuchardt et al., 2008*).

Si d'après certaines études les limitations de la MT sont à l'origine des troubles de la CM (*Geary, 2003 ; Swanson et al., 2008*), cette hypothèse ne fait pas consensus. En effet, les limitations en MT et en MCT représentent des facteurs contribuant aux troubles,

toutefois il ne s'agirait pas des causes uniques (Geary, 2010). Le sens des corrélations reste encore à préciser : est-ce la faiblesse en MT qui cause des difficultés mathématiques ou l'inverse ? (Fayol, 2017)

En résumé, dans les troubles de la CM, on peut retrouver des limitations de la MCT verbale, de la MCT visuo-spatiale, et de la MT globale (processus exécutifs et composante de stockage) (Geary et al., 2007). Toutefois, la MCT verbale jouerait un rôle plus important que la MCT visuo-spatiale dans les tâches arithmétiques (Wilson & Swanson, 2001). De plus, le contrôle exécutif prédit les performances mathématiques, de façon plus importante que la MCT verbale (Wilson & Swanson, 2001 ; Noël, 2009).

Implication du contrôle exécutif dans la cognition mathématique

Les performances des enfants dyscalculiques seraient déficitaires dans les tâches d'empan complexes, mais pas dans celles d'empan de chiffres endroit (Swanson et al., 2008). Ces enfants présenteraient un dysfonctionnement de la MT, donc du contrôle exécutif, plutôt que de la MCT. Les auteurs expliquent cela par le fonctionnement atypique d'une ou plusieurs FE (Swanson et al., 2008 ; Swanson & Sachse-Lee, 2001). Les perturbations des FE impacteraient la CM (Roy & Lodenos, 2017).

En effet, les capacités des FE sont prédictives des habiletés mathématiques (Bull et al., 2008), et des troubles dyscalculiques (Toll et al., 2011). L'altération des FE perturberait donc les tâches mathématiques complexes, comme la résolution de problèmes arithmétiques ou la récupération des faits arithmétiques en MLT (Swanson & Sachse-Lee, 2001 ; Geary, 2003 ; Swanson et al., 2008). De plus, les régions préfrontales, impliquées dans le contrôle exécutif de la MT, seraient sous-activées chez des enfants dyscalculiques (Kucian et al., 2006). Il reste difficile de savoir si ces dysfonctionnements sont les causes ou les conséquences des troubles arithmétiques (Brun et coll., 2011).

Inhibition, flexibilité mentale et mise à jour

Certaines études se sont intéressées aux FE sollicitées dans la CM (Roy & Lodenos, 2017). Elles soulignent l'implication de l'inhibition, de la flexibilité mentale et de la mise à jour (Mazzocco & Kover, 2007 ; Van der Sluis et al., 2007). Ces recherches relèvent surtout une défaillance de l'AC et des processus inhibiteurs chez les enfants avec troubles de la CM (Passolunghi & Siegel, 2001 ; Passolunghi, 2012). Des mécanismes d'inhibition inefficaces seraient à l'origine de difficultés de résolution de problèmes, de gestion des étapes d'un calcul (Mazeau & Pouhet, 2014). De plus, l'efficacité de la

récupération des FA dépendrait de la capacité à inhiber les associations non pertinentes (Geary, 2003 ; Geary, 2010).

Les processus exécutifs et attentionnels jouent donc un rôle non négligeable dans les troubles de la CM (Bull et al., 2008 ; Mazzocco & Kover, 2007 ; Geary et al., 2012b). La perturbation des mécanismes inhibiteurs et de la flexibilité rejoint l'hypothèse de déficits en MT plutôt qu'en MCT verbale (Swanson et al., 2008). Or, les études sur l'implication des FE dans les troubles de la CM sont peu nombreuses et sur des populations limitées. Le dysfonctionnement exécutif dans les troubles de la CM ne fait actuellement pas consensus. Selon certains auteurs, les enfants DC n'auraient pas un empan complexe réduit (Butterworth, 2005).

Enfin, la MT et les processus exécutifs sont également impliqués dans d'autres apprentissages, c'est pourquoi il est fréquent de retrouver différents troubles associés à un trouble de la CM (Mazeau & Pouhet, 2014).

3. Troubles associés et comorbidités

Un seul trouble cognitif spécifique peut provoquer de multiples dys-symptômes. Ces dys- sont alors *associés*, dus à une cause unique (Mazeau & Pouhet, 2014). Par exemple, un enfant peut présenter une atteinte primaire de la MT (dys-diagnostic) qui engendrerait une DL et une DC associées (dys-symptômes). Cette association DL/DC est d'ailleurs très fréquente (Butterworth, 2005). Selon VonAster et Shalev (2007), 4,2% d'enfants dyscalculiques présenteraient une DL associée. De plus, environ 2/3 des enfants dyscalculiques seraient atteints de DC avec comorbidité, contre 1/3 de dyscalculie « pure » (VonAster & Shalev, 2007).

En cas de MT déficitaire, l'enfant peut être en échec scolaire global, avec difficultés en lecture et en calculs (Mazeau & Pouhet, 2014 ; Gathercole et al., 2006). Une limitation de la MT se retrouve aussi chez les enfants dyslexiques (Pickering & Gathercole, 2004 ; Schuchardt et al., 2008).

Un syndrome dysexécutif et un trouble du sens du nombre peuvent également être co-occurents. On parlera alors de *comorbidité*, car deux dys-diagnostic indépendants coexistent (Mazeau & Pouhet, 2014).

Ainsi, chez les enfants avec troubles de la CM, on peut retrouver un empan complexe réduit, donc une limitation de la part exécutive de la MT (*Swanson et al., 2008*). Différents déficits de la MT peuvent accompagner les troubles de la CM, mais il n'existe pas de certitude quant à leur implication causale (*Butterworth, 2005 ; Fayol, 2017*).

Un enfant avec limitation de la MT peut présenter des perturbations en lecture, en calculs, mais également en compréhension orale (*Mazeau & Pouhet, 2014 ; Gathercole et al., 2006*). En effet, une atteinte conjointe de la BP et de l'AC se retrouverait chez les enfants avec trouble du langage oral (*Pickering & Gathercole, 2004*).

III. Mémoire de travail et langage

1. Développement de la morphosyntaxe

Selon Chomsky et son approche structurale nativiste du langage, l'enfant aurait une connaissance innée et universelle de la grammaire de sa langue et de la façon dont les mots doivent s'agencer. Donc l'enfant ne pourrait « apprendre » sa langue (*Chomsky, 1965 ; Kail, 2015*). En revanche, les approches fonctionnalistes défendent l'idée que la morphosyntaxe peut s'apprendre, sur la base de facultés innées.

Le rythme d'acquisition du langage varie fortement en fonction des individus, de l'intégrité de leurs circuits neuronaux, et de leur contexte environnemental et psychoaffectif (*Kail, 2015*). L'acquisition de la morphosyntaxe est longue et progressive. Afin d'acquérir les règles de fonctionnement de sa langue, le jeune enfant commence par repérer les invariants dans les énoncés entendus. De façon implicite, il va isoler les éléments grammaticaux, extraire les lois qui régissent leur ordre, et donner un sens aux éléments syntaxiques (*Kail, 2015*). Plusieurs études sur le développement de la compréhension d'énoncés se sont donc intéressées aux stratégies de traitement (*Moreau & Richelle, 1997 ; Schelstraete et al., 2011*).

1.1. Traitement des phrases passives

Vers deux ans, l'enfant peut comprendre des phrases de structure syntaxique simple « Sujet-Verbe-Objet » (*Jakubowicz, 2007 ; Jakubowicz & Tuller, 2008 ; Kail, 2015*). Mais à ce stade, les phrases passives vont être interprétées comme des actives. En effet, les énoncés passifs ne respectent pas l'ordre canonique Sujet-Verbe-Objet (SVO). Les

jeunes enfants emploieraient alors une stratégie « ordre des mots ». C’est-à-dire que dans la phrase-exemple « La voiture est poussée par le camion », ils attribuent le rôle de sujet à « la voiture » (Kail & Fayol, 2015)

Jusqu’à 4-6 ans, les enfants ont toujours des difficultés à traiter les énoncés renversables (ex : « Le camion bleu est poussé par le camion vert »). Ils choisissent le premier syntagme nominal (« le camion bleu ») comme sujet de l’action (Moreau & Richelle, 1997 ; Schelstraete et al., 2011).

1.2. Traitement des phrases relatives

Les phrases relatives se répartissent en quatre types, détaillés dans le *Tableau 1* ci-dessous (Kail & Fayol, 2015 ; Delage, 2015).

Tableau 1 : Les types de phrases relatives

Lieu de la proposition relative	Structure	Schéma canonique	Exemple
Enchâssée	SS – Proposition relative <i>sujet</i>	S [SVO] VO	Le garçon [qui pousse le chat] caresse le lapin.
Enchâssée	SO – Proposition relative <i>objet</i>	S [OSV] VO	Le garçon [que le chat pousse] caresse le lapin.
Branchée à droite	OO – Proposition relative <i>objet</i>	SVO [OSV]	Le garçon caresse le lapin [que le chat pousse].
Branchée à droite	OS – Proposition relative <i>sujet</i>	SVO [SVO]	Le garçon caresse le lapin [qui pousse le singe].

Les propositions relatives en « qui » sont des relatives sujets car l’ordre des mots correspond au schéma canonique SVO. C’est pourquoi les relatives en « qui » sont maîtrisées vers 4 ans. En revanche, les propositions relatives en « que » sont des relatives objets car elles ne respectent pas le schéma canonique du français. Les relatives en « que » sont donc longtemps difficiles à comprendre (Moreau & Richelle, 1997 ; Schelstraete et al., 2011).

Si on analyse plus en détail le traitement des relatives en « que », les énoncés non renversables sont compris vers 3 ans et demi (ex : « La barrière verte que le cheval renverse » ; « La barrière verte que renverse le cheval »). Cependant, les énoncés

renversables ne sont pas compris par la plupart des enfants de 9 ans et demi (ex : « La voiture bleue que la voiture grise pousse » ; « la voiture bleue que pousse la voiture grise ») (*Segui et Léveillé, 1977 ; Chevrie-Muller & Narbona, 1996*).

Ainsi, l'enfant est capable dans un premier temps de comprendre des phrases simples car il identifie le schéma de base canonique SVO. Puis, il utilise ses compétences grammaticales dans leur globalité pour comprendre des phrases plus complexes moins courantes (*Schelstraete et al., 2011*). Il maîtrise donc tardivement les énoncés de structure syntaxique complexe, comme par exemple les phrases passives ou celles contenant des relatives, qui sont plus coûteuses cognitivement (*Kail, 2015*).

Bien que la syntaxe soit un savoir-faire procédural et non un stockage en mémoire, elle implique la MT (*Mazeau & Pouhet, 2014*). La MT est sollicitée lors de l'identification du schéma canonique SVO (*Kail, 2015*), ou pour comprendre des phrases enchâssées. L'enfant doit alors effectuer une transformation de la structure syntaxique, puis établir un lien entre les constituants de la phrase qui sont éloignés (*Gabriel & Urbain, 2012*). Ces différents niveaux de traitement impliquent la MT.

2. Implication de la mémoire de travail dans la syntaxe

En plus d'être impliquée dans la cognition mathématique, la MT est sollicitée dans le langage (*Baddeley, 1992*). En effet, le développement langagier serait lié au développement d'autres systèmes cognitifs comme les FE, l'attention et les mémoires (*Delage & Tuller, 2007*). Plusieurs études ont mis en exergue le lien entre MT et acquisitions lexicales (*Baddeley, 2003a ; Majerus et al., 2006 ; Gathercole, 2006*). Cependant, la MCT verbale et la MT sont également sollicitées dans les tâches syntaxiques (*Jakubowicz & Tuller, 2008 ; Montgomery & Evans, 2009*).

2.1. Complexité syntaxique et charge cognitive

Les performances en MT prédiraient la complexité syntaxique en production (*Jakubowicz, 2007 ; Jakubowicz, 2011 ; Delage, 2008*). Ces auteurs considèrent la MT au sens large, selon le modèle de Baddeley, avec les composantes de stockage (BP et CVS) et le centre exécutif (AC).

Pour Jakubowicz, certains éléments grammaticaux, auxquels elle attribue un degré de computation syntaxique élevé, impliquent une charge cognitive importante (*Jakubowicz & Tuller, 2008*). Par exemple, le déplacement syntaxique et l'enchâssement représentent des facteurs de complexité syntaxique (*Delage, 2015*).

Concernant le *déplacement syntaxique*, les phrases ne respectant pas la structure canonique du français (SVO) sont caractérisées de complexes. Il s'agit des phrases passives [1], des phrases comprenant un pronom clitique accusatif [2], ou des phrases relatives [3]. Plus on compte de déplacements dans une phrase, plus sa structure canonique est bouleversée donc plus elle est complexe (*Jakubowicz & Tuller, 2008 ; Delage 2008 ; Rigalleau, 2015*).

[1] Le garçon est poursuivi par le cheval.

[2] Julie **le** voit souvent.

[3] La fille qui regarde le garçon. (*Relative sujet ; ordre SVO*)

Le garçon que la fille regarde. (*Relative objet ; ordre OSV*)

Le garçon que regarde la fille. (*Relative objet avec inversion sujet-verbe ; ordre OVS*)

De plus, *l'enchâssement* d'une proposition à l'intérieur d'une autre proposition [4] provoque une accumulation d'opérations syntaxiques, ce qui rend la phrase complexe même si l'ordre canonique est respecté (*Delage, 2008 ; Jakubowicz & Tuller, 2008 ; Delage, 2015*).

[4] Je crois [que Pierre veut un bonbon]. (*Enchâssement simple*)

Vous pensez [que je crois [que Pierre veut un bonbon]]. (*Enchâssement multiple*)

Nous avons vu que ces énoncés complexes sont maîtrisés tardivement au cours du développement. Selon une première hypothèse, la difficulté de compréhension des phrases complexes pourrait être liée à la faible fréquence d'utilisation de ces structures syntaxiques (*Rigalleau, 2015*). Une autre hypothèse serait liée à la charge cognitive importante – ou degré de computation syntaxique élevé – attribuée à certains éléments

grammaticaux, comme les enchâssements, ou les déplacements syntaxiques (*Jakubowicz & Tuller, 2008*). La maîtrise tardive des énoncés complexes serait en lien avec le développement des capacités de MT (*Jakubowicz, 2011 ; Jakubowicz & Tuller, 2008 ; Rigalleau, 2015*). Chez des adultes sans trouble, le coût de traitement de ces phrases complexes est déjà supérieur à celui mis en jeu lors du traitement de phrases canoniques. La compréhension des phrases complexes se réalise dans un temps plus long, et provoque plus d'erreurs.

Lors de l'analyse d'un énoncé complexe, nous réévaluons les traitements au fil de la structure syntaxique. Nous analysons les informations qui nécessitent un maintien en MT ou une mise à jour. Nos ressources en MT permettraient donc de réaliser ces ajustements (*Rigalleau, 2015*). En effet, pour comprendre un discours, il faut maintenir les informations séquentielles. En même temps, les connaissances lexicales, sémantiques et pragmatiques sont récupérées en MLT pour être comparées aux informations perçues et en tirer du sens (*Gaonac'h & Larigauderie, 2000 ; Boutard, 2015*).

Pour Gibson (1998), les phrases relatives O-S-V mettent fortement en jeu la MT. Le traitement de ces énoncés serait rendu difficile par l'éloignement entre le verbe et l'Objet Direct (OD). Le sujet devrait maintenir en mémoire l'OD, jusqu'à ce qu'il entende le verbe et récupère l'OD pour l'y rattacher (*Rigalleau, 2015*).

La compréhension de phrases complexes serait donc corrélée aux capacités de MT (*Gibson, 1998 ; Jakubowicz & Tuller, 2008*). Chez les jeunes enfants, et chez les enfants avec trouble spécifique de développement du langage oral (TSDLO), les ressources en MT étant limitées (*Montgomery & Evans, 2009*), les structures syntaxiques complexes constituent une surcharge en MT. Puis, l'augmentation de la capacité des empan simples et complexes au fil du développement rendrait possible le traitement des phrases complexes (*Rigalleau, 2015*).

2.2. Mémoire de travail et trouble du langage oral

Les capacités de MT prédiraient les compétences syntaxiques (*Jakubowicz & Tuller, 2008*). Certains auteurs ont cherché à déterminer la composante de la MT qui tiendrait ce rôle prédictif, chez les enfants avec TSDLO notamment. Les études suivantes se sont alors intéressées à l'implication des empan simples (MCT verbale) et des empan complexes (MT) dans la compréhension syntaxique.

En cas de TSDLO, on peut retrouver un déficit de la MCT verbale (*Montgomery, 2004 ; Archibald & Gathercole, 2007*) et de la MT (*Gathercole & Alloway, 2006 ; Montgomery & Evans, 2009*). Chez les enfants avec TSDLO, les troubles syntaxiques seraient dus à la maturation incomplète des capacités de MT (*Jakubowicz & Tuller, 2008 ; Jakubowicz, 2011*).

Les capacités de MCT verbale seraient également corrélées à la compréhension de phrases chez les enfants TSDLO (*Montgomery & Evans, 2009*). En cas de déficit de la MCT verbale, la compréhension serait altérée pour les longues phrases ; mais la compréhension des phrases courtes et simples de type SVO serait conservée (*Montgomery et al., 2008*).

Selon d'autres chercheurs, la compréhension de phrases complexes contenant des propositions relatives active l'aire dite de « Broca » (*Planton & Démonet, 2012*). Or, cette région est impliquée dans la MCT verbale (*Wager & Smith, 2003*). La MCT verbale serait donc sollicitée lors de la compréhension de phrases complexes, selon certaines études.

En revanche, pour d'autres auteurs, les empan simples seraient surtout liés aux capacités lexicales, alors que les empan complexes seraient plus corrélés à la compréhension syntaxique (*de Abreu et al., 2011*).

2.3. Contrôle exécutif et compréhension syntaxique

La compréhension d'énoncés complexes dépendrait de la MT (contrôle exécutif et attentionnel) plutôt que de la MCT verbale (*de Abreu et al., 2011*).

En effet, les scores aux tâches d'empan complexes seraient significativement corrélés à la compréhension de phrases syntaxiquement complexes (*de Abreu et al., 2011 ; Montgomery & Evans, 2009*). Par ailleurs, cette corrélation serait plus forte qu'avec les empan simples (*Montgomery et al., 2008 ; de Abreu et al., 2011 ; Delage & Frauenfelder, 2012*).

Les empan complexes prédiraient la compréhension des phrases relatives avec deux enchâssements minimum, et des phrases relatives objets. Or, ces empan complexes ne prédiraient pas les relatives sujets, structures plus simples SVO (*Delage, 2015*).

La MCT verbale et la MT sont donc toutes deux sollicitées lors de la compréhension d'énoncés. La MCT verbale est plutôt impliquée dans la compréhension de phrases simples et courtes. La MT (contrôle exécutif et attentionnel) est quant à elle

prédictive des performances en compréhension d'énoncés complexes (*de Abreu et al., 2011 ; Montgomery et al., 2008 ; Montgomery & Evans, 2009 ; Delage & Frauenfelder, 2012*).

Il existerait également une action réciproque du langage sur la MCT verbale. Alors qu'avant 4 ans les empanns simples sont prédictifs du développement lexical, après 4 ans, le niveau de vocabulaire influencerait à son tour la répétition de pseudo-mots (*Baddeley, 2003b*). Les connaissances langagières influencent donc directement la MCT verbale (*Majerus, 2008a*). Plusieurs études mentionnent la co-construction développementale de la MCT verbale et de la syntaxe (*Rodrigues & Bepi-Lopes, 2009*).

Ainsi, le langage et la MCT verbale peuvent s'influencer mutuellement lors du développement. La MT est l'un des processus cognitifs permettant les acquisitions de la lecture, des mathématiques et du langage. Or, ces apprentissages améliorent en retour les performances en MT. Il existe donc des interactions réciproques entre MT, langage et FE. Cela montre l'importance d'évaluer la MCT, la MT et les FE en complémentarité du bilan orthophonique, afin de comprendre le profil d'un patient (*Boutard, 2015*).

3. Troubles associés : cognition mathématique et langage oral

La MCT verbale et la MT sont impliquées à la fois dans les performances mathématiques, de lecture et de langage oral (*Mazeau & Glasel, 2017*).

En effet, on retrouve des atteintes de la MT chez des enfants avec troubles du langage écrit, de la cognition mathématique, ou TSDLO (*Gathercole et al., 2006 ; Geary et al., 2004 ; Swanson et al., 2008 ; Montgomery & Evans, 2009*).

Pour certains auteurs, la limitation de la MT représente le dysfonctionnement primaire (*Mazeau & Pouhet, 2014*). La dysmnésie peut donc engendrer plusieurs dys-symptômes. En effet, une limitation de la MT peut affecter les habiletés arithmétiques (numération, calcul mental...), la lecture et la compréhension orale, notamment de consignes longues et complexes (*Mazeau & Pouhet, 2014 ; Gathercole et al., 2006*).

Une atteinte conjointe de la MCT verbale et des processus exécutifs se retrouve chez des enfants avec troubles de la cognition mathématique (*Geary et al., 2007*), et également chez des enfants avec TSDLO (*Pickering & Gathercole, 2004*).

Partie II
PARTIE PRATIQUE

I. Problématique et objectifs

1. Problématique

Les performances en mathématiques et en compréhension syntaxique orale sont significativement corrélées à la mémoire de travail (MT), et surtout au contrôle exécutif (*Gathercole et al., 2004b ; Geary et al., 2007 ; Jakubowicz & Tuller, 2008*).

