HAL
open science

Validation d'épreuves d'évaluation de la numération au sein d'une batterie informatisée (Examath) visant à évaluer les troubles de la cognition mathématique

Anaïs Morisse

▶ **To cite this version:**

Anaïs Morisse. Validation d'épreuves d'évaluation de la numération au sein d'une batterie informatisée (Examath) visant à évaluer les troubles de la cognition mathématique. Sciences cognitives. 2016. dumas-01373176

HAL Id: dumas-01373176

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01373176v1

Submitted on 28 Sep 2016

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.

Université de Caen Normandie

UFR de Médecine

Département d'orthophonie

Mémoire pour l'obtention du

Certificat de capacité en Orthophonie

VALIDATION D'EPREUVES D'EVALUATION DE LA NUMERATION AU SEIN D'UNE BATTERIE INFORMATISEE (EXAMATH) VISANT A EVALUER LES TROUBLES DE LA COGNITION MATHEMATIQUE

Présenté par Anaïs Morisse

Née le 18 juillet 1992

Sous la co-direction de Marie-Christel Helloin, orthophoniste et Anne Lafay, Ph.D et orthophoniste.

Année universitaire : 2015-2016

Résumé

Examath (Lafay et Helloin, en préparation) est une batterie informatisée d'évaluation des troubles de la cognition mathématique pour les 8-15 ans. Son approche va dans le sens des recherches actuelles en neurosciences et neuropsychologie cognitives qui définissent la dyscalculie comme un trouble spécifique des apprentissages en mathématiques. Face aux rares épreuves existantes dans ce domaine et pour cette tranche d'âge, ce mémoire a pour objectif la validation, auprès d'enfants de CM2, du module de numération comportant huit épreuves. Deux tests publiés (Tempo Test Rekenen et Numeracy Screener) ont été préalablement normalisés afin de permettre une évaluation cognitive des sujets en amont de la phase expérimentale. Au final, 36 enfants ont été retenus pour cette étude, dont 10 suivis pour des « troubles du calcul et du raisonnement logico-mathématique » formant le groupe « dyscalculique », les autres constituant les sujets contrôles. Les différentes épreuves du module de numération ont révélé leur caractère discriminant, montrant une différence significative entre les deux groupes pour six d'entre elles. La corrélation trouvée avec d'autres épreuves existantes évaluant les mêmes compétences a montré la fiabilité des sous-tests d'Examath. L'étude a ainsi permis de faire des ajustements et de décider de ne proposer certaines épreuves qu'aux collégiens. Ce module de numération, couplé aux autres modules de la batterie Examath devrait permettre une large évaluation des compétences clés en cognition mathématique et faciliter les diagnostics précis de dyscalculie développementale.

Mots clés : Dyscalculie développementale, numération, évaluation, diagnostic, Examath, validation

Summery

Examath (Lafay & Helloin, development in progress) is a computerized test battery to assess deficit in mathematics cognition for children aged from 8 to 15 years old. Its approach is in line with current researches in neuroscience and cognitive neurophysiology defining dyscalculia as a specific learning deficit in mathematics. Given the limited available tests in this domain and for this age group, this study tests the validity of the "Numeracy" module (eight tasks) with 5th grade children. First, two published tests (Tempo Test Rekenen and Numeracy Screener) were normalised to allow a cognitive evaluation of the subjects in the experimental phase. At the end, 36 children were selected for this study: 10 of them formed the "dyscalculia group" and were followed for their deficit in calculation and reasoning abilities ; the others constituted the control subjects group. The different tasks of the Numeracy module revealed their discriminating validity showing a significant difference between the two groups for 6 of them. The correlation with other existing tests assessing the same abilities showed the reliability of the "Numeracy" module. This study has allowed us to make adjustments and to decide to submit some tasks only to children attending high school.Thus, the "Numeracy" module, coupled to other modules of Examath should lead to a wide assessment of key competences in mathematical cognition and ease the specific diagnosis of developmental dyscalculia.

Key words: Developmental Dyscalculia, Numeracy, assessment, diagnosis, Examath, validity.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier mes co-directrices pour leur accompagnement tout au long cette année, leurs multiples relectures, conseils et corrections. Merci aux membres du jury pour leur lecture et l'attention portée à ce travail. Un merci particulier aux enfants, familles et écoles ayant accepté de participer à ce projet. Ce mémoire est ce qu'il est grâce à vous.

Merci également au département d'orthophonie de Caen pour son accueil et l'enseignement dispensé ces quatre dernières années.

Ces études ont été rythmées par de nombreux stages. Merci aux professionnels qui m'ont reçue et qui ont donné de leur temps pour partager leur savoir et leurs expériences.

Ce projet professionnel n'aurait pas pu aboutir non plus sans tous ceux qui m'ont soutenue tout au long de ces cinq dernières années et même plus. Je pense naturellement à mes proches. Merci pour votre confiance et votre optimisme sans faille dans lequel j'ai pu puiser sans limite par moments. Une pensée particulière à ma mère qui a littéralement passé le concours par procuration, à mon frère pour ses nombreux messages de soutien et d'avoir cru en moi dès le tout début! Un merci particulier à mes grands-parents que je n'ai pas pu voir autant que je l'aurais voulu pendant ces études… Le fait de simplement savoir que vous étiez là, même en pensée, a beaucoup compté.

Comment ne pas remercier mes collègues de promo sans qui cette aventure n'aurait pas la même saveur. Parce qu'on s'est épaulées, aidées, qu'on a fait chauffer nos neurones, qu'on a (beaucoup) ri, qu'on s'est évadées après les cours pour nous ressourcer, qu'on a partagé nos trouvailles… Parce qu'aussi vous avez supporté mon humour pas toujours à propos, que vous avez été là quand il le fallait et moins là quand il le fallait aussi. Pour tout ça, un immense merci. Nous avons su allier nos différences et en faire une véritable richesse! J'ai hâte de vous recroiser dans de futures formations et même avant !

Merci aussi à Jersey, Sally, Gaston et les autres… !