Les enfants avec troubles de la cognition mathématique (CM) obtiendraient un empan complexe réduit. Ils présenteraient un dysfonctionnement de la part exécutive de la MT plutôt qu'un déficit de la mémoire à court terme (MCT) verbale (*Swanson et al., 2008*). La perturbation exécutive pourrait concerner la flexibilité mentale (*Passolunghi & Siegel, 2001*), l'inhibition ou la mise à jour (*Mazzocco & Kover, 2007 ; Van der Sluis et al., 2007*). Or, les études sur l'implication des fonctions exécutives (FE) dans les troubles de la CM sont peu nombreuses et ne font pas consensus (*Butterworth, 2005*). Les processus exécutifs impactés dans les troubles de la CM restent donc à déterminer.

De plus, les capacités de MCT verbale et de MT verbale seraient corrélées à la compréhension syntaxique orale (*Jakubowicz & Tuller, 2008*). Chez les enfants avec Trouble Spécifique de Développement du Langage Oral (TSDLO), les capacités de MCT verbale seraient corrélées à la compréhension de phrases longues (*Montgomery & Evans, 2009*). La compréhension d'énoncés complexes dépendrait plutôt de la MT, donc du contrôle exécutif (*de Abreu et al., 2011*). En effet, les scores aux tâches d'empan complexes seraient significativement corrélés à la compréhension de phrases syntaxiquement complexes (*de Abreu et al., 2011 ; Montgomery & Evans, 2009*). Or ces études concernent les enfants avec TSDLO, et n'ont pas été réalisées chez des enfants avec troubles de la CM.

Ainsi, l'implication de la MT verbale et des fonctions exécutives dans la compréhension syntaxique reste à étudier chez des enfants avec troubles de la CM. La problématique que nous avançons est donc la suivante :

Chez des enfants avec troubles de la cognition mathématique, quelle est la part d'implication de la mémoire de travail dans la compréhension syntaxique orale ?

2. Objectifs

2.1. Objectif primaire

Notre objectif principal est d'analyser la part d'implication des capacités de MT verbale dans la compréhension syntaxique orale, chez des enfants avec troubles de la cognition mathématique (CM).

Hypothèse principale : Nous postulons qu'il existe une corrélation et une relation prédictive entre les capacités de MT verbale et la compréhension syntaxique orale, chez des enfants avec troubles de la CM.

-Les empan complexes (MT verbale) seraient plus corrélés que les empan simples (MCT verbale) aux scores de compréhension syntaxique.

De plus, les empan simples devraient moins prédire les scores de compréhension syntaxique complexe. Nous nous attendons à relever une relation prédictive plus élevée entre empan complexe et compréhension syntaxique complexe.

-Les fonctions exécutives seraient corrélées aux performances de compréhension syntaxique.

2.2. Objectifs secondaires

Objectif secondaire 1 : Examiner les types d'énoncés engendrant des réponses erronées à l'ECOSSE, chez des enfants avec troubles de la CM.

Hypothèse secondaire 1 : Chez nos sujets avec troubles de la CM, nous nous attendons à relever une compréhension erronée des énoncés complexes (phrases passives et relatives).

Objectif secondaire 2 : Identifier les fonctions exécutives altérées chez des enfants avec troubles de la CM.

Hypothèse secondaire 2 : Les enfants avec troubles de la CM devraient obtenir des résultats déficitaires aux tâches de flexibilité, d'inhibition et de mise à jour.

II. Matériel et méthodes

1. Participants

Conformément à la loi Jardé (2016), notre échantillon se compose de 9 enfants, âgés de 8 ans 11 mois à 10 ans 9 mois (*âge moyen = 116,9 mois soit 9,7 ans ; écart-type = 7,88 mois soit 0,66 ans*). Ces participants ont été nommés de A à K afin de conserver l’anonymat. Les renseignements principaux figurent dans le tableau ci-dessous (*Tableau 2*). Pour plus de détails sur les sujets, des tableaux descriptifs apparaissent en *ANNEXE I*.

Tableau 2 : Renseignements principaux concernant les sujets de l'étude

	Sexe	Age au moment des tests	Classe
A	M	9a 5m	CM1
B	F	8a 11m	CM1
C	F	10a 5m	CM2
E	F	10a 3m	CM2
F	F	8a 11m	CE2
G	F	9a 4m	CM1
I	M	10a 9m	CM2
J	F	9a 4m	CM1
K	M	10a 4m	CM2
TOTAUX	M=3 F=6	8-8,9 ans = 2 9-9,9 ans = 3 10-10,9 ans = 4	CE2=1 CM1=4 CM2=4

Concernant les **critères d'inclusion**, tous les participants sont monolingues et de langue maternelle française. De plus, ils sont suivis en orthophonie pour troubles de la cognition mathématique. Selon les critères du DSM-5, référence internationale, ils ont reçu un diagnostic de dyscalculie. Enfin, ils ont tous un âge entre 8 et 11 ans.

Nos **critères de non inclusion** concernent la présence d'un trouble associé parmi les suivants : TDA/H, déficience intellectuelle, haut potentiel intellectuel, trouble spécifique de développement du langage oral. Le redoublement fait également partie des critères de non inclusion.

Enfin, nous avons défini le suivi psychologique comme **critère d'exclusion**. En effet, un trouble psychologique associé pourrait interférer avec les résultats de l'étude.

Le recrutement des participants s'est effectué auprès d'orthophonistes en libéral à l'aide d'un questionnaire en ligne. Ce questionnaire visait à cerner les profils des enfants suivis pour troubles de la CM. Il nous a donc permis de sélectionner les sujets qui correspondaient à nos critères d'inclusion et de non inclusion.

Comme nous nous y attendions, la plupart des sujets de l'étude (7/9) présentent un trouble ou retard d'acquisition du langage écrit associé au trouble de la CM. Or, nous avons choisi de ne pas exclure ces enfants de l'étude, puisque l'association dyslexie/dyscalculie est très fréquente (*Gathercole et al., 2006 ; VonAster & Shaley, 2007*). Ce trouble associé sera donc pris en compte dans l'analyse des résultats, mais n'a pas d'influence sur notre étude.

2. Matériel et procédure

Afin d'évaluer les relations entre capacités de MT et compréhension orale, nous avons administré les épreuves suivantes.

2.1. Epreuves mnésiques et exécutives

Afin d'évaluer la MT, nous nous sommes appuyés sur les modèles de Baddeley et Hitch (*1974*) et de Majerus (*2009*). Nous avons donc choisi des épreuves permettant d'évaluer la MCT verbale ou boucle phonologique (empan simple), la MT verbale (empan complexe) et la part exécutive de la MT (fonctions exécutives).

2.1.1. Evaluation de la mémoire à court terme verbale (empan simple)

a. Empan de chiffres (B.A.L.E)

Cette épreuve est issue de la Batterie Analytique du Langage Ecrit, étalonnée en 2010 sur 536 enfants du CE1 au CM2. Cette tâche permet de mesurer un empan de chiffres droit et un empan de chiffres envers. Ainsi, elle évalue la mémoire phonologique à court terme à travers des listes de 2 à 7 chiffres. Le lecteur est invité à se référer au protocole de la B.A.L.E pour les consignes et modalités de passation de l'épreuve que nous avons respectées (*Jacquier-Roux et coll., 2010*). Même si cette tâche n'est pas la plus pertinente pour évaluer la MCT verbale, nous l'avons choisie car elle est la plus administrée en pratique (*Boutard, 2015*).

b. Répétition de mots dissimilaires (Protocole d'évaluation « Mémoire de travail »)

Nous avons également choisi d'administrer une épreuve de répétition de mots, contenue dans le protocole d'évaluation « Mémoire de travail » (*Boutard & Gatignol, 2015*). Cet outil se base sur les modèles de la MT de Baddeley et Majerus. Les mots proposés sont toujours différents, pour étudier précisément l'information « item », et ils sont tous de fréquences élevées.

L'épreuve de répétition de mots monosyllabiques dissimilaires permet d'évaluer la boucle phonologique (MCT verbale). La tâche se compose de 12 séries de 2 à 7 mots qui sont des substantifs monosyllabiques de structure Consonne-Voyelle (CV), Voyelle-Consonne (VC), Consonne-Voyelle-Consonne (CVC), Consonne-Consonne-Voyelle-Consonne (CCVC), et Consonne-Consonne-Voyelle (CCV). Les mots diffèrent phonologiquement le plus possible. Le sujet écoute et répète les séries de mots, énoncées par l'ordinateur. L'outil informatique calcule la taille de l'empan ainsi que le nombre de persévérations, d'intrusions et les types d'erreurs pour permettre une analyse qualitative.

c. Répétition de pseudo-mots (B.E.L.E.C)

La tâche d'empan de chiffres comporte un nombre fini d'éléments, ce qui diminue les probabilités d'erreurs de rappel de l'information « item » (*Boutard, 2015*). De plus, l'empan de mots met en jeu les connaissances en MLT et leur récupération par le buffer épisodique. De ce fait, il nous a semblé pertinent de compléter l'évaluation de la MCT verbale par une tâche de répétition de pseudo-mots (PM), considérée comme la mesure la plus pure de la boucle phonologique (*Hansson et al., 2007 ; Delage, 2015*).

Cette épreuve est issue de la Batterie d'Evaluation du Langage ECrit (*Mousty et coll., 1994*), dont les normes ont été établies sur 217 enfants de CE1 et CM1. Cette tâche de répétition de PM permet d'évaluer les habiletés de perception de la parole et de mesurer un empan de MCT verbale sur un matériel non signifiant. Le buffer épisodique est donc peu ou pas mis en jeu. L'épreuve, préenregistrée, se compose de deux listes de pseudo-mots de complexité graduelle : une partie CV et une partie CCV. D'une série à l'autre, la longueur des items augmente (1 à 5 syllabes). L'empan correspond au nombre de syllabes de la série la plus longue pour laquelle le sujet a réussi au moins un item. Pour les modalités de passation et de cotation, nous avons respecté les consignes de la BELEC.

2.1.2. Evaluation de la mémoire de travail et des fonctions exécutives

En clinique, la tâche d'empan de chiffres envers est la plus administrée pour tester la MT, mais elle met en jeu une composante spatiale qui représente un biais important (*Mazeau & Glasel, 2017*). De plus, cette tâche d'empan de chiffres envers n'exigerait pas de traitement interférent entre l'écoute des items et leur rappel (*St-Clair Thompson, 2010 ; Delage & Frauenfelder, 2012*). Or, la MT verbale doit s'évaluer par une tâche d'empan complexe qui implique une activité cognitive pendant le maintien des items. Ce travail cognitif est primordial pour engager les processus attentionnels et exécutifs de l'AC (*Barrouillet & Camos, 2007 ; Kane et al., 2007*).

a. Empan complexe (MTVE)

Pour tester les capacités de MT verbale, nous avons choisi de nous baser sur une tâche d'empan complexe plutôt que sur une mesure d'empan envers. Nous avons donc administré l'épreuve de mémoire de travail verbale chez l'enfant (*Picard et coll., 2008*) adaptée du Listening Span Task de Siegel et Ryan (*1989*). Des séries de phrases, dont le dernier mot est manquant, sont présentées à l'enfant auditivement et à l'écrit. Le sujet doit produire oralement les derniers mots, les mémoriser puis les rappeler à la fin de l'essai dans l'ordre de présentation. En tout, on présente au sujet 4 séries de phrases. Dans la première série, on propose à l'enfant 3 essais de 2 phrases. Puis la deuxième série contient 3 essais de 3 phrases, et ainsi de suite jusqu'à atteindre 5 phrases. Par exemple, dans un essai de 2 phrases, on dit à l'enfant « Pour se faire couper les cheveux, on va chez le... », il répond « coiffeur » et doit garder ce mot en mémoire. Puis on lui dit « On se lave les mains avec de l'eau et du... », il répond « savon ». On lui demande alors de rappeler les deux mots cibles dans l'ordre de présentation.

Les auteurs de l'épreuve ont veillé à ce que le nombre de mots par phrase se situe entre 6 et 11. Ils ont réparti les phrases les plus courtes et les plus longues de façon équilibrée. De plus, les structures syntaxiques sont diversifiées et simples. Les phrases ont été construites de façon à ce que le dernier mot soit très prédictible et sans difficulté d'évocation (vocabulaire d'usage des enfants). Par ailleurs, ces derniers mots sont de deux syllabes et toujours indicés par un déterminant ou une préposition. Sur les 42 phrases totales, 33 des derniers mots sont des noms communs, 5 sont des verbes, et 4 sont des adjectifs ; et leur répartition est équilibrée.

Pour les procédures de passation et la cotation de l'épreuve, nous avons respecté les conditions indiquées par les auteurs (*Picard et coll., 2008*).

Cette épreuve, étalonnée chez 133 enfants de CE2, CM1 et CM2, permet ainsi de mesurer un empan complexe, puisqu'elle nécessite un stockage et un traitement interférent. Elle permet également de calculer le nombre de mots rappelés et le nombre d'intrusions.

b. Evaluation des fonctions exécutives (Protocole d'évaluation « Mémoire de travail »)

Afin d'évaluer l'administrateur central, part exécutive de la MT, nous avons choisi les 4 épreuves suivantes, issues du protocole d'évaluation informatisé « Mémoire de travail ».

L'épreuve de **flexibilité mentale** se compose de 30 stimuli visuels apparaissant sur l'écran. Les parties haute et basse de l'écran sont séparées, car le sujet doit dénommer le nom de l'image quand elle apparaît en haut, et dénommer la couleur de l'image quand elle apparaît en bas. Au fil de l'épreuve, 15 images apparaissent en haut, 15 apparaissent en bas, dans un ordre aléatoire non systématisé et non prévisible par l'enfant. Le sujet doit donc changer de critère 21 fois, ce qui teste sa flexibilité mentale.

L'épreuve **d'inhibition** se compose de 12 diapositives. Sur chacune d'elles, l'enfant voit 8 images en noir et blanc, disposées en deux lignes de 4. L'enfant doit dénommer le plus vite possible ces images, sauf celles représentant des animaux. En tout, il voit 96 images, dont 23 d'animaux. Le nombre d'images d'animaux varie selon les diapositives (de 0 à 3), et leur position sur les lignes change aussi.

Les épreuves de **réactualisation** nécessitent une mise à jour permanente des informations stockées en MT. Le protocole propose donc deux épreuves inspirées de la tâche de « running span » selon deux modalités d'entrée : auditive et visuelle. L'enfant entend des listes de mots, ou voit des séries d'images, et doit restituer les trois derniers items entendus/vus dans leur ordre d'apparition.

Chaque épreuve de mise à jour (MàJ) se compose de 5 paires de listes contenant 4 à 8 items (2 paires de 4 items, 2 paires de 5 items etc). Tous les mots correspondent à des substantifs bisyllabiques. Le sujet ne connaît pas à l'avance la longueur des listes qu'il voit ou entend. Les items sont présentés de façon séquentielle, et les listes se succèdent de façon aléatoire et non dans l'ordre croissant de longueur pour éviter que le sujet

n'anticipe le nombre de stimuli. Mais l'ordre d'apparition des listes selon leur longueur est identique dans les deux modalités d'entrée, afin de permettre une comparaison.

Dans toutes ces tâches exécutives, les mots et images ont été choisis par les auteurs pour être très courants et ne pas perturber les capacités de dénomination (*Boutard, 2015*).

2.2. Epreuve d'évaluation syntaxique

Afin d'évaluer la compréhension orale d'énoncés, nous avons choisi d'administrer en modalité auditive l'E.CO.S.SE : Epreuve de COmpréhension Syntaxico-SEmantique (*Lecocq, 1996*), étalonnée sur 2088 enfants de 4 à 12 ans (dont 534 enfants de 8 à 10,9 ans). Il s'agit d'une méthode de compréhension off-line car elle s'intéresse au résultat du traitement (*Kail, 2015*). Cette épreuve s'appuie sur la technique de pointage d'images. L'examineur énonce une phrase-cible au sujet qui doit désigner l'image correspondante parmi 4, après un temps de latence. Les énoncés sont regroupés en blocs de complexité syntaxique progressive. Les phrases entendues sont de plus en plus complexes syntaxiquement. Cette méthode d'évaluation permet donc de noter les erreurs de l'enfant en fonction des types de phrases, et de supposer les traitements erronés mis en œuvre. L'ECOSSE présente donc l'intérêt de permettre une analyse fine des réponses atypiques. L'ordre de complexité et la nature des énoncés sont présentés en *ANNEXE II*.

2.3. Evaluation de l'accès lexical

Nous avons choisi d'administrer les deux tâches suivantes afin de tester le niveau de vocabulaire et surtout l'accès au lexique. En effet, l'accès au stock lexical représente une variable qui pourrait influencer la compréhension syntaxique. L'accès lexical pourrait également biaiser les résultats aux épreuves de flexibilité, d'inhibition et de mise à jour, dans lesquelles le sujet doit dénommer de nombreuses images. Enfin, l'épreuve de MTVE sollicite également l'accès lexical puisque le sujet doit énoncer le mot manquant dans des phrases entendues.

Dans notre étude, nous avons donc choisi l'accès lexical comme variable contrôlée. Ainsi, nous avons vérifié que l'accès au lexique soit dans la norme chez tous nos sujets.

2.3.1. Dénomination Rapide Sérielle (EVALEC)

Dans cette épreuve issue de la batterie d'évaluation EVALEC (*Sprenger-Charolles et coll., 2010*), l'enfant doit dénommer le plus rapidement possible 6 couleurs présentées 8 fois. D'abord, il est invité à lire les noms de couleurs, puis il doit dénommer les couleurs elles-mêmes. L'objectif est de vérifier si la lenteur est spécifique ou non à la lecture.

Concernant la norme, le temps de réponse est plus court lorsqu'il faut lire les noms de couleurs. Or, puisqu'il s'agit d'une capacité reliée à la lecture, et que notre échantillon contient 7 enfants sur 9 avec retard d'acquisition du langage écrit, il ne serait pas étonnant de trouver des déficits temporels en dénomination en lecture. En revanche, un déficit dans les temps de dénomination hors lecture serait lié à une lenteur d'accès au lexique.

2.3.2. Evaluation du vocabulaire (ECOSSE)

Avant d'administrer l'épreuve de compréhension sémantico-syntaxique en modalité auditive, nous avons effectué la vérification du vocabulaire proposée dans l'ECOSSE. Le sujet doit dénommer 48 dessins correspondant aux mots contenus dans les énoncés ultérieurs (32 noms, 8 verbes et 8 adjectifs). Puis, l'examineur reprend les erreurs commises en dénomination : il énonce ces mots en demandant à l'enfant de désigner les dessins correspondants. Nous avons vérifié que la connaissance lexicale soit dans les normes chez nos participants, pour que les erreurs de compréhension d'énoncés soit rapportées à la complexité syntaxique et non pas au vocabulaire.

Le tableau ci-dessous (*Tableau 3*) reprend les tâches administrées et les principaux critères de mesures retenus.

Tableau 3 : Liste des épreuves et des critères de mesures

Domaines évalués	Epreuves	Critères de mesures	
Mémoire à court terme verbale	Empan de chiffres (BALE)	Nombre de chiffres restitués dans le bon ordre	<u>Empan simples</u>
	Empan de mots monosyllabiques dissimilaires (« Mémoire de Travail »)	Nombre de mots restitués dans le bon ordre	
	Empan de pseudo-mots (BELEC)	Nombre de syllabes correctement répétées	
Mémoire de travail verbale	MTVE	Nombre de phrases pour lesquelles le rappel est parfait dans au moins 2 essais sur 3	<u>Empan complexe</u>
		Nombre de mots correctement rappelés	
		Nombre d'intrusions	
Fonctions exécutives	Flexibilité	Nombre d'erreurs	
	Inhibition	Nombre de réponses aux distracteurs	
	Mise à jour – versant auditif	Nombre d'items correctement restitués	
	Mise à jour – versant visuel	Nombre d'items correctement restitués	
Compréhension syntaxique	E.CO.S.SE (modalité auditive)	Nombre total d'erreurs	
		Nombre d'erreurs par bloc et par énoncé	

2.4. Paradigme expérimental

2.4.1. Ordre de passation des épreuves

Chez tous les sujets, nous avons administré les épreuves dans le même ordre :

1. Protocole informatisé « Mémoire de travail » : flexibilité ; inhibition ; mise à jour – versant auditif ; mise à jour – versant visuel
2. Répétition de pseudo-mots (BELEC)
3. Protocole informatisé « Mémoire de travail » : répétition de mots monosyllabiques dissimilaires
4. MTVE
5. Empan de chiffres (BALE)
6. E.CO.S.SE (modalité auditive)
7. Dénomination rapide sérielle (EVALEC)

2.4.2. Modalités de passation

Nous avons veillé à respecter, autant que possible, un cadre d'évaluation similaire chez tous les participants afin de permettre une comparaison des résultats.

Concernant le matériel, nous avons utilisé le même ordinateur de 15,5 pouces pour toutes les passations.

A propos des conditions de passation, un seul examinateur a procédé à l'administration des tests chez tous les sujets, en respectant l'ordre des épreuves ci-dessus. Avec chaque sujet, les épreuves ont été réalisées en deux passations. Lors du premier jour de passation, nous leur avons proposé les quatre premières tâches. Puis, les trois dernières tâches ont été administrées lors d'une seconde passation sur un jour différent.