Table des matières

INTRODUCTION 1

PARTIE THEORIQUE 2

I/ La numération dans le programme scolaire du cycle 3 2

A. Renforcement de la compréhension du nombre 2

B. Affinement de la compréhension des nombres : relation entre les nombres 3

II/ La numération entière : modèle théorique du Triple Code 3

A. Le code analogique 4

B. Le code oral 4

C. Le code arabe 5

III/ Le transcodage 5

A. Dictée et lecture : les modèles théoriques 5

B. Les types d'erreurs fréquentes 6

C. Les facteurs influençant les habiletés de transcodage 7

IV/ Les fractions 8

A. Le vocabulaire des fractions 9

B. L'apprentissage des fractions 9

V/ La dyscalculie développementale 12

A. Définition 12

B. Déficit du sens du nombre 12

C. Déficit d'accès au sens du nombre 12

D. Le transcodage chez les dyscalculiques 13

E. Les fractions chez les dyscalculiques 14

VI/ Evaluation de la numération : le bilan orthophonique 14

A. Outils existants 14

B. Validité psychométrique d'un test 15

C. Présentation du logiciel Examath 16

PARTIE EXPERIMENTALE 17
I/ Problématique 17
II/ Objectifs 17
III/ Hypothèses 17
IV/ Méthodologie 17
A. Etude 1 : normalisation de deux tests mathématiques 18
B. Etude 2 : validation du module 2 Numération d'Examath 19
V/ Résultats 22
A. Résultats de l'étude 1 : normalisation de deux tests mathématiques 22
B. Résultats de l'étude 2 : validation du module 2 Numération d'Examath 22
DISCUSSION 28
I/ Interprétation des résultats de l'épreuve expérimentale 28
A. Hypothèse 1 : meilleurs résultats du groupe contrôle aux épreuves du module 2 Numération d'Examath 28
B. Hypothèse 2 : corrélation entre les subtests du module Numération d'Examath et des épreuves déjà publiées évaluant des compétences de même nature 32
II/ Limites 32
A. Modalités de recrutement 33
B. Modalités de passation 33
C. Items du module 2 d'Examath 33
III/ Questionnements et perspectives de recherche 34
CONCLUSION 36
BIBLIOGRAPHIE 37
ANNEXES

INTRODUCTION

De la recette de cuisine en passant par la lecture de l'heure, les mathématiques ont une place prépondérante dans notre vie. Nous en avons continuellement besoin et les utilisons souvent sans même nous en rendre compte. A l'école, elles ont un double rôle : discipline phare de l'enseignement et outil de sélection très valorisé dans l'enseignement supérieur. En cas de difficulté, l'anxiété générée est alors d'autant plus grande et les échecs sont très vite dramatisés. C'est pourquoi un dépistage, le plus précoce possible, est nécessaire. Cependant, les diagnostics de dyscalculie et leurs prises en charge sont beaucoup moins fréquents que pour la dyslexie alors que les prévalences sont les mêmes : de 1 à 10% de la population, sans distinction de sexe.

La dyscalculie développementale fait partie des « troubles spécifiques des apprentissages » (TSA) définis dans le DSM-V (2013). Les TSA ont une origine neurodéveloppementale, ils entravent les capacités pour apprendre et donc accéder aux compétences académiques (lecture, l'expression écrite ou l'arithmétique) qui sont à la base des autres apprentissages scolaires. Ces troubles sont inattendus du fait du développement normal dans les autres domaines. La dyscalculie, trouble spécifique des activités numériques, comportent trois critères importants selon le DSM-V : les aptitudes mathématiques évaluées par les tests standardisés sont nettement inférieures au niveau escompté, compte tenu de l'âge, du niveau intellectuel, et de l'enseignement reçu par le sujet, le trouble interfère significativement avec la réussite scolaire ou les activités de la vie courante et il ne résulte pas d'une défaillance sensorielle.

Les tests standardisés évaluant les habiletés mathématiques et permettant de diagnostiquer et caractériser la dyscalculie sont peu nombreux et ne correspondent pas toujours aux données scientifiques actuelles : en effet, presque tous sont basés sur le modèle structuraliste de Piaget. La batterie Examath (Lafay & Helloin, en préparation) vise à combler ce manque. Elle se fonde sur les modèles actuels en neuropsychologie et neurosciences et permet d'évaluer dans sa globalité les troubles de la cognition mathématique. Ce mémoire s'intéresse plus particulièrement à la validation du module d'Examath évaluant la numération. Ce travail tentera tout d'abord de faire un point théorique sur les recherches actuelles dans ce domaine pour mettre en avant les validités de contenu et de construit théorique de ce module, avant d'essayer de vérifier le caractère discriminant des épreuves de numération d'Examath. Les résultats obtenus seront ensuite d'être interprétés et discutés, soulevant de nouvelles réflexions.

PARTIE THEORIQUE

I/ La numération dans le programme scolaire du cycle 3

La numération est définie comme la science de la formation et de l'écriture des nombres (Brin-Henry, Courrier, Lederle et Masy, 2011). A l'entrée au collège, un certain nombre de connaissances en numération est attendu, fruit d'un apprentissage progressif tout au long de l'enseignement primaire. Voici ce que les programmes officiels préconisent comme savoirs pour la classe de CM2.

A. Renforcement de la compréhension du nombre

1. Décomposition

Les exercices de décomposition au cycle 3 permettent d'appréhender les relations entre numération décimale de position et numération orale. La décomposition n'est possible qu'après un travail sur la position des chiffres dans les nombres. La notion de « zéro de position » doit être abordée et maîtrisée. Ce zéro permet à chaque chiffre d'occuper la position qui doit être la sienne selon l'unité de numération qu'il représente. La décomposition se fait en partant de la droite, en regroupant les chiffres par paquet de 3, et permet de travailler les relations entre centaines, milliers et millions. Cela permet de bien lire les nombres mais aussi de savoir les écrire.

2. Grands nombres

Pour travailler les grands nombres, travailler en amont les ordres de grandeur métriques est préconisé dans les programmes scolaires pour renforcer la compréhension de la numération (Durepaire et Megard, 2010). La connaissance des ordres de grandeur des petits nombres (1 à 9) d'unités métriques est déterminante dans l'apprentissage de la mesure et de l'estimation des nombres. Ces grands nombres se retrouvent dans beaucoup de domaines de la vie quotidienne tels que la géographie, pour parler de masse, de temps, de la monnaie, etc.

3. Nombres décimaux

Selon Durepaire et Megard (2010), l'apprentissage des nombres décimaux doit faire comprendre à l'élève que les nombres décimaux, et plus généralement les fractions, permettent de résoudre de nouveaux problèmes et que l'ensemble des nombres décimaux est un sous-ensemble de celui des fractions (l'ensemble des fractions décimales) qui sont alors écrites sous une autre forme (1/2 s'écrit 0,5). Certains raisonnements et certaines procédures corrects avec les nombres entiers ne peuvent plus l'être avec les nombres décimaux et les

fractions (par exemple, lors de la comparaison de deux nombres, dire que le plus grand est celui qui a le plus de chiffres est valable pour les nombres entiers, pas pour les décimaux).

Une difficulté supplémentaire peut subvenir lors de l'apprentissage des nombres décimaux car les situations de référence de ces derniers sont en lien avec la proportionnalité et cela entraîne une rupture de sens. En effet, si une multiplication de nombres entiers peut être vue comme une addition itérée, cela ne peut être le cas s'il y a un décimal dans l'opération. Dans les programmes (Durepaire et Megard, 2010), on retrouve cet exemple « 2 kg de pommes à 4€ coûtent… ? » dans lequel la multiplication peut être vue comme une addition réitérée (4€ x 2 = 4€ + 4€ = 8€) et cet exemple « 2.750 kg de pommes à 4,50€ le kg coûtent… ? » dans lequel exprimer 4,50€ x 2,750 sous forme d'une somme devient complexe. L'importance d'une installation progressive est donc soulignée afin de permettre la construction du sens, nécessaire à l'automatisation.