De plus, concernant le lieu de passation, nous avons tenté d'évaluer les participants dans un environnement non anxiogène, familier, calme et sobre pour éviter les sources de distraction (*Majerus, 2016*). Nous souhaitons que les processus exécutifs et attentionnels ne soient pas perturbés par un contexte nouveau ou inattendu, et donc que les sujets restent concentrés sur une tâche.

De ce fait, les passations se sont toutes réalisées aux domiciles des participants, dans la chambre de l'enfant (6 fois sur 9) ou dans une pièce de vie calme (3 fois sur 9).

Enfin, les passations se sont déroulées sur des jours sans école (mercredi, samedi ou vacances). Cette condition a permis aux enfants de disposer de ressources cognitives et attentionnelles optimales pour réaliser les tests.

III. Résultats

1. Stratégies d'analyse des données

1.1. Choix statistiques

1.1.1. Analyses corrélationnelles

Tout d'abord, afin de tester l'hypothèse d'une implication spécifique de la MT dans la compréhension syntaxique orale, nous avons calculé des coefficients de corrélation.

Pour quantifier les relations entre les variables mnésiques, exécutives et de compréhension syntaxique, nous avons donc effectué des analyses corrélationnelles (R de Pearson) entre les scores aux tâches suivantes : empan simples / empan complexe / fonctions exécutives / ECOSSE.

1.1.2. Analyses de régression linéaire

Des analyses de régression linéaire ont été réalisées pour chercher à démontrer des relations prédictives, à estimer l'effet des prédicteurs sur une variable prédite. Ces analyses ont pour but de dégager la part de variance expliquée indépendamment et respectivement par les prédicteurs, sur les résultats en compréhension syntaxique.

Le nombre d'erreurs à l'ECOSSE a été choisi comme variable critère (prédite). Nous avons choisi comme prédicteurs : les scores aux tâches d'empan simples, les scores à l'épreuve de MTVE (empan complexe, nombre de mots rappelés), et les scores aux tâches de fonctions exécutives (flexibilité ; inhibition ; mises à jour auditive et visuelle).

Les analyses de régression linéaire simples ont pour but de montrer la part de variance de chaque prédicteur indépendamment sur les résultats en compréhension syntaxique. Puis, l'analyse de régression multiple a pour objectif d'examiner la force de prédiction des mesures mnésiques et des mesures exécutives sur les mesures syntaxiques.

Ces analyses de régression nous ont donc permis de déterminer le prédicteur expliquant la part de variance la plus significative des résultats en compréhension syntaxique.

1.1.3. Analyses descriptives

Puisque le nombre de participants de l'étude est restreint, et que leurs âges varient entre 8 ans 11 mois et 10 ans 9 mois, nous n'avons pas calculé les moyennes et écarts-types de l'échantillon aux différentes tâches. Ces résultats ne seraient pas représentatifs et difficilement comparables à la population standard.

Cependant, la taille réduite de l'échantillon nous a permis de réaliser des analyses descriptives plus qualitatives. Dans un premier temps, nous avons recensé les résultats de nos 9 sujets à chaque épreuve, sous forme de tableaux. Dans un deuxième temps, nous avons noté les remarques qualitatives observées lors de la passation des épreuves.

Ces analyses descriptives nous ont permis d'examiner les stratégies employées par les sujets, lors des tâches mnésiques, exécutives et syntaxiques. L'analyse fine des données nous a également permis de repérer les stratégies efficaces et celles défailtantes et ainsi de tenter de comprendre le fonctionnement des participants.

L'analyse descriptive nous a semblé adaptée pour tester nos hypothèses secondaires.

En *ANNEXE III*, nous avons présenté un tableau-exemple des résultats d'un sujet, ainsi que le tableau des remarques qualitatives générales sur notre échantillon.

1.2. Variable contrôlée

L'accès lexical représente une variable contrôlée. Nous l'avons testé à travers les épreuves de Dénomination Rapide Sérielle (EVALEC) et de vérification du vocabulaire (ECOSSE). Chez tous nos participants, nous avons vérifié que l'accès lexical se situait dans les normes, avec un score supérieur à -1.65 écart-type (ou > au centile 5).

De plus, nous avons inclus les scores en Dénomination Rapide Sérielle (DRS) dans nos analyses statistiques. Nous avons réalisé une analyse de régression linéaire simple avec les scores en DRS pour nous assurer que l'accès lexical n'était pas un prédicteur significatif des résultats en compréhension syntaxique.

2. Objectif principal

2.1. Analyses corrélationnelles (R de Pearson)

Nous avons choisi de comparer les relations des variables suivantes : capacités de la MCT verbale, capacités de la MT verbale, et fonctions exécutives. La variable critère était le nombre d'erreurs à l'ECOSSE en modalité auditive.

Afin d'examiner les liens entre ces variables, nous avons réalisé des analyses corrélationnelles (R de Pearson) présentées dans le tableau ci-dessous (*Tableau 4*).

Tableau 4 : Analyses de corrélations (R de Pearson) entre les mesures de MCT verbale, de MT verbale, de fonctions exécutives et de compréhension syntaxique

		Compréhension syntaxique (ECOSSE)
		Nombre total d'erreurs
MCT verbale (empan simples)	Empan mots	-.50**
	Nombre mots restitués dans l'ordre	-.54**
	Empan pseudo-mots CV	-.37 ns
	Empan pseudo-mots CCV	-.21 ns
	Nombre réponses correctes PM CV	-.51**
	Nombre réponses correctes PM CCV	-.39 ns
	Empan chiffres endroit	-.69*
	Empan chiffres envers	.07 ns
MT verbale (MTVE)	Nombre de mots rappelés	-.67*
	Empan complexe	-.74*
	Nombre d'intrusions	.28 ns
Fonctions exécutives	Nombre d'erreurs de <i>flexibilité</i>	-.15 ns
	Nombre d'erreurs d' <i>inhibition</i>	.27 ns
	Nombre d'items correctement restitués <i>MàJ – versant auditif</i>	-.19 ns
	Nombre d'items correctement restitués <i>MàJ – versant visuel</i>	-.07 ns

*.01 < p ≤ .05 ; **.05 < p ≤ .1 ; ns : non significatif (p > .1)

Ces résultats montrent que la mesure de la compréhension syntaxique (ECOSSE) est corrélée avec certaines tâches de MCT verbale et de MT verbale. En revanche, aucune corrélation n'est relevée entre les scores de fonctions exécutives et la compréhension syntaxique.

Concernant la MCT verbale, l'empan de chiffres endroit est significativement corrélé à la compréhension syntaxique (**-.69 ; p ≤ .05**). Dans la tâche de répétition de mots

dissimilaires, le nombre de mots restitués dans l'ordre est moyennement corrélé à la compréhension syntaxique ($-.54 ; .05 < p \leq .1$) tout comme l'empan de mots ($-.50 ; .05 < p \leq .1$). Enfin, dans l'épreuve de répétition de pseudo-mots, le nombre de réponses correctes de pseudo-mots CV est moyennement corrélé à la compréhension syntaxique ($-.51 ; .05 < p \leq .1$).

L'empan de chiffres endroit est donc la tâche de MCT verbale la plus corrélée à l'épreuve de compréhension syntaxique. La courbe linéaire de tendance ci-dessous modélise cette relation (*Figure 1*).

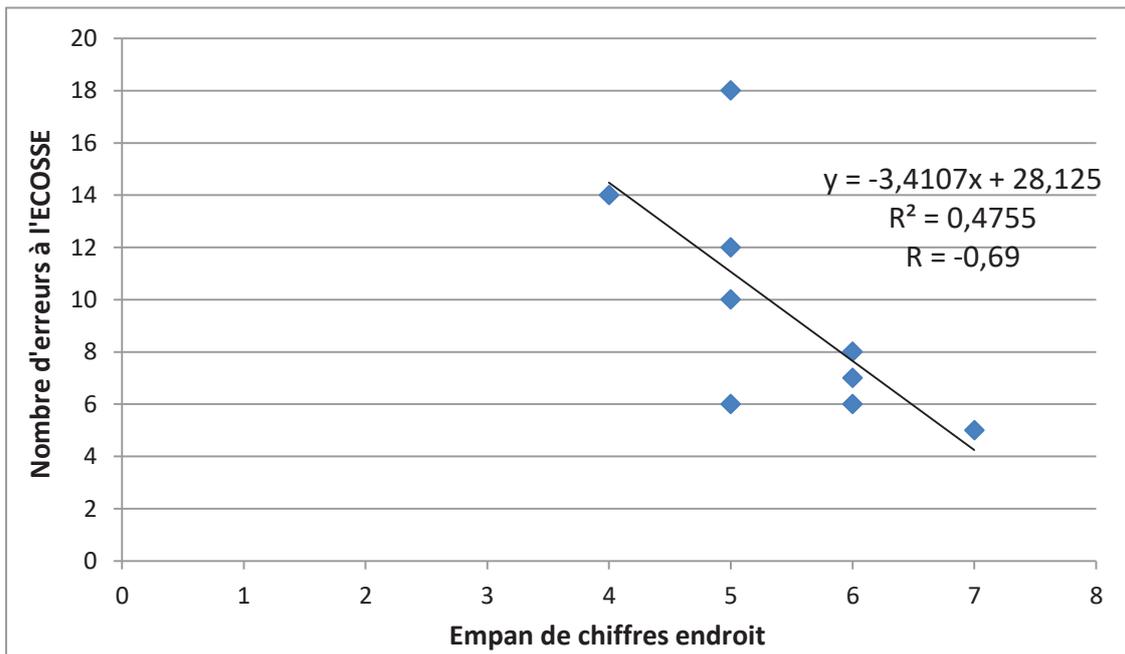


Figure 1 : Nombre total d'erreurs à l'ECOSSE en fonction de l'empan de chiffres endroit

Plus l'empan de chiffres endroit est élevé, moins les sujets commettent d'erreurs de compréhension à l'ECOSSE (*Figure 1*).

Concernant la MT verbale, le nombre de mots rappelés à la MTVE et l'empan complexe sont significativement corrélés à l'épreuve de compréhension syntaxique (ECOSSE). Les résultats montrent une corrélation significative entre le nombre de mots rappelés à la MTVE et la compréhension syntaxique ($-.67 ; .01 < p \leq .05$); et entre l'empan complexe et la compréhension syntaxique ($-.74 ; .01 < p \leq .05$).

Les courbes linéaires de tendance ci-dessous modélisent ces relations (*Figure 2 ; Figure 3*).

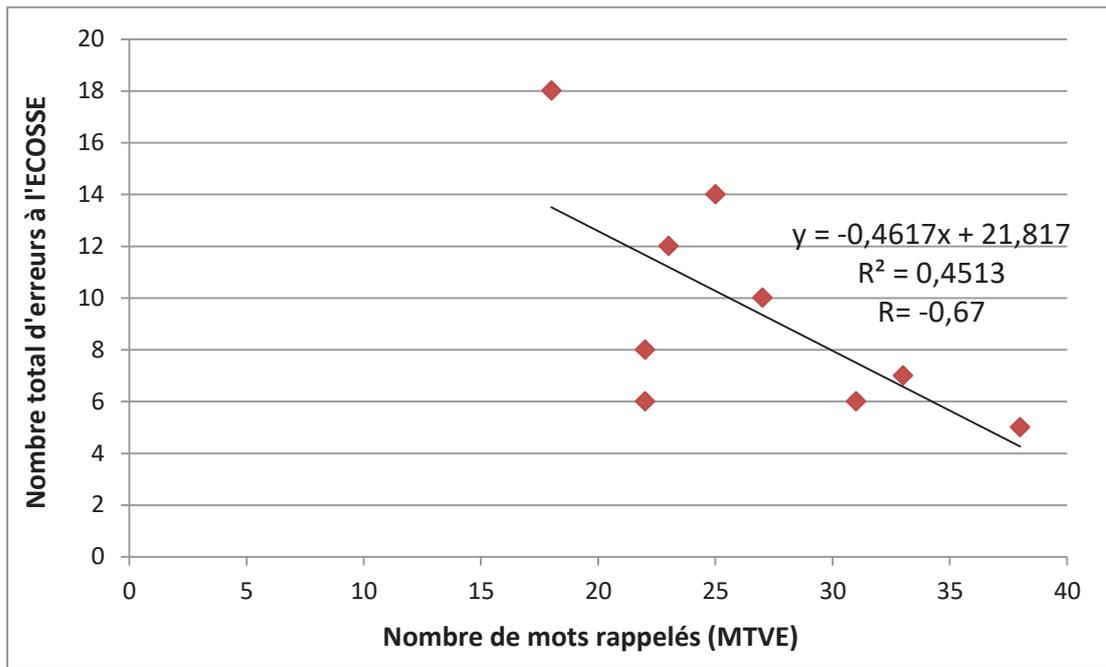


Figure 2 : Nombre total d'erreurs à l'ECOSSE en fonction du nombre de mots rappelés à la MTVE

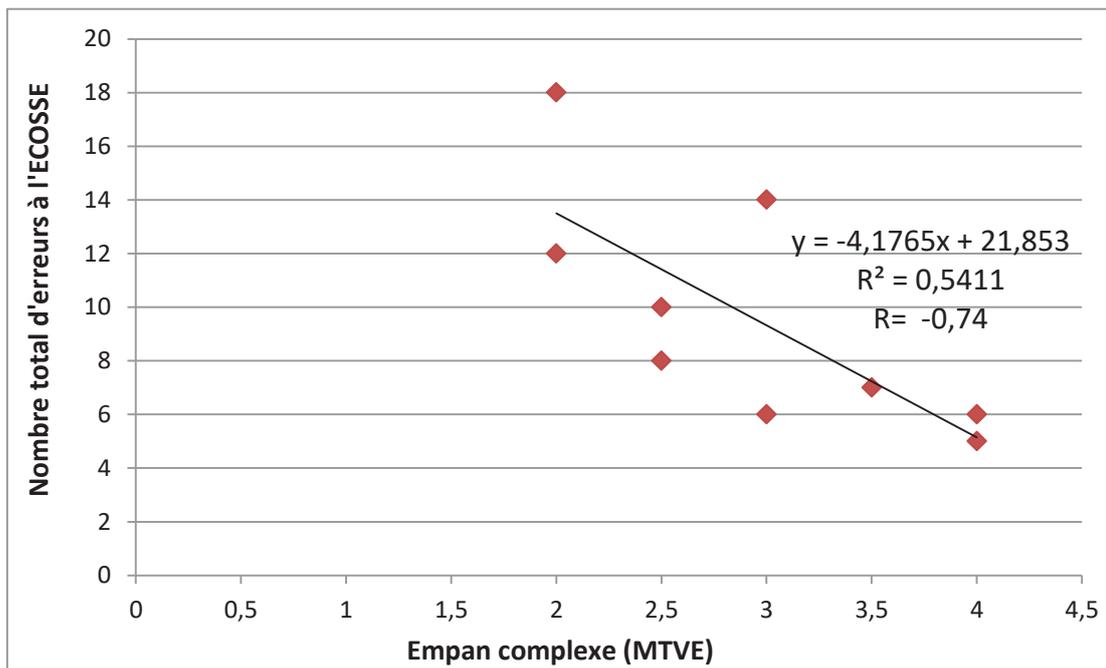


Figure 3 : Nombre total d'erreurs à l'ECOSSE en fonction de l'empan complexe à la MTVE

Plus le nombre de mots rappelés à la MTVE est élevé, moins les enfants commettent d'erreurs de compréhension à l'ECOSSE (Figure 2). Plus l'empan complexe est élevé, moins les sujets commettent d'erreurs de compréhension à l'ECOSSE (Figure 3).

En revanche, les résultats des analyses corrélationnelles entre les scores aux tâches de fonctions exécutives et la compréhension syntaxique montrent des corrélations non significatives ($p > .1$)

A travers ces analyses corrélationnelles, nous pouvons voir les degrés de relation entre les variables. Mais la corrélation n'entraîne pas forcément la causalité. Donc ces résultats ne nous indiquent pas si les relations sont prédictives. Pour chercher à savoir si les scores aux tâches mnésiques et aux tâches exécutives prédisent les performances en compréhension syntaxique, nous avons donc réalisé des analyses de régression linéaire.

2.2. Analyses de régression linéaire

Notre objectif à travers ces analyses est d'explorer les contributions respectives des différents prédicteurs pour déterminer ceux qui prédisent le plus fortement la compréhension syntaxique.

Le score à l'ECOSSE a été choisi comme variable critère/prédite. Nous avons choisi comme scores prédicteurs : les scores aux tâches de MCT verbale, les scores à la tâche de MT verbale, et les scores aux tâches de fonctions exécutives. Le temps de réponse en Dénomination Rapide Sérielle (EVALEC) a été ajouté comme prédicteur, pour vérifier qu'il ne prédise pas significativement la compréhension syntaxique.

2.2.1. Analyses de régression linéaire simples

Tableau 5 : Résultats de l'analyse de régression linéaire simple avec la compréhension syntaxique orale comme variable critère et les scores aux tâches de MCT verbale comme prédicteurs

Prédicteurs	R	R ²	R ² ajusté	Erreur-type de l'estimation	F	p
Empan mots	-.49	.25	.14	4.05	2.29	.17
Nombre mots restitués dans l'ordre	-.54	.26	.19	3.91	2.93	.13
Nombre réponses correctes PM CV	-.51	.26	.15	4.02	2.43	.16
Empan chiffres endroit	-.69	.48	.40	3.38	6.35	.04

Tableau 6 : Résultats de l'analyse de régression linéaire simple avec la compréhension syntaxique orale comme variable critère et les scores à la tâche de MT verbale comme prédicteurs

Prédicteurs	R	R ²	R ² ajusté	Erreur-type de l'estimation	F	p
Nombre de mots rappelés	-.67	.45	.37	3.45	5.76	.04
Empan complexe	-.74	.54	.48	3.16	8.25	.02

Tableau 7 : Résultats de l'analyse de régression linéaire simple avec la compréhension syntaxique orale comme variable critère et les scores aux tâches de fonctions exécutives comme prédicteurs

Prédicteurs	R	R ²	R ² ajusté	Erreur-type de l'estimation	F	p
Nombre d'erreurs de flexibilité	-.15	.02	-.12	4.61	0.16	.70
Nombre d'erreurs d'inhibition	.27	.07	-.06	4.49	0.54	.49
Nombre d'items correctement restitués MâJ – versant auditif	-.19	.04	-.10	4.58	0.26	.63
Nombre d'items correctement restitués MâJ – versant visuel	-.07	.005	-.14	4.65	0.03	.86

Pourcentages de variance expliquée :

Concernant les épreuves de MCT verbale, l'empan de chiffres endroit explique 40% de la variance du nombre d'erreurs à l'ECOSSE ($.01 < p \leq .05$). Le tableau 5 montre donc que la capacité de MCT verbale, évaluée par l'empan de chiffres endroit, est un prédicteur significatif de la compréhension syntaxique orale. Les autres mesures de la MCT verbale ne prédiraient pas les performances à l'ECOSSE.

Concernant l'épreuve de MT verbale (MTVE), 37% de la variabilité du nombre d'erreurs à l'ECOSSE est prédite à partir de la variabilité du nombre de mots rappelés à la MTVE ($.01 < p \leq .05$). De plus, l'empan complexe explique 48% de la variance du nombre d'erreurs à l'ECOSSE ($.01 < p \leq .05$). Le tableau 6 montre donc que la capacité de la MT verbale, évaluée par la MTVE, est un prédicteur significatif de la compréhension syntaxique orale. L'empan complexe est le prédicteur le plus significatif du nombre d'erreurs à l'ECOSSE.

Concernant les épreuves testant les fonctions exécutives, les scores ne sont pas significatifs ($p > .1$).

2.2.2. Analyse de régression linéaire multiple

Nous avons ensuite procédé à une analyse de régression linéaire multiple avec les trois tâches expliquant indépendamment les plus grandes parts de variance.

Tableau 8 : Résultats de l'analyse de régression linéaire multiple avec comme variable critère la compréhension syntaxique orale, et comme prédicteurs le nombre de mots rappelés à la MTVE, l'empan complexe et l'empan simple de chiffres endroit

Prédicteurs	R total	R ²	R ² ajusté	Erreur-type de l'estimation	F	p
Empan chiffres endroit	.85	.72	.56	2.90	4.36	.07
Nombre de mots rappelés à la MTVE						
Empan complexe						

Les coefficients de détermination (R, R² et R² ajusté) sont proches de 1 (*Tableau 8*). On pourrait en déduire l'existence d'une relation entre le nombre d'erreurs à l'ECOSSE et les différents prédicteurs définis (empan de chiffres endroit, nombre de mots rappelés à la MTVE, empan complexe). Ces variables prédiraient 56% de la variance du nombre d'erreurs en compréhension syntaxique ($p = 0.07$). Mais puisque la valeur p est comprise entre 0.05 et 0.1, nous ne pouvons que faiblement supposer l'existence d'un lien prédictif.

2.2.3. Analyse de régression linéaire simple (variable contrôlée)

Enfin, nous avons effectué l'analyse de régression linéaire simple entre notre variable contrôlée et le nombre d'erreurs à l'ECOSSE. Les résultats sont exposés dans le *Tableau 9* ci-dessous.

Tableau 9 : Résultats de l'analyse de régression linéaire simple avec la compréhension syntaxique orale comme variable critère et le temps de réponse couleurs (Dénomination Rapide Sérielle) comme prédicteur

Prédicteurs	R total	R ²	R ² ajusté	Erreur-type de l'estimation	F	p
Temps de réponse couleurs (Dénomination Rapide Sérielle)	.48	.23	.12	4.09	2.09	.19

Le *Tableau 9* ne montre pas de relation prédictive entre le temps de réponse en Dénomination Rapide Sérielle (couleurs) et le nombre d'erreurs à l'ECOSSE. L'accès lexical ne prédirait pas significativement la compréhension syntaxique. En effet, R² ajusté = 0.12 (**p = 0.19**). Puisque p est supérieur à 0.1, aucune relation prédictive ne peut être prouvée par cette analyse de régression linéaire.