B. Affinement de la compréhension des nombres : relation entre les nombres

Une bonne compréhension des nombres permet d'instaurer une relation d'ordre et d'être capable de les comparer et de les placer dans un encadrement (notion de « plus petit » et « plus grand » par exemple). Les programmes du cycle 3 indiquent trois notions à travailler (Durepaire et Megard, 2010 ; Noirfalise et Matheron, 2009) :

* La <u>décomposition additive</u> qui permet d'établir des relations entre des nombres d'usage courant. Elle doit être particulièrement maîtrisée pour les nombres 100 et 1000.

* Les <u>notions de moitié (ou demi), double, triple, quart</u> qui font appel à des relations fondamentales entre les nombres. Elles doivent être connues « par cœur » et ne sont pas nécessairement reliées aux fractions.

* La <u>notion de multiple</u> (réversibilité multiplication/division), qui est abordée à partir du CE2. Elle permet de mettre en évidence des caractéristiques de certains nombres (ex : dans 40, il y a 8 fois le nombre 5) et est en cela un fondement à l'apprentissage de la division.

II/ La numération entière : modèle théorique du Triple Code

Le modèle du Triple Code (Dehaene et Cohen, 1992, 1995, 2000) est conçu d'après une architecture modulaire du traitement du nombre. Il est composé de trois codes : oral, arabe et analogique. Les deux premiers sont symboliques et permettent d'effectuer des calculs précis. Le troisième est non symbolique, permet de représenter la quantité associée à un nombre et est modélisé sous la forme d'une ligne numérique compressible. Ces trois codes entretiennent des relations deux à deux qui interviennent selon des situations spécifiques.

A. Le code analogique

Le code analogique est le sens que l'on donne aux nombres. Il sert pour les comparaisons numériques et les calculs approximatifs et permet d'évaluer précisément des petites quantités et approximativement de grandes quantités, mais ne permet pas le calcul précis au-delà des petites quantités. Il est quasi inné et non symbolique.

Classiquement, les nombres sont modélisés par une ligne numérique mentale. C'est à ce niveau que s'élaborerait le sens premier des nombres et du calcul et c'est au niveau de la représentation analogique que se trouverait l'information sémantique (Dehaene, Molko et Cohen, 2004). Cette information serait codée sur une ligne numérique mentale où les nombres seraient alignés mentalement et où chaque position correspondrait à une certaine quantité (Dehaene, 1996). Siegler et Booth (2004) ont montré que cette ligne numérique mentale est imprécise avant l'entrée à l'école primaire et que la précision des estimations s'améliore ensuite. Une hypothèse est que les exercices répétés de dénombrement et de calcul ainsi que la compréhension du système de numération favorisent cette précision des représentations numériques mentales. Les enfants apprennent que les grands nombres, avec leurs nombreux chiffres, représentent une grande collection et cela avant même de pouvoir déterminer précisément à quel grand nombre correspond exactement cette collection. Ils comprennent également que les additions et les soustractions changent la valeur numérique des collections, sans connaitre le nombre exact (« là il y en a plus », « là il y en a moins »). C'est à partir de ces connaissances que va s'élaborer la ligne numérique mentale, qu'elle va s'affiner, devenir plus précise et que l'enfant va apprendre « le système arithmétique formel » (Bideaud et Lehalle, 2004).

B. Le code oral

La représentation orale d'un nombre est sa forme auditivo-verbale. Elle sert dans des tâches telles que le comptage ou encore la récupération des faits arithmétiques stockés sous forme d'associations verbales. La chaîne numérique verbale est une des premières acquisitions numériques de l'enfant. Elle s'acquiert entre 2 et 6 ans. En 1982, Fuson, Richard et Briars (cité par Saad, 2010) ont décrit des étapes : 1) la chaîne non stable et non conventionnelle, 2) la chaîne stable et non conventionnelle, 3) la chaine stable et conventionnelle. 4) L'enfant passe par ces différentes étapes à son rythme pour, vers 6-7 ans, atteindre le niveau « chaîne terminale » où il peut compter d'un nombre jusqu'à l'autre ou bien « n » nombres à partir de « x », plus facilement en avant qu'à rebours. L'acquisition de

cette chaîne numérique est un marqueur prédictif dans les compétences futures en mathématique (Fuson et Richards, 1982).

C. Le code arabe

Le système de numération en base 10 est un système décimal. Il est aujourd'hui représenté par la numérotation arabe avec des chiffres de zéro à neuf[1], dont les unités sont de type positionnel. Les groupements de chiffres se font par 10 et sont réguliers, ce qui rend le système régulier. Les plus petits groupements (unités) se placent à droite et l'on se décale vers la gauche à chaque nouveau groupement de 10 (avec 10 unités, on fait 1 dizaine ; avec 10 dizaines, on fait une centaine, etc.). Le « zéro » représente l'absence d'unité dans le groupement de 10 correspondant à sa position. Par exemple, dans 405, il y a 4 groupements de 10 dizaines (4 centaines), 5 unités mais rien dans le groupement des dizaines (groupement de 10 unités). Ainsi, on peut distinguer 45 de 405. Ce système positionnel permet aussi la désignation et la manipulation des décimaux. Le système métrique est également fondé sur la base 10.

Nuerk *et al*. (2004) ont montré que les enfants de CE1 ont tendance à comparer des nombres (à deux chiffres) de manière séquentielle. Ils observent les chiffres composant les nombres un à un, en commençant par se focaliser sur les dizaines puis sur les unités. Cette stratégie deviendrait en CE2 et CM1 « mixte » (séquentielle et parallèle), avec une approche par essais, jusqu'à ne devenir, en fin de CM2, uniquement parallèle, consistant à traiter simultanément les dizaines et les unités des nombres.

III/ Le transcodage

A. Dictée et lecture : les modèles théoriques

La dictée est le passage du code oral au code arabe des nombres tandis que la lecture est le passage du code arabe au code oral des nombres. Le transcodage est une tâche cognitive de haut niveau faisant appel à différents processus à savoir la représentation phonologique du nombre dans la mémoire à court terme, l'accès au lexique, le traitement des règles syntaxiques, la récupération des informations en mémoire à long terme (Moura *et al*., 2015). Différents modèles cognitifs d'explication des processus de transcodage existent.

[1] Les chiffres arabes : 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9

1. Le modèle asémantique (Barrouillet, Camos, Perruchet et Seron, 2004)

Selon le nombre à transcoder (en modalité orale/arabe), celui-ci ne requiert pas nécessairement de représentations sémantiques. L'ADAPT (A Developmental Asemantic Procedurel Transcoding model ; Barrouillet *et al*., 2004) définit une représentation mentale des unités et règles de production afin de les combiner et de transcoder des nombres. Des ressources attentionnelles sont essentielles pour le transcodage. Un effet de fréquence est également trouvé : plus un nombre est rencontré fréquemment, mieux il est maîtrisé.

2. Le modèle connexionniste (Vergus et Fias, 2006)

Il stipule également la présence d'une voie lexicale directe pour passer des représentations arabes à leur correspondant phonologique, sans règle particulière (cela pourrait être comparé à la voie d'adressage dans l'apprentissage de la lecture) et d'une voie syntaxique indirecte afin d'appliquer les règles syntaxiques lors de la conversion nombre arabe/correspondant phonologique.

B. Les types d'erreurs fréquentes

1. Erreurs lexicales

C'est le remplacement par d'autres chiffres d'un ou plusieurs chiffres corrects, en produisant un nombre dont le nombre de chiffres est correct. Elles peuvent être de trois types (d'après le modèle ADAPT de Barrouillet ; Saad, 2010) :

* Erreur de position : la classe lexicale est maintenue mais la position au sein de la classe est erronée (ex : « douze » pour 13)

* Erreur de pile : l'erreur produite appartient à une autre catégorie lexicale, mais la position de la cible et de l'erreur sont identiques dans leur catégorie respective (ex : « quatorze » pour 40).

* Inversion Dizaine/Unité : (ex : « douze » pour 21)

2. Erreurs syntaxiques

C'est lorsqu'il y a une mauvaise structure syntaxique alors que la classe lexicale est respectée. Elles sont de quatre types :

* Ajout d'un ou plusieurs « 0 » (ex : « cent huit » pour 18)

* Suppression d'un « 0 » ou d'un chiffre (ex : « dix-huit » pour 108)

* Transcodage littéral partiel ou complet (ex : 100010050 pour « mille cent cinquante »)

* Insertion de « 1 » entre les dizaines et les unités (ex : 216 pour « vingt-six »)

3. Erreurs combinées (ou mixtes)

C'est lorsqu'il y a des erreurs syntaxiques et lexicales au sein du même nombre (ex : « mille quatre-vingt-seize » pour 169).

C. Les facteurs influençant les habiletés de transcodage

1. Connaissances sémantiques

Imbo, Vanden Bulcke, De Brauwer et Fias (2014) ont montré que les moins bons transcodeurs font significativement plus d'erreurs de transcodage sur les grands nombres à trois chiffres (moyenne de 742) que sur les petits nombres à trois chiffres (moyenne de 251). Cet effet de taille témoigne selon les auteurs que les moins bons transcodeurs utiliseraient leur voie sémantique tandis que les meilleurs transcodeurs ne transiteraient pas par le sens du nombre, mais passeraient directement du code oral au code arabe (ou inversement) par l'application des règles nécessaires.

2. Influence de la langue sur le transcodage

Le système verbal est plus complexe que le système arabe (exemple : « vingt-*et*-un », « soixante-douze »). Le manque de transparence entre la langue orale et le système de base 10 influence l'acquisition des chaînes numériques orale et écrite ainsi que le transcodage d'un code à l'autre. Selon la régularité des systèmes numériques, les performances de transcodage peuvent varier. Le code verbal français est irrégulier et a pour conséquence des performances plus faibles chez les francophones, en transcodage « oral/analogique », qu'en transcodage « arabe/analogique » et « oral/arabe ». Les performances sont meilleures que dans les autres modalités si le transcodage ne fait pas intervenir l'oral (Jarlegan, Fayol et Barouillet, 1996) car les principales difficultés rencontrées par les jeunes francophones proviennent de la longueur phonologique (nombre de syllabes) et de la taille des nombres (nombre de chiffres). Par exemple, il y a des termes irréguliers (onze, douze, etc.) ou bien un mot ne peut désigner qu'une seule quantité : en revanche, le mot « dix » ne représente pas uniquement la quantité « 10 » mais se retrouve dans d'autres nombres. Il faut donc des règles syntaxiques (règles additives et multiplicatives) pour pouvoir désigner des nombres de deux chiffres et plus (ex : « deux cent quatre » suit des règles multiplicative et additive ; « deux fois cent plus quatre »).

De récentes recherches ont suggéré que le transcodage est influencé par la langue et sa syntaxe. Ecrire des nombres sous dictée est plus compliqué pour les enfants issus de pays dont la langue parlée a une syntaxe inversée (= l'ordre des unités et des dizaines est inversé en code oral par rapport à la numération arabe). Par exemple, l'étude d'Imbo *et al.,* (2014) a montré que les néerlandais, dont l'ordre des unités et dizaines est inversé par rapport à l'ordre

en code arabe (ex : 64 est prononcé « quatre et soixante »), font davantage d'erreurs de transcodage que les francophones (syntaxe non inversée). Cette étude montre que la langue maternelle parlée, selon son degré d'opacité et/ou le respect de la syntaxe unité-dizaine, est le meilleur prédicteur du nombre d'erreurs d'inversion en transcodage. Le degré de transparence d'une langue interfère aussi sur le transcodage (Klein *et al.*, 2013). Plus une langue est opaque, plus le nombre d'erreurs de transcodage est élevé. En effet, les enfants parlant une langue « transparente » ont moins de problèmes pour apprendre les bases des compétences arithmétiques, en particulier les enfants de langue asiatique (Comrie, 2005). Par exemple, en japonais, 452 est littéralement traduit « quatre-cent-cinq-dix-deux ». De plus, l'étude de Comrie révèle que les meilleurs transcodeurs ont des résultats significativement meilleurs en mathématiques que les moins bons transcodeurs.

3. Apprentissage du transcodage

Le lexique numérique et les principes de base de la syntaxe de la numération sont déjà acquis avant l'école élémentaire. Dès les premières années, le développement des habiletés de transcodage des nombres est fortement influencé par la longueur du nombre (nombre de chiffres) et sa complexité syntaxique (Moura *et al.*, 2015). Au début du CE1, l'enfant sait écrire un nombre à 2 chiffres et a plus de mal avec les nombres à 3 ou 4 chiffres (Camos, 2008). La principale difficulté est due à la syntaxe dans les grands nombres. C'est à ce moment que les règles syntaxiques sont introduites en classe. En CE2 et CM1, l'accent est porté sur le transcodage des nombres à 3 et 4 chiffres, avec des structures syntaxiques plus complexes (« zéro » intercalaire) (Moura *et al.*, 2013). Le transcodage des nombres à 4 chiffres est pleinement acquis en CM2 (Noël et Turconi, 1999).

IV/ Les fractions

Les fractions font partie de notre quotidien (parts de gâteaux, etc.) et sont essentielles car elles permettent de pallier l'insuffisance des nombres entiers et d'affiner les représentations des nombres sur la ligne numérique mentale en permettant des positionnements plus fins. Il existe une différence importante entre l'acquisition de l'ensemble des nombres naturels et les connaissances des fractions, leur mode de fonctionnement étant différent et leur compréhension pouvant être difficile à acquérir (Wang et Siegler, 2013). Pourtant, de récentes études ont avancé l'idée que ces dernières joueraient un rôle central dans l'apprentissage des mathématiques au sens large. La précision des représentations de grandeur joue un rôle central avec les fractions et avec les nombres en

général : améliorer ses représentations de grandeur des fractions améliore les autres capacités mathématiques.

Deux distinctions sont à faire pour comprendre le développement de la connaissance des fractions :

- *Les connaissances conceptuelles et celles des procédures* : Si les premières incluent la compréhension des propriétés des fractions (leurs grandeurs, leurs principes et leurs notations), la seconde nécessite d'être à l'aise avec les quatre opérations (addition, soustraction, multiplication et division).
- *Les connaissances symboliques et non-symboliques* : les connaissances symboliques induisent des compétences avec les représentations conventionnelles (et réfèrent donc au code arabe des nombres du modèle du Triple Code), alors que les non-symboliques nécessitent des compétences avec des stimuli concrets (et réfèrent donc au code analogique des nombres du modèle du Triple Code).