3. Objectifs secondaires

3.1. Objectif secondaire 1

Notre objectif secondaire 1 était d'examiner les types d'énoncés provoquant une compréhension erronée chez des enfants avec troubles de la CM. Nous avons choisi d'effectuer une analyse descriptive et qualitative pour tester l'hypothèse suivante : *chez nos sujets avec troubles de la CM, nous nous attendons à relever une compréhension erronée des énoncés complexes (phrases passives et relatives).*

Nous avons donc recensé les différentes réponses erronées de nos 9 participants à l'épreuve de compréhension syntaxique (ECOSSE). Des histogrammes reprenant le nombre d'erreurs par bloc et par énoncé sont présentés en *ANNEXE IV*.

Nous voyons que les erreurs apparaissent de façon représentative à partir du bloc K. Les phrases simples ne font pas l'objet d'erreurs de compréhension. Selon l'*ANNEXE IV*, les blocs engendrant le plus d'erreurs chez nos sujets sont les blocs O (**6,98% des erreurs**), P (**6,98%**), Q (**9,30%**), T (**13,95%**), U (**13,95%**), W (**17,44%**), V (**18,60%**). Ces blocs représentent respectivement : les phrases avec prépositions (au-dessus, au-dessous, sous), les phrases relatives en « qui » (SS, OS), les phrases comparatives et superlatives (infériorité, supériorité), les phrases relatives en « que » (enchâssées,

branchées à droite), les phrases avec coréférence ambiguë du pronom, les phrases relatives complexes (sur/dans lequel, dont), et les phrases avec adjectifs ordinaux spécifiés ou non.

Dans un premier temps, nous avons examiné la compréhension des phrases complexes. Conformément à la revue de littérature, nous avons considéré que les phrases complexes étaient celles contenant un déplacement syntaxique (passives, relatives, pronoms) ou un enchâssement (*Jakubowicz & Tuller, 2008 ; Delage, 2015*). Selon cette approche théorique, nous avons qualifié de complexes les énoncés des blocs P, S, T, W (phrases relatives) ; R (phrases passives) et U (phrases avec coréférence ambiguë du pronom).

Nous avons donc examiné la répartition des énoncés complexes induisant le plus d'erreurs. Les résultats sont présentés dans la *Figure 4* ci-dessous.

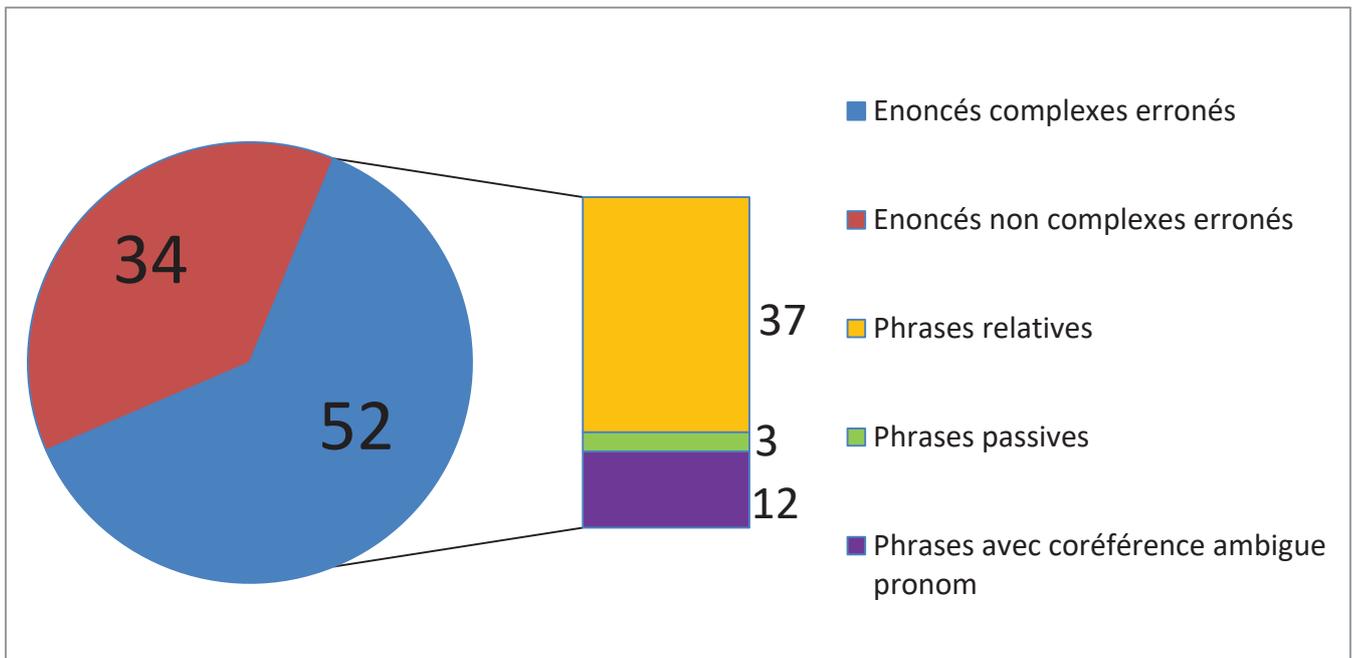


Figure 4 : Répartition des énoncés complexes induisant le plus d'erreurs à l'ECOSSE

Nous voyons que 52 erreurs parmi les 86 erreurs totales à l'ECOSSE concernent les énoncés complexes ; ce qui représente **60,47%** des erreurs totales.

Parmi les réponses erronées aux phrases complexes, **71,15%** concernent des phrases relatives ; **23,08%** des phrases avec coréférence ambiguë du pronom ; et **5,77%** des phrases passives (*Figure 4*).

Parmi les réponses atypiques aux phrases relatives, **10,81%** concernent des phrases avec effacement ou remplacement de relative ; **16,22%** des phrases relatives en « qui » ;

32,43% des phrases relatives en « que » (enchâssées, branchées à droite) ; et 40,54% des phrases relatives complexes (sur/dans lequel, dont).

Suite au fort pourcentage d'erreurs de compréhension aux phrases relatives (blocs P, S, T, W), nous avons analysé plus en détail les réponses atypiques données par nos participants dyscalculiques. Les résultats de cette analyse descriptive sont repris dans la *Figure 5* ci-dessous.

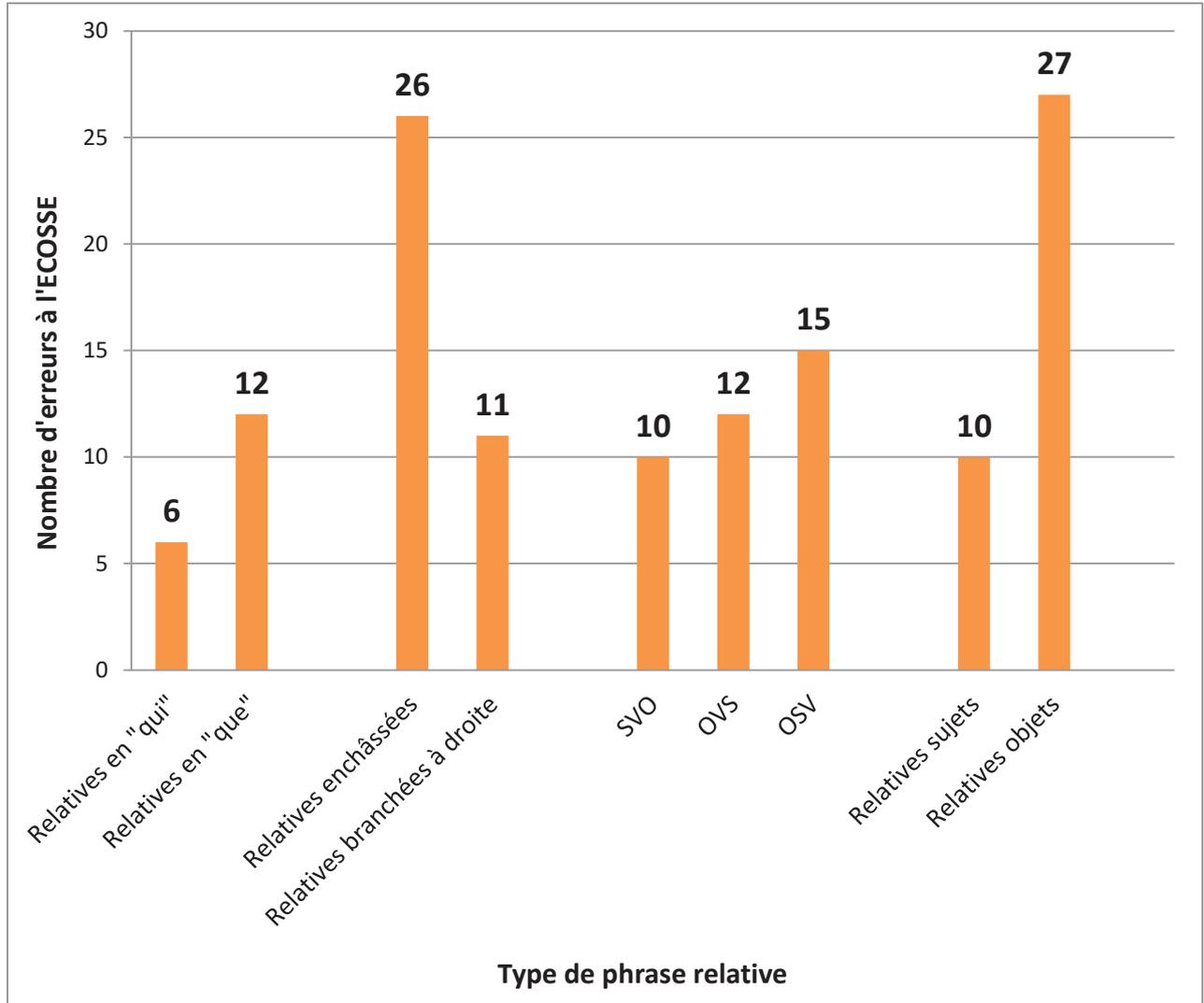


Figure 5 : Nombre d'erreurs à l'ECOSSE en fonction du type de phrase relative

D'après la *Figure 5* :

- Les erreurs de compréhension aux propositions relatives en « que » (bloc T) sont deux fois plus nombreuses que les erreurs aux propositions relatives en « qui » (bloc P).
- Les propositions relatives enchâssées provoquent 26 erreurs, alors que les propositions relatives branchées à droite provoquent 11 erreurs.
- Les propositions relatives de structure OSV provoquent 15 erreurs, les relatives de structure OVS provoquent 12 erreurs, et les relatives de structure SVO provoquent 10 erreurs.
- Les propositions relatives objets font l'objet de 27 erreurs de compréhension alors que les propositions relatives sujets font l'objet de 10 erreurs.

Concernant les phrases relatives en « que », les participants de notre étude comptabilisent 10 erreurs aux relatives renversables (énoncés T21 et T42), et 2 erreurs aux relatives non renversables (énoncés T13 et T34) (*ANNEXE IV*).

Nous avons examiné de façon plus précise les réponses aux phrases relatives ayant fait l'objet d'un nombre représentatif et exploitable d'erreurs (≥ 4). La répartition et le pourcentage des réponses à ces énoncés sont présentés dans le tableau ci-dessous (*Tableau 10*). La réponse attendue est toujours indiquée en gras. Les pourcentages de réponses des enfants sans trouble de 8 à 10,9 ans sont également présentés (étalonnage ECOSSE). Et les pourcentages de réponses de nos sujets s'éloignant le plus de la norme sont surlignés en gris.

Tableau 10 : Nombres et pourcentages des réponses aux phrases relatives de l'ECOSSE les plus échouées dans notre échantillon

		Rép. 1	Rép. 2	Rép. 3	Rép. 4	
Relatives en « que »	<u>T21</u>	Nombre	4	4	1	0
		Pourcentage	44.4%	44.4%	11.1%	0%
		<i>Etalonnage ECOSSE</i>	66.45%	12.46%	8.71%	12.38%
	<u>T42</u>	Nombre	5	4	0	0
		Pourcentage	55.6%	44.4%	0%	0%
		<i>Etalonnage ECOSSE</i>	37.76%	59.74%	1.55%	0.94%
Relatives complexes	<u>W13</u>	Nombre	0	4	3	2
		Pourcentage	0%	44.4%	33.3%	22.2%
		<i>Etalonnage ECOSSE</i>	2.12%	30.30%	52.84%	14.74%
	<u>W34</u>	Nombre	0	3	3	3
		Pourcentage	0%	33.3%	33.3%	33.3%
		<i>Etalonnage ECOSSE</i>	3.17%	25.14%	22.24%	49.44%

Les enfants de notre étude commettraient plus d'erreurs par rapport à la norme, et ce de façon représentative, aux énoncés T21 et T42.

Concernant la phrase T21 (relative enchâssée et renversable) : les enfants de notre étude choisissent la réponse erronée 2 à **44,4%**, contre **12,46%** chez les enfants sans trouble. Cette réponse correspond à la stratégie de traitement « inversion du sujet/ordre des mots ».

Concernant la phrase T42 (relative branchée à droite et renversable) : les enfants de notre étude choisissent la réponse erronée 1 à **55,6%**, contre **37,76%** chez les enfants sans trouble. Cette réponse correspond à la stratégie de traitement « inversion du sujet/ordre des mots ».

Concernant les phrases W13 et W34, il s'agit de relatives complexes, avec proposition relative enchâssée. Ces deux phrases engendrant le plus d'erreurs dans le bloc W (**12/15**) sont celles contenant « dans/sur lequel ». Alors que les deux phrases contenant « dont » n'induisent que 3 erreurs sur les 15 du bloc W. De plus, le bloc W propose des phrases de 12,75 mots en moyenne. Alors que les blocs P, S et T proposent des phrases de 9,92 mots en moyenne.

Dans un deuxième temps, nous avons examiné la compréhension des phrases non complexes selon nos critères de complexité syntaxique, mais qui font partie des énoncés très échoués chez nos sujets. Selon l'approche théorique choisie, nous avons qualifié de non complexes les énoncés des blocs E (négatives simples) ; K (phrases contenant « mais...pas ») ; O (phrases avec prépositions : devant, dessus, dans, sur) ; Q (phrases comparatives et superlatives) et V (phrases avec adjectifs ordinaux).

Nous avons donc examiné la répartition des énoncés non complexes induisant le plus d'erreurs. Les résultats sont présentés dans la *Figure 6* ci-dessous.

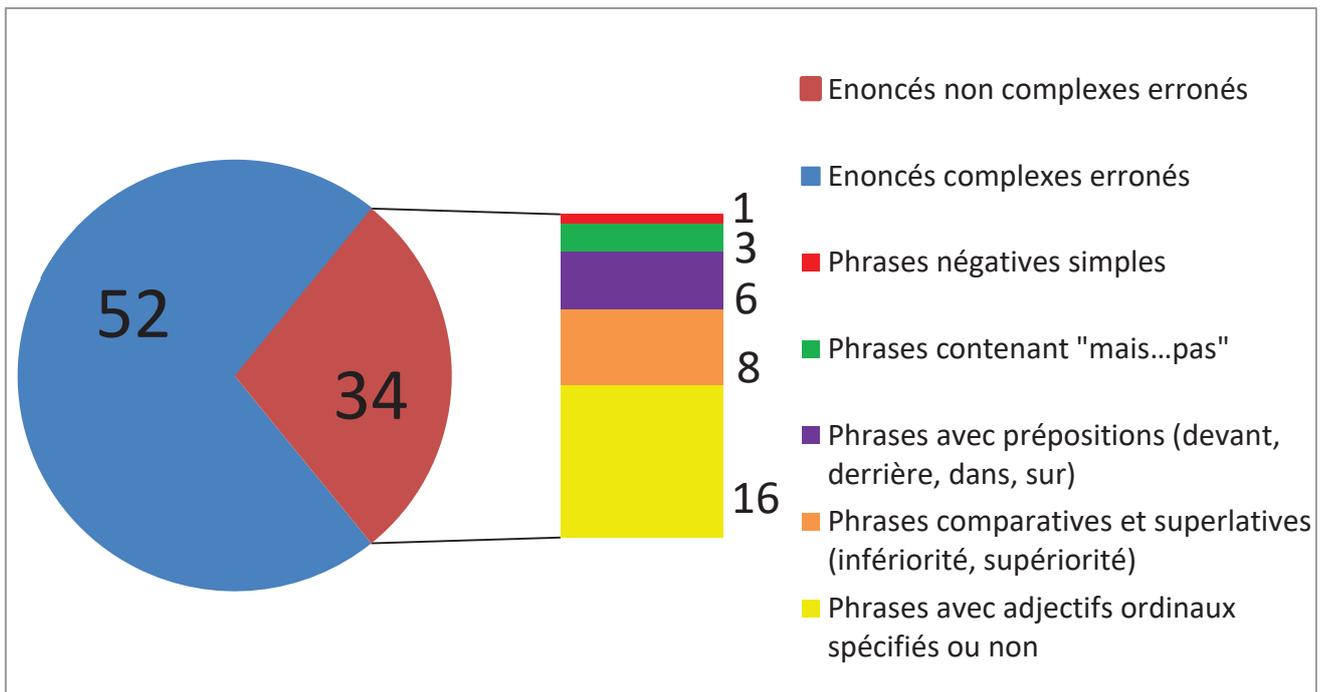


Figure 6 : Répartition des énoncés non complexes induisant le plus d'erreurs à l'ECOSSE

Nous voyons que 34 erreurs parmi les 86 erreurs totales à l'ECOSSE concernent les énoncés non complexes ; ce qui représente **39,53%** des erreurs totales.

A propos des réponses erronées aux phrases non complexes, **2,94%** concernent des phrases négatives simples ; **8,82%** des phrases contenant "mais...pas" ; **17,65%** des phrases avec prépositions (devant, derrière, dans, sur) ; **23,53%** des phrases comparatives et superlatives (infériorité, supériorité) ; et **47,06%** des phrases avec adjectifs ordinaux spécifiés ou non. Parmi les erreurs aux phrases qualifiées de non complexes dans notre étude, près de la moitié concernent donc les phrases avec adjectifs ordinaux (*Figure 6*).

Nous avons examiné de façon plus précise les réponses aux phrases non complexes ayant fait l'objet d'un nombre d'erreurs représentatif et exploitable (≥ 4). La répartition et le pourcentage des réponses à ces énoncés sont présentés dans le tableau ci-dessous (*Tableau 11*). La réponse attendue est toujours indiquée en gras. Les pourcentages de réponses des enfants de 8 à 10,9 ans sont également présentés (étalonnage ECOSSE). Et les pourcentages de réponses de nos participants s'éloignant le plus de la norme sont surlignés en gris.

Tableau 11 : Nombres et pourcentages des réponses aux phrases non complexes de l'ECOSSE les plus échouées dans notre échantillon

		Rép. 1	Rép. 2	Rép. 3	Rép. 4	
Superlative inférieure	Q41	Nombre	5	1	0	3
		Pourcentage	55.6%	11.1%	0%	33.3%
		<i>Étalonnage ECOSSE</i>	87.42%	5.86%	1,74%	15,12%
Adjectif ordinal	V12	Nombre	2	1	3	3
		Pourcentage	22.2%	11.1%	33.3%	33.3%
		<i>Étalonnage ECOSSE</i>	4.32%	52.03%	27.78%	15.68%
	V21	Nombre	3	0	6	0
		Pourcentage	33.3%	0%	66.7%	0%
		<i>Étalonnage ECOSSE</i>	58.40%	2.70%	36.17%	2.13%

Les enfants de notre étude commettraient plus d'erreurs par rapport à la norme, et ce de façon représentative, aux énoncés Q41, V12 et V21.

Concernant l'énoncé Q41, il s'agit d'une phrase superlative inférieure (« La pomme est *la moins* grande »). Les enfants de notre étude choisissent la réponse erronée 4 à **33,3%**, contre **15,12%** chez les enfants sans trouble. Cette réponse correspond à l'image où tous les objets ont la même taille.

Concernant l'énoncé V12, il s'agit d'une phrase avec adjectif ordinal (« Le chien a fait tomber *la deuxième* quille »). Il s'agit également de la phrase ayant fait l'objet du plus grand nombre d'erreurs à l'ECOSSE (*ANNEXE IV*).

Les enfants de notre étude choisissent la réponse erronée 1 à **22,2%**, contre **4,32%** chez les enfants sans trouble. Cette réponse correspond à un dessin ambigu, mais pas à une erreur à propos de l’adjectif ordinal.

Les enfants de notre étude choisissent la réponse erronée 4 à **33,3%**, contre **15,68%** chez les enfants sans trouble. Cette réponse correspond à une erreur à propos de l’adjectif ordinal (la troisième quille est par terre et non la deuxième).

Concernant l’énoncé V21, il s’agit d’une phrase avec adjectif ordinal (« La fille a fait tomber *la troisième* tasse »). Les enfants de notre étude choisissent la réponse erronée 3 à **66,7%**, contre **36,17%** chez les enfants sans trouble. Cette réponse correspond à une erreur à propos de l’adjectif ordinal (la deuxième tasse tombe et non la troisième).