A. Le vocabulaire des fractions

« Le terme fraction est couramment utilisé pour désigner une écriture fractionnaire d'un nombre rationnel, que, jusqu'à la fin du collège, on appelle aujourd'hui nombre fractionnel » (Durepaire et Megard, 2010). Une fraction se présente sous la forme « $\frac{a}{b}$ » où a est appelé numérateur, b dénominateur et le trait qui les sépare « trait de fraction ». Le nombre rationnel $\frac{a}{b}$ est l'unique solution de l'équation de l'inconnue x : [x x b = a] où a est un entier naturel quelconque et b un nombre entier naturel non nul. Lorsque le numérateur et le dénominateur sont entiers entre eux, on parle de « fraction irréductible ». Par exemple, $\frac{4}{5}$ est l'écriture irréductible de $\frac{16}{20}$ car $\frac{4}{5} = \frac{16}{20}$ et 4 et 5 sont premiers entre eux. Une « fraction décimale » est une écriture fractionnaire dont le dénominateur est une puissance de 10 (Durepaire et Megard, 2010). Par exemple, $\frac{8}{10}$ est l'écriture fractionnelle décimale des nombres rationnels $\frac{16}{20}$ et $\frac{4}{5}$. Les nombres rationnels qui possèdent une écriture fractionnaire décimale sont appelés « nombres décimaux ». Ainsi, tous les nombres décimaux sont rationnels. Mais la réciproque n'est pas valable car, par exemple, $\frac{1}{3}$ est rationnel mais non décimal (n'a pas de dénominateur étant une puissance de 10 possible).

B. L'apprentissage des fractions

De plus en plus d'études tentent d'établir un modèle de développement des fractions. Les recherches amènent à distinguer les acquisitions des fractions d'un point de vue

conceptuel et procédural. Vukovic *et al.* (2014) ont montré que les connaissances conceptuelles des fractions ont un plus grand effet sur le développement de leurs compétences procédurales, avec un aspect plus généralisable à d'autres apprentissages, que les compétences procédurales en elles-mêmes. Par exemple, des enfants de 4 ans et demi sont capable de résoudre des problèmes comportant des notions implicites de fractions, sans connaissance mathématique apprise en classe (Mix, Levine et Huttenlocher, 1999). Si les connaissances conceptuelles sont relatées dans les compétences fractionnaires (estimation, calcul et résolution de problèmes), la maîtrise de l'ensemble des nombres entiers n'est évoquée que pour le calcul de fractions : les compétences en mathématiques ne servent pas toutes avec la même importance dans l'apprentissage des fractions (Moreover, Hecht *et al.,* 2003). Les compétences générales (langage, attention, mémoire visuospatiale, etc) facilitent l'apprentissage des connaissances en mathématiques et constituent une base pour le futur apprentissage des fractions, mais elles ne sont pas directement corrélées aux fractions (Vukovic *et al*., 2014). L'étude précise aussi que les compétences générales et numériques jouent des rôles différents dans le passage des connaissances conceptuelles des nombres entiers à celles des fractions. Le concept de fraction émerge avec les premières compétences en numération. L'apprentissage des fractions ne serait pas qu'une extension d'autres compétences mathématiques et cet apprentissage se construirait à travers de multiples autres connaissances. L'étude de Vukovic *et al.* (2014) suggère que les enfants construiraient le concept des fractions parallèlement à celui des nombres entiers et au développement de leur raisonnement, dès l'acquisition des premières compétences numériques. Leur étude a montré que la capacité des enfants à identifier et à manipuler les petites quantités influait sur l'apprentissage des fractions.

Les difficultés à apprendre les fractions à l'école primaire sont un prédicteur plus fort que les autres compétences mathématiques des futures compétences dans le secondaire (Saturnin et Morel, 2013). Une fraction peut répondre à trois types d'opérations : un fractionnement (partage en unités égales), un rapport (pourcentage, probabilité et échelle) ou une mesure. Les élèves arriveraient mieux, au début de l'apprentissage, à comparer des fractions sous forme symbolique représentant des aires, puis des segments de droite, puis des représentations graphiques (Ni, 2001). Si les bases solides en numération, acquises dans les classes précédentes, sont importantes, cette connaissance des nombres peut aussi constituer un biais et interférer dans l'apprentissage des fractions. En effet, une erreur fréquente se trouve dans la comparaison de fractions. Par exemple, un enfant aura tendance à déclarer que $\frac{1}{4}$ est

plus grand que $\frac{1}{2}$ car 4 est plus grand que 2. Pour ne pas faire cette erreur, il est nécessaire de considérer la fraction comme une seule entité numérique. Stafylidou et Vosniadou (2004) disent que cette conceptualisation se ferait entre le CM2 et la 6ème. Les erreurs initiales seraient donc normales et un apprentissage chronologique respectueux du développement de l'enfant est important.

Il est préconisé (Durepaire et Megard, 2010) de commencer l'apprentissage des fractions avec la notion de « demi » car c'est la représentation fractionnaire la plus facile à comprendre et c'est le concept le plus simple à maitriser pour l'enfant (Mazzocco, Myers, Lewis, Hanich et Murphy, 2013). De plus, cette précision est meilleure lorsqu'il y a une représentation visuelle imagée (ex : des parts de tarte) que quand les fractions sont présentées avec des nombres arabes (Stafylidou et Vosniadou, 2004). Les fractions avec dénominateur commun sont aussi plus aisées pour l'enfant à comparer, les connaissances du nombre entier fonctionnant dans ce cas ($\frac{3}{8} < \frac{5}{8}$ car 3 < 5). Cette préconisation (Durepaire et Megard, 2010) est remise en cause depuis quelques années, notamment dans l'étude de Wang et Siegler (2013). Cette dernière confirme l'aspect crucial de l'acquisition des compétences des fractions dans le développement numérique et l'apprentissage des mathématiques car les connaissances des fractions des élèves de classes élémentaires sont prédictives des performances plus avancées en mathématiques dans l'enseignement secondaire. Cependant, l'étude rappelle que les fractions et les nombres décimaux, même s'ils sont différents symboliquement, sont juste une manière différente de représenter les mêmes grandeurs. Lier les connaissances des fractions et des nombres décimaux peut donc augmenter la compréhension de la magnitude qui sous-tend ces deux systèmes de nombres et peut aider à construire et intégrer le concept des nombres rationnels. Or, les représentations de grandeur sont plus précises et linéaires pour les fractions décimales que pour les fractions ordinaires. L'étude a démontré que l'entrainement sur une ligne numérique améliorait les représentations mentales des grandeurs des fractions plus que d'autres types d'exercices et améliorait la conversion de fractions décimales en fractions ordinaires. Actuellement, les fractions décimales sont apprises plus tard que les fractions ordinaires et elles sont pourtant mieux sues : la compréhension des fractions décimales apparaît plus facile pour l'enfant.