3.2. Objectif secondaire 2

Notre objectif secondaire 2 visait à identifier les fonctions exécutives altérées chez des enfants avec troubles de la cognition mathématique. Nous avons donc réalisé une analyse descriptive pour tester l’hypothèse suivante : *les enfants avec troubles de la CM devraient obtenir des résultats déficitaires aux tâches de flexibilité, d’inhibition et de mise à jour.*

Nous avons calculé les pourcentages d’enfants ayant obtenu des résultats inférieurs à la norme dans les différentes épreuves testant les fonctions exécutives. Nous avons également calculé les pourcentages de sujets ayant obtenu des résultats inférieurs au seuil pathologique dans ces tâches exécutives.

Les résultats sont détaillés dans le tableau ci-dessous (*Tableau 12*).

		Flexibilité	Inhibition	Mise à jour – versant auditif	Mise à jour – versant visuel
Résultats < à la norme	Nombre	1	2	6	8
	Pourcentage	11,1%	22,2%	66,7%	88,9%
Résultats < au seuil pathologique	Nombre	1	0	5	7
	Pourcentage	11,1%	0%	55,6%	77,8%

Tableau 12 : Nombres et pourcentages de sujets ayant obtenu des résultats inférieurs à la norme et au seuil pathologique dans les épreuves évaluant les fonctions exécutives

L'analyse de données de nos 9 participants avec troubles de la CM (de 8 ans 11 mois à 10 ans 9 mois) révèle les résultats suivants :

- 1 enfant sur 9, soit **11,1%** de nos sujets, présente des résultats inférieurs au seuil pathologique en Flexibilité mentale.
- 2 enfants sur 9, soit **22,2%** de nos sujets, présentent des résultats inférieurs à la norme en Inhibition. Aucun de ces sujets ne présente de résultats inférieurs au seuil pathologique.
- 6 enfants sur 9, soit **66,7%** de nos sujets, présentent des résultats inférieurs à la norme en Mise à Jour – versant auditif. Parmi ces 6 enfants, 5 présentent des résultats inférieurs au seuil pathologique (soit **55,6%** de nos sujets).
- 8 enfants sur 9, soit **88,9%** de nos sujets, présentent des résultats inférieurs à la norme en Mise à jour – versant visuel. Parmi ces 8 enfants, 7 présentent des résultats inférieurs au seuil pathologique (soit **77,8%** de nos sujets).

Partie III
DISCUSSION ET PERSPECTIVES

I. Interprétation des résultats

1. Objectif principal

Notre objectif principal était d'analyser l'implication spécifique des capacités de mémoire de travail (MT) verbale dans la compréhension syntaxique orale ; chez des enfants avec troubles de la cognition mathématique (CM).

Nos résultats aux analyses corrélationnelles (*Tableau 4*) montrent que l'épreuve de compréhension syntaxique (ECOSSE – modalité auditive) est significativement corrélée à l'empan complexe obtenu à la MTVE ($r = -.74$; $.01 < p \leq .05$) ; puis à l'empan simple de chiffres endroit ($r = -.69$; $.01 < p \leq .05$) ; et enfin au nombre de mots rappelés à la MTVE ($r = -.67$; $.01 < p \leq .05$).

Comme nous nous y attendions, l'empan complexe est corrélé au nombre d'erreurs à l'ECOSSE. Notre constat est soutenu par plusieurs études qui indiquent que la compréhension de phrases syntaxiquement complexes² serait corrélée aux capacités de MT mesurées par des empan complexes (*Jakubowicz & Tuller, 2008 ; Montgomery & Evans, 2009*).

De plus, dans notre échantillon, l'empan complexe est plus corrélé que les empan simples à la compréhension syntaxique. Nos résultats rejoignent les conclusions de recherches ayant révélé que les empan complexes étaient plus corrélés que les empan simples à la compréhension syntaxique, notamment concernant les phrases complexes (*Montgomery et al., 2008 ; de Abreu et al., 2011 ; Delage & Frauenfelder, 2012*).

Nos résultats montrent également que parmi les épreuves de MCT verbale, seule la tâche d'empan de chiffres endroit est corrélée au nombre d'erreurs à l'ECOSSE. Nous ne pouvons donc affirmer une corrélation entre les capacités de MCT verbale et la compréhension syntaxique. Ces résultats s'opposent à ceux de Montgomery (2003) qui montrait que les capacités de MCT verbale étaient corrélées à la compréhension de phrases, chez des enfants avec trouble du langage oral.

Ainsi, dans notre étude, les capacités de MT verbale semblent plus corrélées à la compréhension syntaxique que les capacités de MCT verbale.

² Les erreurs de nos sujets à l'ECOSSE ne concernent que les phrases les plus complexes (*ANNEXE IV*)

En revanche, nous ne relevons aucune corrélation significative entre les scores aux tâches de fonctions exécutives (FE) et le nombre d'erreurs à l'ECOSSE. Cette absence de corrélation est inattendue et ne valide pas l'une de nos hypothèses expérimentales. Puisque la MT est corrélée à la compréhension syntaxique, et qu'elle met en jeu les processus exécutifs, nous pensions retrouver des corrélations entre les FE et le nombre d'erreurs à l'ECOSSE. Or, comme nous le détaillerons plus bas, les scores aux tâches de FE dépendent fortement des épreuves choisies.

Toujours pour répondre à notre objectif principal, nous avons réalisé des analyses de régression linéaire afin de mettre en évidence les tâches qui prédiraient les performances en compréhension syntaxique.

Les résultats de nos analyses de régression linéaire simples (Tableaux 5 ; 6 ; 7) montrent que les prédicteurs significatifs du nombre d'erreurs à l'ECOSSE seraient l'empan complexe ($R^2 = .48$; $.01 < p \leq .05$) ; l'empan simple de chiffres endroit ($R^2 = .40$; $.01 < p \leq .05$) ; et le nombre de mots rappelés à la MTVE ($R^2 = .37$; $.01 < p \leq .05$)

Ces résultats valident nos hypothèses expérimentales. Comme nous nous y attendions, la mesure qui prédit le plus les scores en compréhension syntaxique serait l'empan complexe. Nos résultats sont soutenus par les études de Montgomery & Evans (2009) et de Montgomery et al. (2008). En effet, ces auteurs ont montré que les tâches d'empan simples ne prédiraient pas la compréhension syntaxique ; a contrario de l'empan complexe qui présenterait une contribution élevée. Nos résultats rejoignent également les études montrant une implication de la MT verbale dans la compréhension d'énoncés complexes (de Abreu et al., 2011 ; Delage & Frauenfelder, 2012).

Ainsi, dans notre étude, la capacité de la MT verbale, évaluée par la MTVE, est le prédicteur le plus significatif de la compréhension syntaxique orale.

De plus, la MT verbale prédirait la compréhension d'énoncés complexes, plus que la MCT verbale, comme le stipulaient Engel de Abreu et al. (2011).

Concernant les capacités de MCT verbale (Tableau 5), seule la mesure d'empan de chiffres endroit semble être un prédicteur significatif des scores à l'ECOSSE. Les autres mesures de la MCT verbale ne prédiraient pas les performances à l'ECOSSE.

Cependant, les tâches de MCT verbale seraient déjà des doubles tâches (Majerus, 2010). En effet, l'empan « simple » met en jeu des processus attentionnels (Majerus et

al., 2008a ; Majerus et al., 2009), comme le montre l'activation du cortex préfrontal (*Chen & Desmond, 2005*). Les tâches d'empan simples testeraient alors bien plus que la MCT verbale. Dans cette optique, l'empan de chiffres endroit serait une tâche de MT verbale plutôt qu'une tâche de MCT verbale. Nos résultats ne montreraient alors aucune implication de la MCT verbale dans la compréhension syntaxique.

Concernant les capacités exécutives, aucune tâche de FE ne prédit significativement les scores en compréhension syntaxique. Les résultats de cette analyse de régression ne sont pas significatifs (*Tableau 7*). Ces résultats sont inattendus et ne valident pas l'une de nos hypothèses expérimentales. En effet, nous nous attendions à relever une relation prédictive entre les FE et la compréhension syntaxique. Nos résultats ne vont pas dans le sens de l'étude d'Engel de Abreu et al. (*2011*) qui soulignait l'implication de la MT, donc des capacités exécutives, dans la compréhension d'énoncés complexes. Nous supposons que cette absence de significativité est liée au nombre limité de sujets dans notre étude, et à l'analyse peu approfondie des FE. Nos résultats ne sont pas représentatifs de l'état réel du fonctionnement exécutif. Ils reflètent le fonctionnement cognitif à un instant T (*Mazeau & Glasel, 2017*). Le choix des épreuves conditionne aussi les résultats obtenus. Nous reconnaissons que notre évaluation des FE n'est pas aussi approfondie qu'un bilan neuropsychologique. Les résultats de nos sujets aux épreuves de FE sont donc possiblement biaisés par les épreuves choisies.

A propos de l'analyse de régression linéaire multiple, l'empan de chiffres endroit, l'empan complexe et le nombre de mots rappelés à la MTVE prédiraient 56% de la variance du nombre d'erreurs à l'ECOSSE (*Tableau 8*). Mais nous ne supposons que faiblement ce lien prédictif, puisque $p = 0.07$ ($.05 < p \leq .1$). **Notre échantillon réduit ne nous permet donc pas de conclure à une relation prédictive entre ces trois prédicteurs et la compréhension syntaxique.**

Enfin, nous avons vérifié que chez tous nos participants, l'accès lexical (variable contrôlée) se situait dans la norme aux épreuves de Dénomination Rapide Sérielle (EVALEC) et de vérification du vocabulaire de l'ECOSSE. De plus, notre variable contrôlée ne prédit pas significativement les performances en compréhension syntaxique (*Tableau 9*).

Hypothèses explicatives de l'implication de la MT verbale dans la compréhension syntaxique :

Comme nous l'avons explicité dans la partie théorique, la MT permet de stocker temporairement un nombre limité d'informations, tout en effectuant un travail cognitif. Cette capacité à maintenir en mémoire et à traiter des informations semble jouer un rôle central dans la compréhension syntaxique, chez des enfants avec troubles de la CM. Lors de l'écoute d'une phrase, nous sommes en double tâche. En effet, nous devons retenir le début de l'énoncé, tout en continuant d'écouter, et en récupérant en MLT les connaissances nécessaires à la compréhension de la phrase (Gaonac'h & Larigauderie, 2000 ; Boutard, 2015). La MT verbale est donc sollicitée dans la compréhension orale de phrases et de consignes (Mazeau & Pouhet, 2014). La MT verbale est d'autant plus impliquée que la phrase écoutée est longue et complexe (Rigalleau, 2015). Il n'est donc pas étonnant que chez des enfants dyscalculiques, les capacités de la MT verbale soient prédictives des performances en compréhension syntaxique. Nous voyons que les dernières phrases de l'ECOSSE, les plus complexes, sont moins comprises par nos participants (ANNEXE IV). Nous supposons que ces structures complexes constituent une surcharge en MT, comme l'ont montré Jakubowicz et Tuller (2008).

Le fonctionnement de la MT verbale est permis entre autre par la fonction exécutive de mise à jour (MàJ). Cette fonction permet de supprimer de l'espace de stockage les informations non pertinentes. Un défaut de MàJ pourrait expliquer le lien entre la MT verbale et la compréhension syntaxique. En effet, si les enfants maintiennent en MT des informations non pertinentes, cela entraverait les opérations d'intégration dans des tâches de compréhension. Pourtant, dans notre étude, la MàJ n'apparaît pas comme prédictive des performances en compréhension syntaxique. Des recherches futures pourraient évaluer plus exactement la MàJ (tests neuropsychologiques complémentaires à ceux orthophoniques) pour rechercher un lien prédictif avec la compréhension syntaxique, chez des enfants avec troubles de la CM.

Notre étude a permis de montrer, chez 9 enfants dyscalculiques, que la MT verbale, mesurée à l'aide de la MTVE, prédit significativement les scores à l'épreuve de compréhension syntaxique (ECOSSE). L'empan complexe entretiendrait une relation plus prédictive avec la compréhension syntaxique que les empan simples et que les fonctions exécutives. Notre objectif primaire a donc été atteint. Si nos résultats ne sont pas généralisables au-delà du contexte, ils pourraient tout de même être utiles aux

professionnels prenant en charge des enfants avec troubles de la CM. En effet, face à un patient présentant une dyscalculie et des capacités déficitaires en MT verbale, le praticien pourrait suspecter des difficultés en compréhension orale, notamment concernant les phrases syntaxiquement complexes. Les professionnels autour de l'enfant pourront donc veiller à employer des phrases simples, notamment dans les consignes scolaires. Nous pouvons alors nous questionner à propos des types de phrases complexes à éviter avec ces enfants dyscalculiques.

2. Objectif secondaire 1

Notre objectif secondaire 1 était d'analyser les types d'énoncés provoquant une compréhension erronée à l'ECOSSE, chez des enfants avec troubles de la CM.

Les sujets dyscalculiques de notre étude présentent une compréhension correcte des phrases simples, puisqu'une seule erreur non représentative apparaît avant le bloc K. Nos résultats montrent en revanche une compréhension diminuée aux dernières phrases de l'ECOSSE, qui sont les plus complexes (*ANNEXE IV*).

- *Dans un premier temps*, nous avons analysé la compréhension des phrases qualifiées de syntaxiquement complexes selon les critères retenus (*Jakubowicz & Tuller, 2008 ; Delage, 2015*). Comme nous nous y attendions, ces phrases complexes (passives, relatives, pronoms) provoquent le plus d'erreurs chez nos participants (*Figure 4*). Nos résultats sont en adéquation avec le rythme de développement syntaxique. Les énoncés complexes avec déplacement syntaxique impliquent une charge cognitive importante (*Jakubowicz & Tuller, 2008*). Ils sont alors tardivement maîtrisés au cours du développement.

Parmi ces phrases complexes, les phrases relatives engendrent le plus d'erreurs dans notre échantillon (*Figure 4*). Ces résultats confirment en partie notre hypothèse expérimentale. Nous nous attendions à retrouver une compréhension erronée aux phrases relatives, puisqu'elles font partie des plus coûteuses cognitivement (*Kail, 2015*).

Les phrases relatives complexes (bloc W) sont les relatives induisant le plus d'erreurs dans notre étude (*ANNEXE IV*). Nos participants dyscalculiques commettent plus d'erreurs que la norme aux relatives complexes (*Tableau 10*). Parmi leurs 15 erreurs à ce bloc W, 12 concernent les phrases contenant « dans/sur lequel ». Ces résultats pourraient être dus à une gestion difficile de l'espace, en lien avec un défaut de

raisonnement logico-mathématique diagnostiqué chez 6 enfants sur 9 (*ANNEXE I – Tableau 1*). Cependant, le bloc W propose des phrases plus longues (12,75 mots en moyenne) que les autres blocs de phrases relatives (9,92 mots en moyenne). L'effet de longueur serait peut-être responsable des erreurs de compréhension plus nombreuses au bloc W. Des études ultérieures pourraient alors être entreprises pour examiner l'effet de longueur des phrases dans la compréhension syntaxique des enfants dyscalculiques.

Nos sujets dyscalculiques commettent deux fois plus d'erreurs aux phrases relatives en « que » qu'aux relatives en « qui » (*Figure 5*). Ils font plus d'erreurs à ces relatives en « que » par rapport à la norme de l'ECOSSE (*Figure 10*). Les enfants commettent également plus d'erreurs aux relatives objets (27) qu'aux relatives sujets (10) (*Figure 5*). Nos résultats vont dans le sens des études montrant que les propositions relatives sujets – dont font partie les relatives en « qui » – respectent l'ordre canonique SVO. Elles sont maîtrisées vers 4 ans. En revanche, les propositions relatives objets – dont font partie les relatives en « que » – ne respectent pas le schéma canonique du français. Elles sont donc longtemps difficiles à comprendre (*Schelstraete et al., 2011*).

Concernant les phrases relatives en « que », les renversables (T21 et T42) provoquent plus d'erreurs (12/15) que les non renversables (*ANNEXE IV*). Les sujets de notre étude comprennent mieux les non renversables (« La pomme que mange le garçon est verte ») que les renversables (« La vache que le chien poursuit est marron »). En effet, une phrase non renversable fait appel à la sémantique. Dans notre exemple, il est évident de comprendre qu'il s'agit du garçon qui mange la pomme et non l'inverse. Alors que pour la phrase renversable ci-dessus, d'un point de vue qualitatif, les sujets de notre étude désignent le dessin où la vache poursuit le chien. Ils emploient préférentiellement la stratégie d'inversion du sujet/ordre des mots (l'objet devient sujet). Ces résultats pourraient s'expliquer par une persistance de stratégies immatures comme chez les enfants avec TSDLO (*Schelstraete et al., 2011*). Nos observations sont soutenues par des recherches montrant que les énoncés non renversables sont compris vers 3 ans et demi, alors que ceux renversables ne sont pas compris par la plupart des enfants de 9 ans et demi (*Chevrie-Muller & Narbona, 1996*).

La *Figure 5* montre aussi que les sujets commettent plus d'erreurs aux relatives enchâssées (26 erreurs) qu'aux relatives branchées à droite (11 erreurs). Mais cette différence n'est pas représentative puisque l'ECOSSE propose au total 11 énoncés enchâssés et 5 branchés à droite. La comparaison entre les relatives enchâssées et les branchées à droite n'est donc pas exploitable.

Enfin, les propositions relatives de structure OSV provoquent plus d'erreurs que les relatives OVS, qui en provoquent plus que les relatives SVO (*Figure 5*). Mais les différences sont minimales donc faiblement exploitables dans un échantillon de 9 sujets.

Dans notre analyse syntaxique, nous obtenons tout de même des résultats inattendus qui vont à l'encontre de notre hypothèse expérimentale. En effet, nos sujets dyscalculiques présentent peu d'erreurs de compréhension des phrases passives (5,77% des réponses erronées aux phrases complexes) (*Figure 4*). Or, les phrases passives sont syntaxiquement complexes, car elles ne respectent pas l'ordre canonique SVO (*Kail & Fayol, 2015*). Elles seraient cognitivement très coûteuses (*Kail, 2015*). Dans notre étude, le peu d'erreurs aux phrases passives est donc un résultat étonnant. Cependant, l'ECOSSE propose seulement 4 énoncés passifs. Nos résultats concernant ces phrases ne sont donc pas exploitables. Il serait alors intéressant de réaliser des études supplémentaires axées sur la compréhension des phrases passives chez les enfants dyscalculiques.

- *Dans un second temps*, nous avons analysé la compréhension des phrases caractérisées de non complexes selon les critères de complexité syntaxique retenus. Les enfants de notre étude commettent le plus d'erreurs aux phrases avec **adjectifs ordinaux** (bloc V ; 16 erreurs) (*Figure 6*).

Par rapport à l'étalonnage de l'ECOSSE, nos sujets dyscalculiques font plus d'erreurs que la norme aux phrases avec adjectifs ordinaux V12 et V21 (*Tableau 11*). Ces deux phrases contiennent comme adjectifs ordinaux « la deuxième » et « la troisième ». Leur compréhension implique donc des capacités de comptage, de numération, de classification et « d'ordre sériel ». Or, ces habiletés peuvent être altérées, selon la symptomatologie des troubles de la cognition mathématique (*American Psychiatric Association, 2013 ; Geary et al., 2004 ; Ménissier, 2014 ; Attout & Majerus, 2017*). Les pourcentages élevés d'erreurs à ces phrases pourraient donc être expliqués par les troubles de la CM. La phrase V12 est par ailleurs la plus échouée dans notre étude (*ANNEXE IV*). D'un point de vue qualitatif, les erreurs à la phrase V12 semblent dues à un dessin ambigu (22,2% des réponses) et à un mauvais comptage (33,3% des réponses). Concernant la phrase V21, les erreurs semblent également dues à un mauvais comptage : les enfants montrent à 66,7% la deuxième tasse plutôt que la troisième. Ces réponses atypiques semblent donc liées aux troubles de la CM.

Nos sujets dyscalculiques commettent également plus d'erreurs, par rapport à la norme, à la phrase superlative inférieure Q21 (*Tableau 11*). Cette phrase met en jeu

l'estimation et la comparaison de taille (« la moins grande »). De ce fait, les erreurs peuvent aussi être dues aux troubles de la CM.

En résumé, chez 9 enfants avec troubles de la CM, les énoncés provoquant le plus d'erreurs de compréhension, par rapport à la norme, sont : les phrases avec adjectifs ordinaux (« le deuxième/la troisième ») ; les phrases relatives complexes (« dans/sur lequel ») ; les phrases relatives en « que » renversables.

Notre objectif de départ, qui était d'examiner les phrases dont la compréhension était diminuée chez des enfants dyscalculiques, est donc atteint. Nous constatons, comme nous le supposions, que ces enfants sont sensibles à la complexité syntaxique, notamment concernant les phrases relatives.

Nos résultats pourraient servir aux personnes en contact avec des enfants dyscalculiques, que ce soient des orthophonistes, des professeurs ou des parents. En effet, avec un enfant dyscalculique de 8-11 ans, il semble préférable d'employer des relatives en « qui », respectant l'ordre SVO, plutôt que des relatives en « que ».

Hypothèses explicatives des erreurs de compréhension aux phrases complexes :

La maîtrise tardive des énoncés complexes serait en lien avec le développement des capacités de MT (*Jakubowicz, 2011 ; Rigalleau, 2015*). En effet, les phrases complexes représentent une surcharge en MT (*Jakubowicz & Tuller, 2008*), ce qui expliquerait leur compréhension altérée. La MT intervient pour identifier le schéma canonique SVO (*Kail, 2015*). Les phrases relatives OSV sollicitent fortement la MT (*Gibson, 1998*). Face à la phrase T21 provoquant un nombre d'erreurs élevé (« La vache que le chien poursuit est marron »), l'enfant doit maintenir en mémoire les premiers mots et transformer la structure syntaxique. Mais la difficulté réside dans le fait que le nom de tête (« la vache ») n'est pas le sujet de la relative mais l'objet. L'enfant doit alors établir les liens entre les constituants de la phrase qui sont éloignés (*Gabriel & Urbain, 2012*). Toutes ces opérations mentales mettent fortement en jeu la MT, qui peut être surchargée. Les erreurs de compréhension peuvent alors apparaître.

De plus, nous avons conscience que les résultats à l'ECOSSE peuvent être biaisés par la fatigabilité des sujets. En effet, il s'agit d'une épreuve longue et cognitivement coûteuse. Nous avons donc choisi de l'administrer sur un deuxième jour de passation. Nous ne pouvons écarter l'hypothèse d'un effet de fatigabilité sur les réponses erronées aux dernières phrases de l'ECOSSE. Mais nous avons tenu compte de l'attention soutenue chez nos sujets (*ANNEXE III – Tableau 2*). Nous avons constaté que 7 enfants

sur 9, soit 77,78% des participants, étaient capables de rester concentrés sur la tâche sans être sujets à la distractibilité.

3. Objectif secondaire 2

Notre objectif secondaire 2 était d'identifier les fonctions exécutives altérées chez des enfants avec troubles de la CM. Comme nous le supposions, nos résultats montrent un dysfonctionnement exécutif. Notre hypothèse expérimentale est en partie validée.

La Mise à jour – versant visuel – serait la FE la plus altérée chez les enfants dyscalculiques de notre étude. En effet, 7 enfants sur 9, soit **77,8%** de nos sujets, présentent des scores déficitaires à l'épreuve de MàJ versant visuel (*Tableau 12*).

La Mise à jour – versant auditif – serait la deuxième FE la plus altérée. En effet, 5 enfants sur 9, soit **55,6%** de nos sujets, présentent des résultats inférieurs au seuil pathologique à cette épreuve (*Tableau 12*).

La fonction de Mise à jour semble donc être la FE la plus déficitaire chez nos sujets dyscalculiques. Nos résultats sont soutenus par certaines études montrant le déficit d'une ou plusieurs FE chez les enfants dyscalculiques (*Swanson et al., 2008 ; Swanson & Sachse-Lee, 2001*).

Cependant, aucun sujet ne présente de score déficitaire à l'épreuve d'Inhibition. Ces résultats sont inattendus et ne confirment pas notre hypothèse. Ils ne rejoignent pas les études qui ont mis en évidence une défaillance des processus inhibiteurs chez les enfants dyscalculiques (*Passolunghi & Siegel, 2001 ; Passolunghi, 2012 ; Geary, 2003 ; Geary, 2010*). Il en va de même pour la fonction de Flexibilité mentale qui serait déficitaire chez seulement un enfant de notre étude. Or, selon les recherches précédentes, la perturbation de la Flexibilité mentale serait à l'origine des résultats déficitaires aux tâches de MT, tout comme la perturbation des mécanismes inhibiteurs (*Swanson et al., 2008*). Toutefois, nous reconnaissons que notre évaluation des FE est moins approfondie qu'un bilan neuropsychologique. Il s'agit d'une limite de notre étude. N'étant pas neuropsychologues, nous avons préféré utiliser un outil destiné aux orthophonistes. Face au manque de tâches de FE adaptées aux enfants avec troubles de la CM, nous avons choisi l'outil informatisé de Boutard et Gatignol. Ce protocole propose une évaluation de première intention des FE en lien avec l'AC, réalisable par les orthophonistes. Cette limite de l'étude présente l'avantage qu'aucun des participants n'avait déjà effectué le protocole d'évaluation de la

MT de Boutard et Gagnol. De ce fait, les tâches étaient nouvelles pour eux, donc le fonctionnement exécutif maximal (*Miyake et al., 2000*).

Hypothèses explicatives du dysfonctionnement de la Mise à Jour :

Le dysfonctionnement de la MàJ pourrait provoquer des intrusions et persévérations aux tâches d'empan (*De Beni et Palladino, 2000*). En effet, la fonction de MàJ, comme nous l'avons explicité plus haut, permet d'éliminer les données inutiles en MT pour libérer l'espace de stockage. Quand la MàJ ne s'effectue pas correctement, des items non pertinents sont maintenus à tort en MT et restitués de façon inadéquate. Les intrusions suivantes pourraient alors être produites à la MTVE : mots cibles des séries précédentes, mots de la phrase amorcée, mots non présents dans l'épreuve. Dans notre étude, parmi les intrusions totales, 7/14, soit **50%**, sont des mots cibles d'une série précédente (*ANNEXE III – Tableau 2*). Ces intrusions pourraient être dues à un défaut de suppression des éléments non pertinents. Des études ultérieures pourraient donc analyser le lien entre les capacités de MàJ et le nombre d'intrusions et de persévérations aux différentes épreuves mnésiques, chez des enfants dyscalculiques

Ainsi, notre étude a mis en évidence un défaut de réactualisation des informations en MT. Or, les processus exécutifs étant difficiles à évaluer, nous avons conscience qu'un score déficitaire à une tâche exécutive ne signifie pas forcément un dysfonctionnement exécutif (*Miyake et al., 2000*). Ce score n'est que le reflet à un instant T, et selon une épreuve choisie, du fonctionnement exécutif. Donc nous n'affirmons pas avec certitude le déficit de Mise à jour.

Nos résultats permettent cependant d'élargir la recherche sur l'implication des FE dans les troubles de la CM, domaine peu étudié. Pourtant, la Mise à jour est impliquée dans la cognition mathématique (*Van der Sluis et al., 2007*). Si cette fonction de réactualisation dysfonctionne, des erreurs mathématiques pourraient s'expliquer et se comprendre. Par exemple, face à un problème mathématique nouveau, les enfants pourraient garder en MT les données du problème précédent. De ce fait, les erreurs correspondant à des persévérations ne seraient pas étonnantes. Face à un problème mathématique additif, ces enfants pourraient effectuer une multiplication si le problème précédent était multiplicatif. De même, ils pourraient réaliser les calculs avec les données chiffrées du problème précédent.

Pour résumer notre discussion, chez 9 enfants avec troubles de la cognition mathématique, âgés de 8 ans 11 mois à 10 ans 9 mois, nous avons montré les résultats marquants suivants :

- *La capacité de la MT verbale, mesurée par la MTVE, est le prédicteur le plus significatif de la compréhension syntaxique orale de phrases complexes.*
- *La compréhension est altérée par rapport à la norme pour les phrases avec adjectifs ordinaux (« le deuxième/la troisième ») ; les phrases relatives complexes (« dans/sur lequel ») ; les phrases relatives en « que » renversables.*
- *La fonction exécutive de Mise à jour est la plus déficitaire, surtout en modalité visuelle.*

Toutefois, nous avons conscience de certaines limites de notre étude. Tout d'abord, les **conditions d'expérimentation** ont pu avoir un impact sur nos résultats. En effet, les passations se sont déroulées sur des jours sans école, et dans des lieux calmes et familiers. De ce fait, les scores obtenus ne reflètent probablement pas les performances de la vie quotidienne. Dans un environnement contenant des distracteurs et des événements imprévisibles, les enfants seraient moins disponibles cognitivement et obtiendraient des résultats différents à nos épreuves.

De plus, notre étude s'est réalisée sur un total de **9 sujets**, ce qui ne permet pas une généralisation des résultats. En effet, nos résultats reflètent le fonctionnement cognitif dans un contexte précis, à un instant T, à des épreuves données. Donc nous ne pouvons ni généraliser ni affirmer l'existence d'un déficit. Il faut plus d'une passation pour comprendre le fonctionnement d'un enfant (Mazeau & Glasel, 2017). Ainsi, les relations causales observées dans cet échantillon ne peuvent pas être généralisables au-delà du contexte. Cependant, la taille réduite de l'échantillon nous a permis de procéder à une analyse plus qualitative et détaillée des résultats.

Nous avons également conscience du biais concernant la **méthode de recrutement** des sujets. En effet, les 9 enfants de l'étude ont été diagnostiqués de dyscalculiques par des orthophonistes et des outils d'évaluation différents. Cependant, les troubles de la CM étant très hétérogènes dans leurs manifestations cliniques (Noël et coll., 2013), il est difficile de trouver une population homogène. De plus, ce qui importait dans nos critères d'inclusion était le diagnostic de dyscalculie (DC) posé selon les critères du DSM-5 qui

est la référence internationale (*American Psychiatric Association, 2013*). Nous avons donc choisi d'accepter tous les types de DC.

Toujours concernant la méthode de recrutement, il faut normalement éliminer la suspicion de déficience intellectuelle afin de diagnostiquer une DC (*Mazeau & Glasel, 2017*). Or, dans notre échantillon, 5 enfants sur 9 n'avaient pas réalisé de bilan neuropsychologique (*ANNEXE I – Tableau 6*). L'absence d'évaluation psychométrique n'a pas été choisie comme critère de non inclusion dans notre recherche, car nous voulions considérer tous les milieux socio-culturels. Nous relevons tout de même la nécessité d'évaluer les processus cognitifs sous-jacents avant toute PEC orthophonique. Cette évaluation permettrait d'éviter les erreurs de diagnostics (*Mazeau & Pouhet, 2014*).

Concernant l'épreuve de **MTVE**, bien qu'elle ne soit pas la plus probante pour tester la MT, nous l'avons choisie car elle semble être la plus adaptée aux enfants dyscalculiques. La mesure la plus fiable de la MT serait l'épreuve de counting span (*Conway et al., 2005*). Mais cette tâche met en jeu des habiletés arithmétiques puisque le sujet doit dénombrer des points (*Case et al., 1982*). L'épreuve de counting span semblait donc inadaptée à notre échantillon. Il en va de même concernant les tâches d'empan complexes proposées dans le protocole d'évaluation « Mémoire de travail » (*Boutard & Gatignol, 2015*). En effet, les empan complexes de ce protocole requièrent des habiletés faisant défaut aux sujets de notre étude, comme la conscience de la rime (biais pour nos sujets dyslexiques), la catégorisation et la sériation (biais pour nos sujets dyscalculiques).

II. Perspectives

Au vue des limites de notre recherche, des études ultérieures sont à envisager.

Tout d'abord, nous pourrions reproduire cette expérience à **plus grande échelle** afin d'espérer obtenir des résultats plus significatifs aux analyses statistiques. Ces travaux supplémentaires pourraient considérer, dans les critères d'inclusion, une évaluation neuropsychologique plus approfondie des **fonctions exécutives**. Ces recherches pourraient notamment tester plus en détail la fonction d'Inhibition, qui n'a été évaluée qu'en modalité visuelle dans notre étude.

En cherchant des tâches pour tester les **capacités mnésiques** de nos sujets, nous avons relevé le manque d'épreuves adaptées aux enfants avec troubles de la cognition mathématique (CM). Ce constat rejoint les propos de Fayol (2017) qui témoignait du peu d'épreuves existantes pour tester les FE et la MT chez l'enfant. Des études futures pourraient alors être envisageables afin de développer des épreuves pour évaluer la MT verbale et la MCT verbale chez les enfants dyscalculiques.

Concernant l'évaluation de la MCT verbale, l'empan de chiffres endroit est la tâche la plus administrée en clinique en raison du peu de matériel normé pour tester la MCT verbale (Boutard, 2015). Or, cette épreuve met en jeu des données chiffrées. Elle semble donc peu adaptée aux enfants avec troubles de la CM. De plus, les outils permettant d'évaluer le rappel de l'information « ordre sériel » semblent également peu adaptés à une population d'enfants dyscalculiques. La tâche proposée par S. Majerus pour les enfants à partir de 7 ans est constituée de chiffres à remettre en ordre. L'auteur précise lui-même que cette tâche est applicable quand la chaîne numérique est acquise et automatisée. Et l'épreuve de la « Course des animaux », permettant aussi d'évaluer l'ordre sériel, n'est étalonnée que jusqu'à 7 ans. C'est pourquoi nous avons peu étudié le traitement de l'ordre sériel dans notre recherche. Des études futures pourraient s'intéresser à l'étalonnage de l'épreuve la « Course des animaux » chez des enfants plus âgés. Des recherches ultérieures pourraient également avoir pour objectif d'élaborer des épreuves de MCT verbale et de MT verbale ne sollicitant pas d'habiletés numériques ; afin qu'elles soient adaptées à des enfants dyscalculiques.

Enfin, notre étude s'est intéressée à la compréhension syntaxique d'enfants avec troubles de la cognition mathématique, mais qu'en est-il de leur production syntaxique ? Des études futures pourraient donc approfondir ce domaine, en analysant la syntaxe en production.

CONCLUSION

Notre objectif principal était d'analyser, chez des enfants avec troubles de la cognition mathématique, la part d'implication des capacités de mémoire de travail verbale dans la compréhension syntaxique orale.

Chez 9 enfants dyscalculiques âgés de 8 ans 11 mois à 10 ans 9 mois, les données recueillies montrent que la mémoire de travail verbale, évaluée par la MTVE, est le prédicteur le plus significatif de la compréhension syntaxique orale de phrases complexes. L'empan simple de chiffres endroit apparaît également comme prédicteur, mais de façon moins significative que l'épreuve de mémoire de travail.

De plus, notre étude s'est intéressée aux phrases provoquant le plus d'erreurs de compréhension. Dans notre échantillon d'enfants avec troubles de la cognition mathématique, nos résultats ont montré que la compréhension est altérée par rapport à la norme pour les phrases avec adjectifs ordinaux (« le deuxième/la troisième ») ; les phrases relatives complexes (« dans/sur lequel ») ; les phrases relatives en « que » renversables.

Enfin, notre recherche avait également pour objectif d'identifier les fonctions exécutives les plus altérées chez des enfants dyscalculiques. Nos résultats ont mis en évidence que la fonction exécutive de Mise à jour est la plus déficitaire, surtout en modalité visuelle.

Nos résultats permettent donc d'ouvrir des perspectives de recherche dans le domaine peu étudié des troubles de la cognition mathématique, notamment concernant les performances syntaxiques des sujets dyscalculiques.

Des recherches futures pourraient être entreprises, à plus grande échelle, afin d'évaluer de manière plus approfondie les fonctions exécutives chez les enfants dyscalculiques, ainsi que l'implication des processus exécutifs dans la compréhension syntaxique. La production syntaxique pourrait également être étudiée dans cette population.

Pour finir, il serait intéressant de développer des outils d'évaluation de la mémoire à court terme verbale et de la mémoire de travail verbale, adaptés aux enfants avec troubles de la cognition mathématique.

BIBLIOGRAPHIE

Alloway, T. P., & Alloway, R. G. (2010). Investigating the predictive roles of working memory and IQ in academic attainment. *Journal of experimental child psychology*, 106(1), 20-29.

Alloway, T. P., Gathercole, S. E., Adams, A. M., & Willis, C. (2005). Working memory abilities in children with special educational needs. *Educational and Child Psychology*, 22(4), 56-67.

American Psychiatric Association. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders (DSM-5®)*. American Psychiatric Pub.

Archibald, L. M., & Gathercole, S. E. (2007). Nonword repetition in specific language impairment: More than a phonological short-term memory deficit. *Psychonomic bulletin & review*, 14(5), 919-924.

Atkinson, R. C., & Shiffrin, R. M. (1968). Human memory: A proposed system and its control processes1. In *Psychology of learning and motivation* (Vol. 2, pp. 89-195). Academic Press.

Attout, L., & Majerus, S. (2017). Serial order working memory and numerical ordinal processing share common processes and predict arithmetic abilities. *British Journal of Developmental Psychology*.

Attout, L., Van der Kaa, M. A., George, M., & Majerus, S. (2012). Dissociating short-term memory and language impairment: The importance of item and serial order information. *Aphasiology*, 26(3-4), 355-382.

Baddeley, A. (1986). Oxford psychology series, No. 11. Working memory.

Baddeley, A. (1992). Working memory. *Science*, 255(5044), 556-559.

Baddeley, A. (2000). The episodic buffer: a new component of working memory?. *Trends in cognitive sciences*, 4(11), 417-423.

Baddeley, A. (2003a). Working memory: looking back and looking forward. *Nature reviews neuroscience*, 4(10), 829.

Baddeley, A. (2003b). Working memory and language: An overview. *Journal of communication disorders*, 36(3), 189-208.

Baddeley, A. D., & Hitch, G. (1974). Working memory. In *Psychology of learning and motivation* (Vol. 8, pp. 47-89). Academic press.

Barrouillet, P., & Camos, V. (2006). *La cognition mathématique chez l'enfant*. Solal.

Barrouillet, P., & Camos, V. (2007). Le développement de la mémoire de travail. *Psychologie du développement et de l'éducation*, 51-86.

Barrouillet, P., & Camos, V. (2017). Mémoires et cognition mathématique. *Rééducation orthophonique – N°269 – Mars 2017*

- Barrouillet, P., & Lépine, R. (2005). Working memory and children's use of retrieval to solve addition problems. *Journal of Experimental Child Psychology*, 91(3), 183-204.
- Barrouillet, P., Billard, C., De Agostini, M., Démonet, J. F., Fayol, M., Gombert, J. E., ... & Valdois, S. (2007). *Dyslexie, dysorthographe, dyscalculie: bilan des données scientifiques* (Doctoral dissertation, Institut national de la santé et de la recherche médicale (INSERM)).
- Boutard, C. (2015). Evaluation de la mémoire de travail chez l'enfant : objectifs et procédures. In : *Rencontres d'orthophonie (15: 2015: Paris)*, Gatignol, P., Joyeux, N., Union nationale pour le développement de la recherche et de l'évaluation en orthophonie (France), & Fédération nationale des orthophonistes (France). (2002). *Mémoire de travail*. Ortho-Editions.
- Boutard C, Gatignol P. (2015). *Mémoire de Travail*. Isbergues : Ortho-Edition.
- Brun, V., George-Poracchia, F., Habib, M., & Noël, M. P. (2011). *Calcul et dyscalculies: Des modèles à la rééducation* (Vol. 28). Elsevier Masson.).
- Bull, R., Espy, K. A., & Wiebe, S. A. (2008). Short-term memory, working memory, and executive functioning in preschoolers: Longitudinal predictors of mathematical achievement at age 7 years. *Developmental neuropsychology*, 33(3), 205-228.
- Butterworth, B. (2005). The development of arithmetical abilities. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 46(1), 3-18.
- Case, R., Kurland, D. M., & Goldberg, J. (1982). Operational efficiency and the growth of short-term memory span. *Journal of experimental child psychology*, 33(3), 386-404.
- Chan, R. C., Shum, D., Touloupoulou, T., & Chen, E. Y. (2008). Assessment of executive functions: Review of instruments and identification of critical issues. *Archives of clinical neuropsychology*, 23(2), 201-216.
- Chen, S. A., & Desmond, J. E. (2005). Temporal dynamics of cerebro-cerebellar network recruitment during a cognitive task. *Neuropsychologia*, 43(9), 1227-1237.
- Chevrie-Muller, C., & Narbona, J. (1996). *Le langage de l'enfant: aspects normaux et pathologiques* (Vol. 2). Masson.
- Chomsky, *Aspects of the Theory of Syntax*, Cambridge, MIT Press, 1965.
- Coleman, B. (2005). Mathematical cognition and working memory. *Handbook of mathematical cognition*, 361.
- Collette, F., & Van der Linden, M. (2002). Brain imaging of the central executive component of working memory. *Neuroscience & Biobehavioral Reviews*, 26(2), 105-125.
- Conway, A. R., Kane, M. J., Bunting, M. F., Hambrick, D. Z., Wilhelm, O., & Engle, R. W. (2005). Working memory span tasks: A methodological review and user's guide. *Psychonomic bulletin & review*, 12(5), 769-786.

BIBLIOGRAPHIE

- Cornoldi, C., Giofre, D., Orsini, A., & Pezzuti, L. (2014). Differences in the intellectual profile of children with intellectual vs. learning disability. *Research in Developmental Disabilities, 35*(9), 2224-2230.
- Cowan, N. (2008). What are the differences between long-term, short-term, and working memory?. *Progress in brain research, 169*, 323-338.
- D'Amico, A., & Guarnera, M. (2005). Exploring working memory in children with low arithmetical achievement. *Learning and Individual Differences, 15*(3), 189-202.
- de Abreu, P. M. J. E., Gathercole, S. E., & Martin, R. (2011). Disentangling the relationship between working memory and language: The roles of short-term storage and cognitive control. *Learning and Individual Differences, 21*(5), 569-574.
- De Beni, R., & Palladino, P. (2000). Intrusion errors in working memory tasks: Are they related to reading comprehension ability?. *Learning and individual differences, 12*(2), 131-143.
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition, 44*(1-2), 1-42.
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive neuropsychology, 20*(3-6), 487-506.
- Delage, H. (2008). *Évolution de l'hétérogénéité linguistique chez les enfants sourds moyens et légers: Étude de la complexité morphosyntaxique* (Doctoral dissertation, Université François Rabelais-Tours).
- Delage, H. (2015). Mémoire de travail et syntaxe dans le Trouble Spécifique du Développement du Langage : Quelle relation ? In : *Rencontres d'orthophonie (15: 2015: Paris)*, Gatignol, P., Joyeux, N., Union nationale pour le développement de la recherche et de l'évaluation en orthophonie (France), & Fédération nationale des orthophonistes (France). (2002). *Mémoire de travail*. Ortho-Editions.
- Delage, H., & Frauenfelder, U. (2012). Développement de la mémoire de travail et traitement des phrases complexes: Quelle relation?. In *SHS Web of Conferences* (Vol. 1, pp. 1555-1573). EDP Sciences.
- Delage, H., & Tuller, L. (2007). Language development and mild-to-moderate hearing loss: Does language normalize with age?. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 50*(5), 1300-1313.
- Fayol M. (2017). L'apport des recherches longitudinales à la cognition arithmétique. *Rééducation orthophonique – N°269 – Mars 2017*
- Fayol, M. (2012). *L'acquisition du nombre : «Que sais-je?» n° 3941*. Presses universitaires de France.
- Friedman, N. P., & Miyake, A. (2004). The relations among inhibition and interference control functions: a latent-variable analysis. *Journal of experimental psychology: General, 133*(1), 101.