V/ La dyscalculie développementale

A. Définition

Ce mémoire s'appuie sur l'hypothèse que la dyscalculie est un trouble neurodéveloppemental d'origine biologique qui a des répercussions sur les apprentissages ainsi que sur la vie quotidienne. Ce trouble s'exprime par un niveau inférieur en mathématiques à ce qui est attendu pour l'âge avec, notamment, des difficultés à comparer des nombres, effectuer des calculs ou résoudre un problème mathématique, cela sans trouble sensoriel, moteur ou mental. La personne doit également évoluer dans un environnement suffisamment stimulant (DSM V, 2013). L'avancée de l'imagerie cérébrale montre une activation plus faible du sillon intrapariétal lors de tâches mathématiques (Kucian *et al.*, 2011). La dyscalculie peut être isolée ou bien associée, notamment à d'autres troubles « dys ». De plus, la dyscalculie peut être primaire ou secondaire, c'est-à-dire conséquente à une atteinte cognitive telle qu'un trouble des fonctions exécutives, d'un trouble de la mémoire de travail, etc. (Von Aster et Shalev, 2007).

B. Déficit du sens du nombre

D'après le modèle du triple code (Dehaene, 1992) et le modèle développemental numérique (Von Aster et Shalev, 2007), la dyscalculie primaire vient d'un déficit du sens du nombre, c'est-à-dire d'une difficulté au niveau du système analogique qui perturberait les comparaisons numériques et les calculs approximatifs.

C. Déficit d'accès au sens du nombre

Rousselle et Noël (2007) ont avancé l'idée que la dyscalculie relève d'un déficit d'accès aux représentations numériques mentales en montrant que des enfants dyscalculiques de 7-8 ans avaient de moins bons résultats que des non-dyscalculiques lors de tâches de comparaison de nombres arabes mais qu'ils obtenaient les mêmes résultats dans des tâches de comparaison de points. D'autres études vont dans ce sens, notamment celle d'Andersson et Östergren (2012) qui a montré que des enfants dyscalculiques de 10-12 ans avaient des performances similaires au groupe de non-dyscalculiques dans une tâche de comparaison de points mais qu'ils étaient plus lents dans des tâches de comparaison de nombres arabes. Ce déficit d'accès aux représentations numériques mentales serait un trouble initial de la dyscalculie, qui perturberait par la suite l'élaboration du SNA et impacterait l'apprentissage du sens du nombre en lui-même (Lafay *et al.*, 2014). Mais ce déficit d'accès au sens du

nombre n'est pas la seule cause de dyscalculie. Celle-ci aurait en effet de multiples causes (Noël, De Visscher et Rousselle, 2013).

En résumé, l'absence de consensus quant à une atteinte du déficit du sens du nombre ou de l'accès au sens du nombre via le code arabe des nombres pourrait laisser penser à différents profils de dyscalculie développementale. Une étude a d'ailleurs soulevé des différences d'erreurs pour de mêmes épreuves chez deux enfants dyscalculiques (Iuculano, Tang, Hall et Butterworth, 2008). Le premier enfant avait des difficultés pour les tâches symboliques et pour les tâches non symboliques, suggérant un déficit du sens du nombre, alors que le second enfant avait des difficultés pour les tâches symboliques, mais des habiletés adéquates pour les tâches non symboliques, allant dans le sens de l'hypothèse du déficit d'accès de Rousselle et Noël (2007).

D. Le transcodage chez les dyscalculiques

Lire et écrire des nombres est un obstacle important pour des enfants dyscalculiques de 7 ans (Geary *et al*., 1999). En milieu d'école primaire, ils ont un taux d'erreurs plus important que les enfants non-dyscalculiques aux tâches de dictée en nombres arabes (surtout à 3 et 4 chiffres), la syntaxe et l'acquisition du lexique mathématique étant plus complexes. L'analyse de la gestion de la complexité syntaxique via une tâche de transcodage de nombres arabes se révèle être un bon outil diagnostic de dyscalculie chez les enfants du CP au CM1 (Moura *et al*., 2013), avec un effet de taille décroissant selon la classe (résultats des enfants dyscalculiques significativement moins bons que les contrôles). Cependant, la tâche d'écriture de nombres arabes ne serait véritablement précise qu'en CP et CE1, mais trop simple pour détecter des difficultés en CE2 et CM1, à moins d'une complexification syntaxique. Le déficit d'écriture des nombres arabes étant compensable avec le temps, cela rend la fiabilité de la tâche moins stable (Moura *et al.*, 2015).

Vers 8-9 ans, les difficultés de transcodage pourraient être déjà surmontées (Landerl, Bevan et Butterworth, 2004) ou réduites à une simple lenteur d'exécution (Van Loobbroek *et al*., 2009) : les enfants dyscalculiques de 9 ans ont besoin de plus de temps pour écrire les grands nombres. Dans l'étude de Van Loobbroek *et al*. (2009), le groupe contrôle a aussi rencontré un effet de longueur avec les nombres à 2 et 3 chiffres, l'effet était plus fort que chez les sujets dyscalculiques (l'hypothèse est qu'ils utiliseraient leur voie sémantique), d'où l'importance d'un diagnostic le plus précoce possible. De plus, avec un allongement des nombres à transcoder, l'effet de la mémoire de travail est aussi à prendre en compte. En effet, lorsque cette dernière est déficitaire, on retrouve aussi des erreurs de transcodage (Camos,

2008), rendant cette tâche non uniquement prédictive d'une dyscalculie. Cependant, il a aussi été montré que les moins bons transcodeurs avaient une mémoire de travail moins efficiente avec, entre autres, de moins bons résultats en empan immédiat de chiffres et en empan différé de lettres (Butterworth, 2005).

E. Les fractions chez les dyscalculiques

Comme évoqué précédemment (cf. paragraphe IV/B), une bonne conceptualisation du nombre entier est nécessaire à l'apprentissage des fractions. Or, les personnes dyscalculiques présentent des lacunes au niveau de la mise en place du sens du nombre ou bien de son accès, qui ont elles-mêmes des répercussions sur le renforcement dudit sens du nombre et de l'affinement de la ligne numérique mentale. Cette déficience va également perturber l'apprentissage des fractions. Mazzocco *et al.* (2013) ont souligné des difficultés en comparaison de fractions chez les dyscalculiques supérieures à celles rencontrées par le groupe contrôle et par un groupe ayant des troubles des apprentissages autres qu'en mathématiques. Il est à noter que les trois groupes rencontrent des difficultés en comparaison de fractions du CM1 à la 4ème. Les connaissances antérieures des enfants dyscalculiques sur les nombres entiers peuvent perturber la compréhension de ce que représente la fraction. Par exemple, si un enfant a bien acquis que « deux » est plus petit que « quatre », il lui faudra un temps pour intégrer que « $\frac{1}{4}$ » est plus petit que « $\frac{1}{2}$ » (biais numérique). Cela les empêcherait également d'intégrer le fonctionnement des fractions « un demi » (ayant « 2 » comme dénominateur) avant la 4ème, compétence nécessaire à la poursuite des apprentissages de fractions plus complexes. Comme pour les autres groupes (« contrôle » et « trouble des apprentissages autre »), les fractions de type « un demi » sont tout de même les mieux traitées. Si les compétences en présentation arabe sont meilleures chez les sujets ayant un trouble autre des apprentissages par rapport au groupe de dyscalculiques, ces compétences s'équilibrent en présentation analogique. Cependant, l'incapacité à conceptualiser le concept de fractions, même les plus simples (de type « un demi ») fait que les enfants dyscalculiques, ne pourront pas généraliser à des fractions plus complexes, et ce jusqu'en 4ème (13/14 ans).