BIBLIOGRAPHIE

- Gabriel, A., & Urbain, C. (2012). Implication des mécanismes d'apprentissage de régularités dans l'acquisition du langage chez l'enfant sain et dysphasique. In : *Les dysphasies: de l'évaluation à la rééducation (2012)*, Maillart, C., & Schelstraete, M. A.
- Gaonac'h, D., & Larigauderie, P. (2000). *Mémoire et fonctionnement cognitif: la mémoire de travail*. A. Colin.
- Gathercole, S. E. (2006). Nonword repetition and word learning: The nature of the relationship. *Applied Psycholinguistics*, 27(4), 513-543.
- Gathercole, S. E., & Alloway, T. P. (2006). Practitioner review: Short-term and working memory impairments in neurodevelopmental disorders: Diagnosis and remedial support. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 47(1), 4-15.
- Gathercole, S. E., Alloway, T. P., Willis, C., & Adams, A. M. (2006). Working memory in children with reading disabilities. *Journal of experimental child psychology*, 93(3), 265-281.
- Gathercole, S. E., Brown, L., & Pickering, S. J. (2003). Working memory assessments at school entry as longitudinal predictors of National Curriculum attainment levels. *Educational and Child Psychology*, 20(3), 109-122.
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Ambridge, B., & Wearing, H. (2004a). The structure of working memory from 4 to 15 years of age. *Developmental psychology*, 40(2), 177.
- Gathercole, S. E., Pickering, S. J., Knight, C., & Stegmann, Z. (2004b). Working memory skills and educational attainment: Evidence from national curriculum assessments at 7 and 14 years of age. *Applied Cognitive Psychology*, 18(1), 1-16.
- Geary, D. C. (2003). Learning disabilities in arithmetic: Problem-solving differences and cognitive deficits. *Handbook of learning disabilities*, 199-212.
- Geary, D. C. (2010). Mathematical disabilities: Reflections on cognitive, neuropsychological, and genetic components. *Learning and individual differences*, 20(2), 130-133.
- Geary, D. C., Hoard, M. K., & Bailey, D. H. (2012a). Fact retrieval deficits in low achieving children and children with mathematical learning disability. *Journal of Learning Disabilities*, 45(4), 291-307.
- Geary, D. C., Hoard, M. K., Byrd-Craven, J., & DeSoto, M. C. (2004). Strategy choices in simple and complex addition: Contributions of working memory and counting knowledge for children with mathematical disability. *Journal of experimental child psychology*, 88(2), 121-151.
- Geary, D. C., Hoard, M. K., Byrd-Craven, J., Nugent, L., & Numtee, C. (2007). Cognitive mechanisms underlying achievement deficits in children with mathematical learning disability. *Child development*, 78(4), 1343-1359.
- Geary, D. C., Hoard, M. K., Nugent, L., & Bailey, D. H. (2012b). Mathematical cognition deficits in children with learning disabilities and persistent low achievement: A five-year prospective study. *Journal of educational psychology*, 104(1), 206.

BIBLIOGRAPHIE

- Gibson, E. (1998). Linguistic complexity: Locality of syntactic dependencies. *Cognition*, 68(1), 1-76.
- Gigleux, M., Renard, A. (2015). Evaluation de la mémoire à court terme auditivo-verbale dans les aphasies primaires progressives. In : *Rencontres d'orthophonie (15: 2015: Paris)*, Gagnon, P., Joyeux, N., Union nationale pour le développement de la recherche et de l'évaluation en orthophonie (France), & Fédération nationale des orthophonistes (France). (2002). *Mémoire de travail*. Ortho-Editions.
- Gross-Tsur, V., Manor, O., & Shalev, R. S. (1996). Developmental dyscalculia: Prevalence and demographic features. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 38(1), 25-33.
- Hansson, K., Sahlén, B., & Mäki-Torkko, E. (2007). Can a 'single hit' cause limitations in language development? A comparative study of Swedish children with hearing impairment and children with specific language impairment. *International Journal of Language & Communication Disorders*, 42(3), 307-323.
- Holmes, J., Gathercole, S. E., & Dunning, D. L. (2009). Adaptive training leads to sustained enhancement of poor working memory in children. *Developmental science*, 12(4).
- Jacquier-Roux, M., Lequette, C., Pouget, G., Valdois, S., & Zorman, M. (2010). BALE: batterie analytique du langage écrit. *Grenoble: Laboratoire Cogni-Sciences*.
- Jakubowicz, C. (2007). Grammaire universelle et trouble spécifique du langage. In: *Bricmont, J., Franck, J. (Eds.), Noam Chomsky. Les Editions de l'Herne, Paris, pp. 164-175*.
- Jakubowicz, C. (2011). Measuring derivational complexity: New evidence from typically developing and SLI learners of L1 French. *Lingua*, 121(3), 339-351.
- Jakubowicz, C., & Tuller, L. (2008). Specific language impairment in French. *Studies in French applied linguistics*, 97-133.
- Jordan, K. E., & Baker, J. (2011). Multisensory information boosts numerical matching abilities in young children. *Developmental Science*, 14(2), 205-213.
- Kaïl, M. (2015). *L'acquisition du langage: «Que sais-je?» n° 3939*. Presses Universitaires de France.
- Kail, M., & Fayol, M. (2015). *L'acquisition du langage. Volume II: Le langage en développement. Au-delà de 3 ans*. Presses Universitaires de France.
- Kane, M. J., Brown, L. H., McVay, J. C., Silvia, P. J., Myin-Germeys, I., & Kwapil, T. R. (2007). For whom the mind wanders, and when: An experience-sampling study of working memory and executive control in daily life. *Psychological science*, 18(7), 614-621.
- Koechlin, E., & Summerfield, C. (2007). An information theoretical approach to prefrontal executive function. *Trends in cognitive sciences*, 11(6), 229-235.
- Kosc, L. (1974). Developmental dyscalculia. *Journal of learning disabilities*, 7(3), 164-177.

BIBLIOGRAPHIE

Kucian, K., Loenneker, T., Dietrich, T., Dosch, M., Martin, E., & Von Aster, M. (2006). Impaired neural networks for approximate calculation in dyscalculic children: a functional MRI study. *Behavioral and Brain Functions*, 2(1), 31.

Lafay, A. (2016). *Déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale* (Doctoral dissertation, Université Laval).

Landerl, K., Bevan, A., & Butterworth, B. (2004). Developmental dyscalculia and basic numerical capacities: A study of 8–9-year-old students. *Cognition*, 93(2), 99-125.

Lecocq, P. (1996). *L'É. CO. S. SE: une épreuve de compréhension syntaxico-sémantique*. Presses Univ. Septentrion.

Lévy, R., & Volle, E. (2007). Anatomie fonctionnelle du cortex préfrontal pour la mémoire de travail. *Neuropsychologie de la mémoire de travail*, 35-53.

Maehler, C., & Schuchardt, K. (2016). The importance of working memory for school achievement in primary school children with intellectual or learning disabilities. *Research in developmental disabilities*, 58, 1-8.

Majerus, S. (2008a). La mémoire verbale à court terme: un simple produit des interactions entre systèmes langagiers, attentionnels et de traitement de l'ordre sériel?. *Psychologie française*, 53(3), 327-341.

Majerus, S. (2008b). 12 Verbal short-term memory and temporary activation of language representations: The importance of distinguishing item and order information. *Interactions between short-term and long-term memory in the verbal domain*, 244.

Majerus, S. (2010). Les multiples déterminants de la mémoire à court terme verbale: Implications théoriques et évaluatives. *Développements*, (1), 5-15.

Majerus, S. (2012). L'évaluation de la mémoire à court terme. *Traité de neuropsychologie clinique*. 2ème éd. Marseille: Solal.

Majerus, S. (2013). Language repetition and short-term memory: an integrative framework. *Frontiers in human neuroscience*, 7, 357.

Majerus, S., & Linden, M. (2003). Long-term memory effects on verbal short-term memory: A replication study. *British Journal of Developmental Psychology*, 21(2), 303-310.

Majerus, S., Belayachi, S., De Smedt, B., Leclercq, A. L., Martinez, T., Schmidt, C., ... & Maquet, P. (2008a). Neural networks for short-term memory for order differentiate high and low proficiency bilinguals. *Neuroimage*, 42(4), 1698-1713.

Majerus, S., Heiligenstein, L., Gautherot, N., Poncelet, M., & Van der Linden, M. (2009). Impact of auditory selective attention on verbal short-term memory and vocabulary development. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(1), 66-86.

Majerus, S., Poncelet, M., Greffe, C., & Van der Linden, M. (2006). Relations between vocabulary development and verbal short-term memory: The relative importance of short-term memory for serial order and item information. *Journal of Experimental Child Psychology*, 93(2), 95-119.

- Majerus, S., Poncelet, M., Van der Linden, M., & Weekes, B. S. (2008b). Lexical learning in bilingual adults: The relative importance of short-term memory for serial order and phonological knowledge. *Cognition*, *107*(2), 395-419.
- Mazeau, M. (2017). Du logico-mathématique aux dyscalculies : quelles implications pratiques ? *Rééducation orthophonique – N°270 – Juin 2017*
- Mazeau, M., & Glasel, H. (2017). *Conduite du bilan neuropsychologique chez l'enfant*. Elsevier Health Sciences.
- Mazeau, M., & Pouhet, A. (2014). *Neuropsychologie et troubles des apprentissages chez l'enfant: du développement typique aux dys*. Elsevier Masson.
- Mazzocco, M. M., & Kover, S. T. (2007). A longitudinal assessment of executive function skills and their association with math performance. *Child neuropsychology*, *13*(1), 18-45.
- Ménissier, A. (2014). Du glissement de l'appellation logico-mathématique à celle de cognition mathématique : quelles incidences sur la prise en charge des troubles ? *Actes des Entretiens de Bichat, 151-171, Paris, Europa Digital & Publishing*.
- Michels, L., O'Gorman, R., & Kucian, K. (2017). Functional hyperconnectivity vanishes in children with developmental dyscalculia after numerical intervention. *Developmental cognitive neuroscience*.
- Miyake, A., & Friedman, N. P. (2012). The nature and organization of individual differences in executive functions: Four general conclusions. *Current directions in psychological science*, *21*(1), 8-14.
- Miyake, A., & Shah, P. (Eds.). (1999). *Models of working memory: Mechanisms of active maintenance and executive control*. Cambridge University Press.
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The unity and diversity of executive functions and their contributions to complex "frontal lobe" tasks: A latent variable analysis. *Cognitive psychology*, *41*(1), 49-100.
- Montgomery, J. W. (2004). Sentence comprehension in children with specific language impairment: Effects of input rate and phonological working memory. *International Journal of Language & Communication Disorders*, *39*(1), 115-133.
- Montgomery, J. W., & Evans, J. L. (2009). Complex sentence comprehension and working memory in children with specific language impairment. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *52*(2), 269-288.
- Montgomery, J. W., Magimairaj, B. M., & O'Malley, M. H. (2008). Role of working memory in typically developing children's complex sentence comprehension. *Journal of psycholinguistic research*, *37*(5), 331-354.
- Moreau, M. L., & Richelle, M. (1997). *L'acquisition du langage* (Vol. 108). Editions Mardaga.

BIBLIOGRAPHIE

- Mousty, P., Leybaert, J., Alegria, J., Content, A., & Morais, J. (1994). 9. *BELEC* (pp. 127-145). De Boeck Supérieur.
- Nairne, J. S., & Kelley, M. R. (2004). Separating item and order information through process dissociation. *Journal of Memory and Language*, 50(2), 113-133.
- Noël, M. P. (2009). Counting on working memory when learning to count and to add: A preschool study. *Developmental Psychology*, 45(6), 1630.
- Noël, M. P., Rousselle, L., & De Visscher, A. (2013). La dyscalculie développementale: à la croisée de facteurs numériques spécifiques et de facteurs cognitifs généraux. *Développements*, (2), 24-31.
- Norman, D. A., & Shallice, T. (1986). Attention to action. In *Consciousness and self-regulation* (pp. 1-18). Springer US.
- Parsons, S., & Bynner, J. (2005). Does numeracy matter more?.
- Passolunghi, M. C. (2012). Working memory and arithmetic learning disability. In *Working memory and neurodevelopmental disorders* (pp. 127-152). Psychology Press.
- Passolunghi, M. C., & Mammarella, I. C. (2010). Spatial and visual working memory ability in children with difficulties in arithmetic word problem solving. *European Journal of Cognitive Psychology*, 22(6), 944-963.
- Passolunghi, M. C., & Siegel, L. S. (2001). Short-term memory, working memory, and inhibitory control in children with difficulties in arithmetic problem solving. *Journal of experimental child psychology*, 80(1), 44-57.
- Passolunghi, M. C., Mammarella, I. C., & Altoè, G. (2008). Cognitive abilities as precursors of the early acquisition of mathematical skills during first through second grades. *Developmental Neuropsychology*, 33(3), 229-250.
- Passolunghi, M. C., Vercelloni, B., & Schadee, H. (2007). The precursors of mathematics learning: Working memory, phonological ability and numerical competence. *Cognitive Development*, 22(2), 165-184.
- Phye, G. D., & Pickering, S. J. (2006). *Working memory and education*. Elsevier.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1959). La genèse des structures logiques élémentaires.
- 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.
- Picard, A., Seigneuric, A., de Guibert, M., Megherbi, H., & Potier, D. (2008). La MTVE: une épreuve de mémoire de travail verbale chez l'enfant adaptée du Listening Span Task de Siegel et Ryan (1989). *L'Année psychologique*, 108(2), 273-308.
- Pickering, S. J., & Gathercole*, S. E. (2004). Distinctive working memory profiles in children with special educational needs. *Educational Psychology*, 24(3), 393-408.

BIBLIOGRAPHIE

Planton, S., & Démonet, J. F. (2012). Neurophysiologie du langage: apports de la neuro-imagerie et état des connaissances. *Revue de neuropsychologie*, 4(4), 255-266.

Postle, B. R. (2006). Working memory as an emergent property of the mind and brain. *Neuroscience*, 139(1), 23-38.

Rigalleau, F. (2015). Le rôle de la similarité des informations en mémoire de travail dans le traitement des phrases grammaticalement très complexes. In : *Rencontres d'orthophonie (15: 2015: Paris)*, Gatignol, P., Joyeux, N., Union nationale pour le développement de la recherche et de l'évaluation en orthophonie (France), & Fédération nationale des orthophonistes (France). (2002). *Mémoire de travail*. Ortho-Editions.

Rodrigues, A., & Befi-Lopes, D. M. (2009). Phonological working memory and its relationship with language development in children. *Pró-Fono Revista de Atualização Científica*, 21(1), 63-68.

Rousselle, L., & Noël, M. P. (2007). Basic numerical skills in children with mathematics learning disabilities: A comparison of symbolic vs non-symbolic number magnitude processing. *Cognition*, 102(3), 361-395.

Roy, A., Lodenos, V. (2017). Fonctions exécutives et cognition mathématique, aspects cliniques et réalité scolaire. *Rééducation orthophonique – N°269 – Mars 2017*

Schelstraete, M. A., Bragard, A., Collette, E., Nossent, C., & Van Schendel, C. (2011). *Traitements Du Langage Oral Chez L'enfant*. Elsevier Health Sciences France.

Schuchardt, K., Maehler, C., & Hasselhorn, M. (2008). Working memory deficits in children with specific learning disorders. *Journal of Learning Disabilities*, 41(6), 514-523.

Segui, J., & Lévèillé, M. (1977). Etude sur la compréhension de phrases chez l'enfant. *Enfance*, 30(1), 105-115.

Seron, X. (2007). La mémoire de travail: du modèle initial au buffer épisodique. *Aubin G, Coyette F, Pradat-Diehl P, Vallat-Azouvi C, eds. Neuropsychologie de la mémoire de travail, Marseille. Marseille: Solal*, 13-33.

Shalev, R. S., Manor, O., & Gross-Tsur, V. (2005). Developmental dyscalculia: a prospective six-year follow-up. *Developmental medicine and child neurology*, 47(2), 121-125.

Sprenger-Charolles, L., Colé, P., Piquard-Kipffer, A., & Leloup, G. (2010). EVALEC, Batterie informatisée d'évaluation diagnostique des troubles spécifiques d'apprentissage de la lecture.

St Clair-Thompson, H. L. (2010). Backwards digit recall: A measure of short-term memory or working memory?. *European Journal of Cognitive Psychology*, 22(2), 286-296.

Stuss, D. T. (2011). Functions of the frontal lobes: relation to executive functions. *Journal of the international neuropsychological Society*, 17(5), 759-765.

Stuss, D. T., & Alexander, M. P. (2000). Executive functions and the frontal lobes: a conceptual view. *Psychological research*, 63(3-4), 289-298.

BIBLIOGRAPHIE

Swanson, H. L., & Sachse-Lee, C. (2001). Mathematical problem solving and working memory in children with learning disabilities: Both executive and phonological processes are important. *Journal of Experimental Child Psychology*, 79(3), 294-321.

Swanson, H. L., & Siegel, L. (2001). Learning disabilities as a working memory deficit. *Issues in Education*, 7(1).

Swanson, H. L., Jerman, O., & Zheng, X. (2008). Growth in working memory and mathematical problem solving in children at risk and not at risk for serious math difficulties. *Journal of Educational Psychology*, 100(2), 343.

Thevenot, C., Barrouillet, P., & Fayol, M. (2001). Algorithmic solution of arithmetic problems and operands-answer associations in long-term memory. *The Quarterly Journal of Experimental Psychology: Section A*, 54(2), 599-611.

Toll, S. W., Van der Ven, S. H., Kroesbergen, E. H., & Van Luit, J. E. (2011). Executive functions as predictors of math learning disabilities. *Journal of learning disabilities*, 44(6), 521-532.

van der Sluis, S., de Jong, P. F., & van der Leij, A. (2007). Executive functioning in children, and its relations with reasoning, reading, and arithmetic. *Intelligence*, 35(5), 427-449.

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

Wager, T. D., & Smith, E. E. (2003). Neuroimaging studies of working memory. *Cognitive, Affective, & Behavioral Neuroscience*, 3(4), 255-274.

Wilson, K. M., & Swanson, H. L. (2001). Are mathematics disabilities due to a domain-general or a domain-specific working memory deficit?. *Journal of Learning disabilities*, 34(3), 237-248.

Zelazo, P. D., Müller, U., Frye, D., Marcovitch, S., Argitis, G., Boseovski, J., ... & Carlson, S. M. (2003). The development of executive function in early childhood. *Monographs of the society for research in child development*, i-151.