VI/ Evaluation de la numération : le bilan orthophonique

A. Outils existants

Un article de Lafay, St-Pierre et Macoir (2014) recensant les outils d'évaluation des habiletés mathématiques disponibles soulève le peu de matériel disponible dans ce domaine.

Le marché est d'autant plus pauvre que l'âge de l'enfant augmente. Les tests en numération étalonnés pour la tranche d'âge concernée par le présent mémoire sont très peu nombreux et ne sont souvent qu'une infime partie (quelques items) d'un test plus général. Le tableau 1, inspiré de l'article et complété avec le Tedi-Math Grands sorti après la publication de l'article, résume les outils francophones disponibles par compétences évaluées. Aucun test ne permet une évaluation complète de la numération entière. Un seul permet une évaluation de la numération fractionnaire. Cinq tests évaluent le transcodage, un seul test évalue la numération décimale et un seul le système positionnel en base 10.

Tableau 1 : ***Outils francophones évaluant la numération***

Nom du test ou de la batterie	**Age**	**Numération décimale**	**Transcodage**	**Fractions**	**Système positionnel en base 10**
Numerical (Gaillard, 2000)	7 à 10				
UDN 2 (Meljac, Lemmel, 1999)	4 à 11				
Koppel (1998)	/				
Zakeri-R (Dellatolas et Von Aster, 2006)	6 à 11 ½				
Tedi-Math Grands (Noël, Grégoire, 2015)	8 à 13				

B. Validité psychométrique d'un test

1. Pourquoi normaliser des épreuves ?

La numération et le transcodage sont importants dans les programmes scolaires et les mathématiques prennent de la place au sein de notre société et dans la vie quotidienne. De plus, peu d'épreuves existent permettant d'évaluer ces compétences. Or, les études menées auprès des populations dyscalculiques ont montré que les enfants dyscalculiques avaient des difficultés marquées en numération et en transcodage, avec des types d'erreurs particuliers, que cela allait au-delà d'un simple retard et s'en distinguait. Il apparaît donc nécessaire de normaliser des épreuves précises de numération afin de connaitre le niveau réel des enfants de cet âge et pouvoir détecter au mieux ceux qui seraient dyscalculiques, de par leurs performances moindres aux épreuves ainsi que par la nature de leurs erreurs.

2. Les différentes étapes de validation des épreuves

L'objectif de ce mémoire est la pré-validation du module de numération de la future batterie informatisée Examath. Le présent mémoire vise plus particulièrement quatre points spécifiques : la standardisation des épreuves de numération ; l'analyse de la validité de contenu et de construit théorique ; l'analyse de la validité convergente ; l'analyse de la validité discriminante.

Pour cela, une version préliminaire de ce test a été créée par les conceptrices (Lafay et Helloin) sous forme de PowerPoint. Le but de ce support est d'avoir des épreuves standardisées. Dans la version finale, les dictées de nombres, par exemple, seront lues par le logiciel, mettant ainsi tous les enfants dans les mêmes conditions standardisées. Dans les tests existants, ce type d'épreuves est dicté par l'orthophoniste, ce qui peut introduire des biais selon chaque personne (articulation, vitesse de lecture, prosodie, etc.). Pour le mémoire, un seul examinateur a fait passer l'ensemble des épreuves aux enfants, en lisant les consignes affichées sur la version préliminaire, et le plus possible, de la même façon.

De plus, la qualité d'un test se mesure aussi à sa validité. La *validité de contenu* et de *construit théorique* qui est en lien direct avec les modèles théoriques sur lequel un test est développé (les parties précédentes ont pu mettre en évidence une bonne validité du contenu d'Examath). La *validité convergente* qui est évaluée en comparant les résultats obtenus à Examath à ceux de tests existants au moyen d'un test de corrélation de Pearson (ici l'EDA[2] pour la dictée et la lecture de nombres). La validité discriminante est également évaluée en comparant les résultats obtenus par le groupe d'enfants dyscalculiques et le groupe contrôle.

C. Présentation du logiciel Examath

Examath (Lafay et Helloin, en préparation) est un outil en cours de développement qui vise l'évaluation des habiletés mathématiques chez les enfants de 8 à 15 ans. Il se compose de 6 modules : traitement du nombre, numérations, arithmétique, mesures, résolution de problèmes, langage et raisonnement. Le présent mémoire se consacre au module 2 visant l'évaluation de la numération.

Le module de numération d'Examath est composé de 8 épreuves, numérotées de 7 à 14. Les épreuves 7 à 11 évaluent de la numération entière tandis que les épreuves 12 à 14 testent les numérations décimales et fractionnaires. Les différentes épreuves seront décrites plus précisément dans la partie « Méthodologie ».

[2] EDA : Evaluation Des fonctions cognitives et des Apprentissages, Billard et Touzin , 2012

PARTIE EXPERIMENTALE

I/ Problématique

La compréhension du système de numération est une compétence indispensable à la compréhension et la manipulation des nombres pour réaliser des calculs et résoudre des problèmes par exemple. Très peu d'outils sont consacrés à cette compétence (Lafay, St-Pierre et Macoir, 2014) avec, de plus, fréquemment peu d'items proposés pour chaque épreuve, et presque tous d'après un modèle structuraliste (Piaget), ne tenant pas compte des modèles neuropsychologiques proposés[3]. Enfin, ces outils ne sont pas tous normalisés. Un des modules de la batterie informatisée Examath (Lafay et Helloin, en préparation), concernant la tranche d'âge 8-15 ans, est dévolu à une évaluation de la numération au moyen de 8 épreuves.

II/ Objectifs

L'objectif de ce mémoire est de vérifier le caractère discriminant et convergent des épreuves de numération de la batterie Examath et leur sensibilité en :

- Comparant les résultats obtenus aux différentes épreuves entre des sujets suivis pour rééducation du calcul et du raisonnement logico-mathématique (appelé « groupe dyscalculique ») et un groupe contrôle (ou sujets sains).
- Mettant en relation les résultats obtenus à une partie des épreuves expérimentales et une épreuve déjà publiée et validée.

III/ Hypothèses

L'évaluation devrait mettre en évidence des différences significatives dans les résultats des deux groupes : nous supposons que le groupe contrôle aura des résultats supérieurs à ceux du groupe dyscalculique aux épreuves d'Examath.

De plus, nous supposons qu'une corrélation pourra être objectivée entre certains subtests d'Examath et des épreuves déjà publiées évaluant des compétences de même nature (ici l'EDA pour la dictée et la lecture de nombres).