TABLE DES ILLUSTRATIONS - TABLEAUX

<i>Tableau 1 : Les types de phrases relatives.....</i>	<i>27</i>
<i>Tableau 2 : Renseignements principaux concernant les sujets de l'étude.....</i>	<i>36</i>
<i>Tableau 3 : Liste des épreuves et des critères de mesures.....</i>	<i>43</i>
<i>Tableau 4 : Analyses de corrélations (R de Pearson) entre les mesures de MCT verbale, de MT verbale, de fonctions exécutives et de compréhension syntaxique.....</i>	<i>47</i>
<i>Tableau 5 : Résultats de l'analyse de régression linéaire simple avec la compréhension syntaxique orale comme variable critère et les scores aux tâches de MCT verbale comme prédicteurs.....</i>	<i>50</i>
<i>Tableau 6 : Résultats de l'analyse de régression linéaire simple avec la compréhension syntaxique orale comme variable critère et les scores à la tâche de MT verbale comme prédicteurs.....</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 7 : Résultats de l'analyse de régression linéaire simple avec la compréhension syntaxique orale comme variable critère et les scores aux tâches de fonctions exécutives comme prédicteurs.....</i>	<i>51</i>
<i>Tableau 8 : Résultats de l'analyse de régression linéaire multiple avec comme variable critère la compréhension syntaxique orale, et comme prédicteurs le nombre de mots rappelés à la MTVE, l'empan complexe et l'empan simple de chiffres droit.....</i>	<i>52</i>
<i>Tableau 9 : Résultats de l'analyse de régression linéaire simple avec la compréhension syntaxique orale comme variable critère et le temps de réponse couleurs (Dénomination Rapide Sérielle) comme prédicteur.....</i>	<i>53</i>
<i>Tableau 10 : Nombres et pourcentages des réponses aux phrases relatives de l'ECOSSE les plus échouées dans notre échantillon.....</i>	<i>57</i>
<i>Tableau 11 : Nombres et pourcentages des réponses aux phrases non complexes de l'ECOSSE les plus échouées dans notre échantillon.....</i>	<i>59</i>
<i>Tableau 12 : Nombres et pourcentages de sujets ayant obtenu des résultats inférieurs à la norme et au seuil pathologique dans les épreuves évaluant les fonctions exécutives.....</i>	<i>60</i>

TABLE DES ILLUSTRATIONS - FIGURES

Figure 1 : Nombre total d'erreurs à l'ECOSSE en fonction de l'empan de chiffres endroit..... 48

*Figure 2 : Nombre total d'erreurs à l'ECOSSE en fonction du nombre de mots rappelés à la
MTVE 49*

Figure 3 : Nombre total d'erreurs à l'ECOSSE en fonction de l'empan complexe à la MTVE 49

Figure 4 : Répartition des énoncés complexes induisant le plus d'erreurs à l'ECOSSE 54

Figure 5 : Nombre d'erreurs à l'ECOSSE en fonction du type de phrase relative 55

Figure 6 : Répartition des énoncés non complexes induisant le plus d'erreurs à l'ECOSSE..... 58

ANNEXES

Annexe I : Remarques des orthophonistes sur nos participants

1. Diagnostics posés sur les difficultés numériques

	Retard des aptitudes logiques	Trouble du raisonnement logico-mathématique	Retard des acquisitions en mathématiques	Dyscalculie logique	Dyscalculie visuo-spatiale	Dyscalculie primaire (atteinte du sens du nombre)
A		X		X		
B			X			
C	X	X	X			
E		X	X			X
F	X					X
G			X			
I		X		X		
J		X	X	X		
K	X	X	X	X	X	
TOTAL	3	6	6	4	1	2

2. Structures logiques déficitaires

	Classification	Sérialisation	Inclusion	Conservation	Combinatoire
A	X	X	X	X	X
B					
C	X			X	X
E	X				
F			X	X	X
G					
I		X	X	X	X
J	X		X	X	
K				X	
TOTAL	4	2	4	6	4

3. Aptitudes mathématiques perturbées

	Calculs mentaux	Pose des opérations	Sens des opérations	Techniques opératoires	Géométrie	Problèmes	Numération	Transcodages
A	X	X	X	X		X	X	
B				X		X	X	
C			X	X		X	X	X
E	X					X	X	X
F	X			X		X	X	
G						X		X
I			X	X		X	X	
J			X			X	X	X
K			X		X	X		
TOTAL	2	1	5	5	1	9	7	4

4. Difficultés concernant les problèmes mathématiques

	A	B	C	E	F	G	I	J	K	TOTAL
Difficultés extraire éléments pertinents de l'énoncé	X	X		X				X	X	5
Difficultés compréhension de l'énoncé	X				X	X	X	X	X	6
Mauvais choix de stratégies	X	X					X	X	X	5
Mauvais choix des opérations	X	X		X	X		X	X	X	7
Oubli des données de l'énoncé	X				X					2

5. Difficultés générales relevées par les orthophonistes

	A	B	C	E	F	G	I	J	K	TOTAL
Lenteur	X	X			X	X		X		5
Difficultés attentionnelles							X		X	2
Difficultés mémoriser nouvelles informations				X						1
Difficultés double tâche	X						X	X	X	4
Difficultés planifier, élaborer des stratégies	X		X	X	X	X		X		6
Difficultés s'organiser	X						X	X		3
Difficultés changer d'activité										0
Difficultés inhiber éléments non pertinents									X	1
Difficultés estimer des quantités, ou les comparer	X			X	X	X		X		5
Défaut d'automatisation des procédures de calcul	X	X	X		X		X			5
Utilisation de stratégies immatures	X	X		X	X				X	5
Difficultés d'organisation visuo-spatiale	X	X							X	3

6. Bilan neuropsychologique

	Non	Oui	Résultats
A		X	<u>Juillet 2017</u> : facteur G et capacités intellectuelles dans la norme -Absence de trouble déficitaire de l'attention, de syndrome dys-exécutif -Atteinte localisée à la MT auditive verbale -MT visuelle très performante -Capacités opérantes : MCT verbale, flexibilité mentale, contrôle inhibiteur, vitesse de traitement
B		X	<u>Janvier 2017</u> : Difficultés majeures d'attention auditive soutenue dans un contexte de très bonnes capacités en compréhension verbale et en raisonnement perceptif.
C	X		
E	X		
F		X	<u>Mars 2017</u> : difficultés en structuration spatiale, bonnes mémoires visuelle et auditive.
G	X		
I	X		
J	X		
K		X	<i>Non communiqués</i>
TOTAL	5	4	

7. Langage écrit

	A	B	C	E	F	G	I	J	K	TOTAL
Aucun trouble du langage écrit	X							X		2
Dyslexie phonologique		X								1
Dyslexie lexicale		X								1
Dysorthographe phonologique		X								1
Dysorthographe lexicale		X								1
Stock lexical orthographique insuffisant		X	X							2
Difficultés de compréhension écrite	X		X			X	X		X	5
AUTRE				Retard d'acquisition	Suivi antérieur					2

8. Langage oral

	A	B	C	E	F	G	I	J	K	TOTAL
Aucune faiblesse du langage oral		X	X		X			X	X	5
Fragilité du lexique en réception				X						1
Fragilité de production d'énoncés							X			1
Fragilité de compréhension d'énoncés	X			X		X				3

9. Suivi orthophonique antérieur

	Aucun suivi orthophonique antérieur	Suivi antérieur pour des difficultés de langage écrit	Suivi antérieur pour retard de langage oral	Suivi antérieur pour un retard de parole
A		X		
B	X			
C			X	X
E		X		
F		X		
G		X	X	
I		X	X	X
J	X			
K	X			
TOTAL	3	5	3	2

Annexe II : Ordre de complexité et nature des énoncés (ECOSSE)

- A : Syntagmes nominaux (déterminant + nom)
B : Adjectifs seuls
C : Phrases simples (déterminant + nom + verbe)
D : Verbes à l'infinitif
E : Phrases négatives simples
F : Phrases contenant « Non seulement...mais aussi » et « ... à la fois... »
G : Phrases simples + prépositions
H : Phrases actives renversables
I : Phrases avec pronoms (sujet, objet, pluriel)
J : Phrases simples + déterminant (singulier, pluriel)
K : Phrases contenant « ...mais pas... »
Exemple : La boîte est rouge mais pas la chaise.
L : Phrases avec pronoms (sujet, objet, masculin, féminin)
Exemples : Elle est assise sur la chaise.
La dame le porte.
M : Phrases contenant « Ni...ni »
Exemple : Ni le chien ni la balle ne sont marron.
N : Phrases avec prépositions (devant, derrière, dans, sur)
Exemple : La tasse est devant la boîte.
O : Phrases avec prépositions (au-dessus, au-dessous, sous)
Exemple : Le crayon est au-dessus de la fleur.
P : Phrases relatives en « qui » (SS, OS)
Exemple : Le crayon qui est sur le livre est jaune.
Q : Phrases comparatives et superlatives (infériorité, supériorité)
Exemples : Le couteau est plus long que le crayon.
La chaussure est la plus petite.
R : Phrases passives (renversables et non renversables)
Exemples : La fille est poursuivie par le cheval.
Le camion est poussé par le garçon.
S : Phrases avec effacement ou remplacement de relative.
Exemples : Le garçon poursuivant le cheval est gros.
Le crayon sur la chaussure est bleu.
T : Phrases relatives en « que » (enchâssées, branchées à droite)
Exemples : La pomme que mange le garçon est verte.
Le garçon mange les pommes que la fille cueille.
U : Phrases avec coréférence ambiguë du pronom
Exemple : La fille pousse la chaise, pourtant elle est petite.
V : Phrases avec adjectifs ordinaux spécifiés ou non.
Exemple : Le chien a fait tomber la deuxième quille.
W : Phrases relatives complexes (sur/dans lequel, dont)
Exemple : Le livre sur lequel est posé le crayon est rouge.

Annexe III : Tableaux résultats et remarques qualitatives

1. Exemple d'un tableau-résultats (sujet J)

Tâche	Score	E-T / P.	<	-3	-2	-1	M	+1	+2	>
Flexibilité										
Total des erreurs	3	0.12					X			
Réponses correctes	27	0.32					X			
Autocorrections	2	-0.14					X			
Inhibition										
Total des erreurs	3	-0.70					X			
Réponses correctes	70	-0.24					X			
Temps passage	140.275	-0.29					X			
Réponses distracteurs	0	0.87						X		
Autocorrections	0	-0.78					X			
Mise à jour – versant auditif										
Items correctement restitués	9	-3.85	X							
Persévérations	1	0.14					X			
Intrusions	0	0.51					X			
Triplets dans l'ordre	1	-1.21				X				
Mise à jour – versant visuel										
Items correctement restitués	8	-4.08	X							
Persévérations	1	0.38					X			

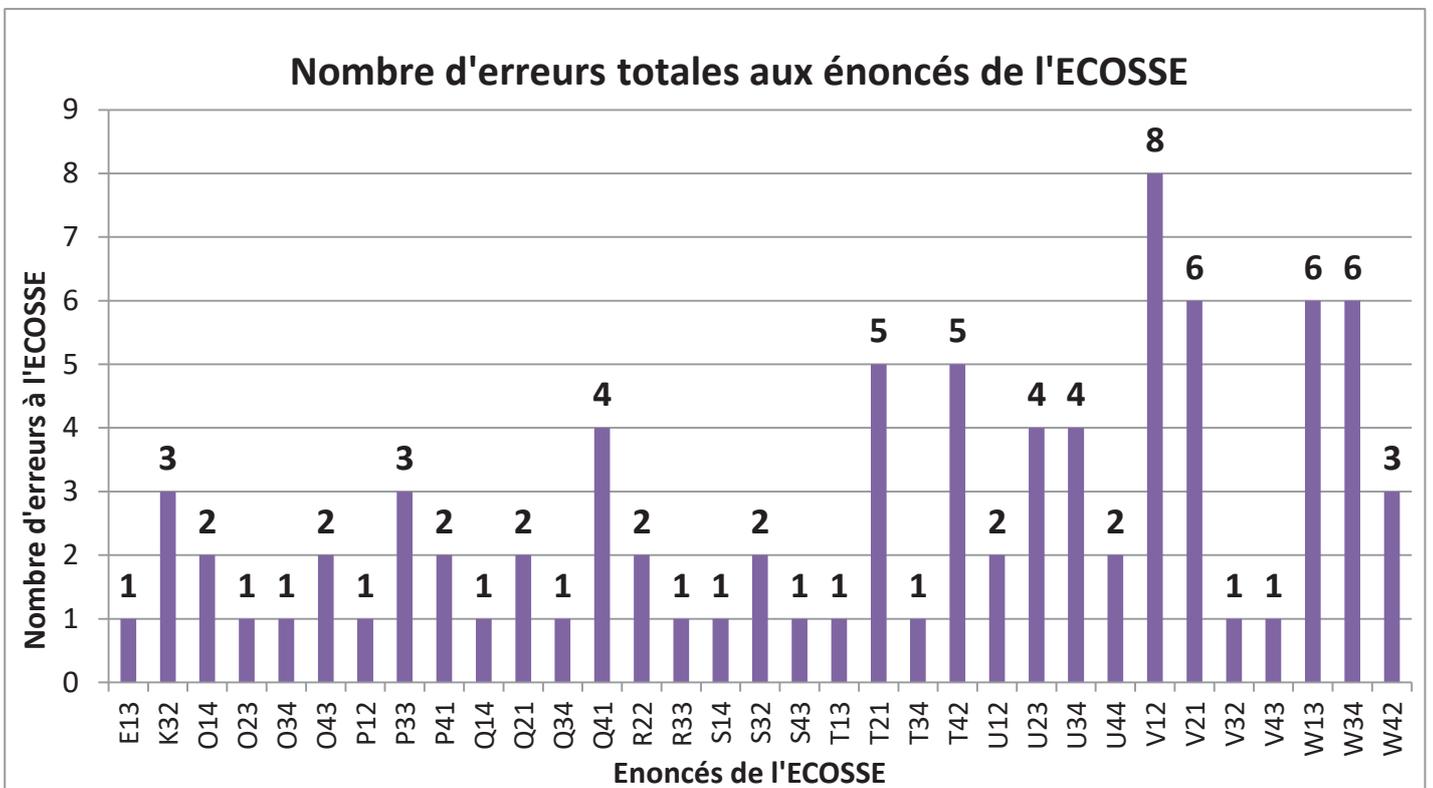
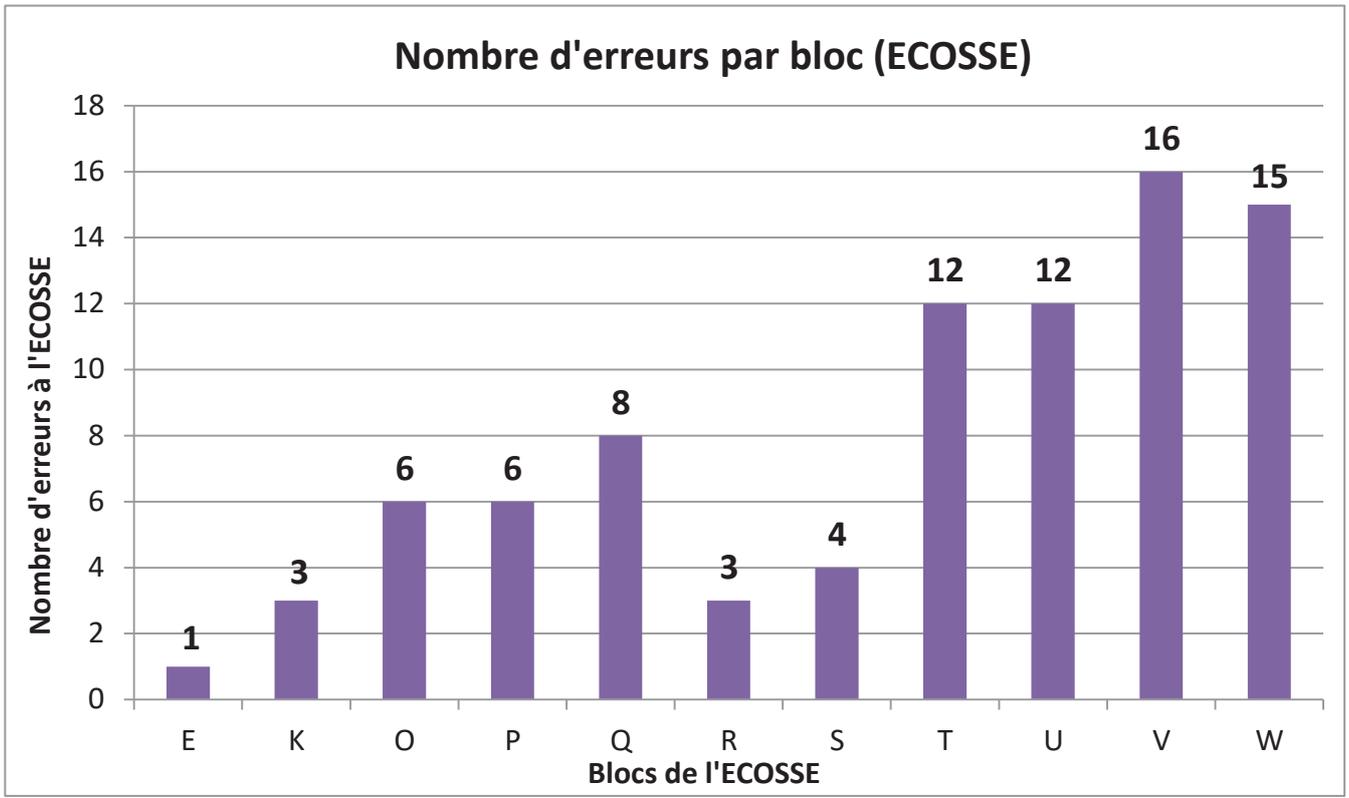
ANNEXE III

Intrusions	0	0.42							X	
Triplets dans l'ordre	0	-1.49						X		
Répétition de mots dissimilaires										
Séquence correcte la plus longue	3	-1.24						X		
Erreurs phonologiques	1	0.65							X	
Non réponses	1	0.61							X	
Persévérations	1	-1.02						X		
Mots restitués ordre	11	-1.52						X	X	
Répétition de pseudo-mots (BELEC)										
Empan MCT CV	5	0.21 – P50- 90							X	
Réponses correctes CV	18	0.54 – P50- 75							X	
Empan MCT CCV	3	-0.50 – P50							X	
Réponses correctes CCV	11	0.28 – P50- 75							X	
Empan de chiffres (BALE)										
Empan endroit	6	2.60 – >P95								X
Empan envers	3	-0.61 – P35							X	
MTVE										
Mots rappelés	22/42	-1.51						X		
Empan complexe	3	-0.22							X	
Intrusions	1	0.04							X	
E.CO.S.SE oral										
Nombre total d'erreurs	6/92	0.24							X	

2. Tableau analyse qualitative de l'ensemble de nos participants

	A	B	C	E	F	G	I	J	K	TOTAL
Autocorrections	Flexibilité	X(1)	X(6)		X(2)	X(2)	X(1)	X(2)		6/9 (66,67%)
	Inhibition		X(1)			X(1)				2/9 (22,22%)
	ECOSSE	X(3)			X(1)	X(1)	X(4)	X(2)	X(2)	6/9 (66,67%)
Limitation du rappel de l'information « ordre sériel »	X	X	X	X		X	X	X		7/9 (77,78%)
Effet de récence uniquement	X	X	X		X	X		X		6/9 (66,67%)
Dissoeiation : Empan mots > Empan PM	X	X	X	X					X	5/9 (55,56%)
Intrusions MTVE	Présence et nombre d'intrusions	X(3)			X(3)	X(3)		X(1)	X(4)	5/9 (55,56%)
	Situation par rapport à la norme	10% CM1	43% CM1	43% CM2	11% CE2	10% CM1	43% CM2	25% CM1	8% CM2	
	Mots cibles d'une série précédente	1				3	1	1	1	7
Répétitions ECOSSE				X(12)	X(3)	X(18)	X(14)		X(15)	5/9 (55,56%)
	Métacognition	X	X	X		X	X		X	6/9 (66,67%)
Anxiété et sensibilité à l'échec	X	X					X	X	X	5/9 (55,56%)
Attention soutenue	X	X		X	X	X	X	X		7/9 (77,78%)
Concentration malgré des nuisances sonores	X			X	X				X	4/9 (44,44%)

Annexe IV : Histogrammes des erreurs à l'ECOSSE



Flora GRANADOS (Auteure)

IMPLICATION DE LA MEMOIRE DE TRAVAIL DANS LA COMPREHENSION SYNTAXIQUE CHEZ DES ENFANTS AVEC TROUBLES DE LA COGNITION MATHEMATIQUE

72 pages, 144 références bibliographiques

Mémoire d'orthophonie – UNS / Faculté de Médecine - Nice 2018

RESUME

Certains enfants avec troubles de la cognition mathématique présenteraient un déficit de la mémoire de travail. Or, ce système mnésique est sollicité dans la compréhension syntaxique orale, notamment pour les phrases complexes. L'objectif principal de notre étude est donc d'analyser, chez des enfants avec troubles de la cognition mathématique, la part d'implication des capacités de mémoire de travail verbale dans la compréhension syntaxique orale. Nos objectifs secondaires sont d'examiner les phrases induisant le plus d'erreurs de compréhension chez des enfants dyscalculiques, et d'identifier les fonctions exécutives les plus altérées chez ces sujets. Nous avons donc administré à 9 enfants dyscalculiques, âgés de 8 ans 11 mois à 10 ans 9 mois, des épreuves mnésiques, exécutives et de compréhension syntaxique. En réponse à notre problématique, nos résultats mettent en évidence que la capacité de la mémoire de travail verbale, évaluée par la MTVE, est le prédicteur le plus significatif de la compréhension syntaxique orale de phrases complexes. De plus, nos analyses descriptives montrent que la compréhension est altérée, par rapport à la norme, pour les phrases avec adjectifs ordinaux, les phrases relatives complexes et les phrases relatives en « que » renversables. Enfin, nos résultats mettent en évidence que la fonction exécutive de Mise à jour est la plus déficitaire dans notre échantillon, surtout en modalité visuelle. Notre étude a pour but principal d'approfondir la recherche sur les troubles de la cognition mathématique, peu étudiés mais aussi répandus que les dyslexies.

Some dyscalculic children may have a working memory deficit. However, this memory system is involved in oral syntactic comprehension, especially for complex sentences. Therefore, the main objective of our study is to analyze, in children with mathematical cognition disorders, the specific contribution of verbal working memory abilities in oral syntactic comprehension. Our secondary objectives are to examine the sentences that induce most of the comprehension errors in dyscalculic children, and to identify the most impaired executive functions in these subjects. Thus, 9 dyscalculic children aged from 8 years 11 months to 10 years 9 months were given memory, executive and syntactic comprehension tests. In response to our problematic, our results show that the verbal working memory capacity, evaluated by the MTVE, is the most significant predictor of oral syntactic comprehension in complex sentences. In addition, our descriptive analyses show that comprehension is impaired, compared to the norm, for sentences with ordinal adjectives, complex relative sentences, and reversible relative sentences using "that". Finally, our results show that the Update executive function is the most deficient in our sample, especially in visual mode. The main goal of our study is to further researches on dyscalculia, which is poorly studied but as widespread as dyslexia.

MOTS-CLES

Cognition mathématique – Dyscalculie – Mémoire de travail – Mémoire à court terme – Fonctions exécutives – Compréhension syntaxique – Phrases complexes

Mathematical cognition – Dyscalculia – Working memory – Short-term memory – Executive functions – Syntactic comprehension – Complex sentences

DIRECTRICE DE MEMOIRE

Ghislaine SCHON

CO-DIRECTRICE DE MEMOIRE

Isabelle THUBE-POLI