IV/ Méthodologie

[3] voir Habib Michel, 2014 ; Pessenti et Seron, 2000 pour des synthèses

A. Etude 1 : normalisation de deux tests mathématiques

Etant donné le peu de tests étalonnés existant pour la tranche d'âge 10-12 ans, une normalisation préalable à l'étude principale a dû être effectuée avec deux tests mathématiques : le Tempo Test Rekenen (TTR, Berkhout et Nijmegen, 1992) et le Numeracy Screener (NS, Nosworthy, Bugden, Archibald, Evanc et Ansari, 2013) afin de disposer d'outils de référence permettant de constituer les cohortes pour la phase expérimentale sur les épreuves Examath comme décrit infra. Ils sont initialement respectivement étalonnés avec des enfants néerlandais et canadiens anglophones plus jeunes.

1. Participants

Les critères de sélection sont une scolarisation en classe de CM2 lors de l'année scolaire 2014/2015 et le français comme langue maternelle.

Les critères d'exclusion sont un suivi actuel ou antérieur en orthophonie, un antécédent de trouble spécifique du langage oral, des difficultés d'apprentissages et des troubles en mathématiques avérés.

Au final, 39 enfants ont participé à cette normalisation. Ils étaient âgés de 118 mois (9 ans 10 mois) à 136 mois (11 ans 4 mois), avec une moyenne de 129,97 mois et un écart-type de 4,23 mois. Il y avait 21 filles et 18 garçons. Parmi ces 39 enfants, se trouvaient 35 droitiers, 3 gauchers et 1 ambidextre. Aucun n'avait déjà redoublé, mais 3 avaient sauté une classe.

2. Tests

a) Tempo Test Rekenen (TTR)

Le TTR est un test de fluence arithmétique néerlandais qui comporte cinq listes d'opérations (une pour chaque type d'opération et une les contenant toutes). Il permet d'évaluer les performances en calcul. L'enfant dispose d'une minute pour réaliser chaque liste et résoudre un maximum d'opérations possible. La variable dépendante est le nombre d'opérations correctement résolues pour chaque liste et au total. Le temps est relevé si la liste est complétée entièrement avant la minute impartie. Il est initialement étalonné de 5 ans à 12 ans auprès d'enfants néerlandais. Lors de la normalisation effectuée pour ce présent mémoire, un effet plancher a été constaté pour les séries « divisions » et « opérations mélangées ». Elles n'ont donc pas été prises en compte pour déterminer les profils des enfants.

b) Numeracy Screener (NS)

Le NS est un test de comparaison de quantités. Il sert à identifier la préservation ou le déficit du sens du nombre chez l'enfant via une présentation des nombres en code analogique (ou non symbolique) ou identifier la préservation ou le déficit d'accès au sens du nombre via

les nombres arabes par une présentation des nombres en code arabe (ou symbolique). Il est chronométré en deux séries d'une minute (une minute pour la série non symbolique et une minute pour la série symbolique). Chaque série est composée d'une planche « exemple » puis de quatre planches (soit 56 items). La variable dépendante est le nombre d'items correctement effectués pour chaque modalité. Le temps est relevé si le subtest est complété entièrement avant le temps imparti. Le but est d'indiquer à chaque fois où il y a « le plus de points » ou bien « le nombre le plus grand nombre ». Il a initialement été conçu et normalisé chez des enfants de 5 à 9 ans auprès de sujets canadiens anglophones.

3. Procédure

Pour obtenir des références françaises du TTR et du NS, nous avons proposé une passation collective à trois classes d'élèves de CM2. Chaque enfant a noté ses réponses sur des feuillets de passations personnels. Un relevé individuel des temps de passation a été effectué pour les enfants finissant l'épreuve avant le temps imparti.

B. Etude 2 : validation du module 2 Numération d'Examath

Afin de valider le module Numération d'Examath, une étude a été réalisée en comparant les performances d'enfants contrôles avec celles de dyscalculiques.

1. Participants

a) Groupe contrôle

Les critères de sélection, d'inclusion et d'exclusion sont les mêmes que dans l'étude 1. Vingt-quatre des élèves ayant participé à la normalisation des tests de référence ont été sélectionnés aléatoirement afin de constituer le groupe « contrôle » de cette étude. Il y avait 15 filles et 9 garçons, tous âgés de 118 mois (9 ans 10 mois) à 136 mois (11 ans 4 mois), avec une moyenne de 130,96 mois et un écart-type de 4,32 mois. Parmi ces 24 sujets « contrôles », 21 étaient droitiers, 2 gauchers et 1 est ambidextre.

b) Groupe dyscalculique

Ce groupe a été recruté auprès d'orthophonistes de la région Normandie et en région parisienne. Les critères de recrutement sont une scolarisation en CM2 dans un milieu classique, une langue maternelle française, des difficultés en mathématiques d'au moins 6 mois et un diagnostic, et un suivi en orthophonie pour « rééducation des troubles du calcul et du raisonnement logico mathématique ».

Les critères d'exclusion sont une déficience intellectuelle et/ou sensorielle, des troubles neurologiques, des troubles spécifiques du langage oral et des troubles envahissant du développement (T.E.D).

Ont été inclus dans l'étude les enfants recrutés ayant un écart à la norme avec des résultats en dessous du percentile 10 constatés au NS analogique et/ou arabe et au TTR.

Au final, 12 enfants ont été recrutés dont 10 ont été inclus à l'étude, des troubles associés figurants dans les critères d'exclusion ayant été constatés lors des passations pour les deux enfants non recrutés. Ils étaient âgés de 128 mois (10 ans 8 mois) à 145 mois (12 ans 1 mois), avec une moyenne de 132,83 mois et un écart-type de 7,11 mois. Il y a 7 filles et 5 garçons. Tous étaient droitiers.

2. Tests

a) Evaluation mathématique standardisée

Les deux groupes (« contrôles » et « dyscalculiques ») ont passé le TTR et le NS. Ils ont également passé le module Numération de l'EDA. Il s'agit d'une batterie d'évaluation des fonctions verbales et non-verbales de l'enfant et de ses apprentissages (écriture, écrit, calcul). Cette version enrichie et améliorée de la BREV (Batterie Rapide d'Evaluation des fonctions cognitives, Billard, *et al.*, 2002) s'adresse aux médecins, orthophonistes et psychologues confrontés à des enfants en difficulté d'apprentissage. Elle est étalonnée de la moyenne section de maternelle au CM2 auprès de 626 enfants francophones (français). De ce test, nous avons utilisé les subtests « dictée » et « lecture » de nombres, c'est-à-dire deux fois quatre items[4].

L'objectif de cette évaluation (passation des tests TTR et NS) est de déterminer les sujets qui seront inclus dans l'étude parmi les sujets recrutés. L'évaluation mathématique standardisée sert également à constituer les différents groupes ainsi qu'à dessiner des profils particuliers au sein des différents groupes. Ces tests ont été choisis pour leur rapidité de passation et leur capacité à évaluer : les capacités de calcul pour le TTR ; la présence ou non d'un déficit du sens du nombre ainsi que la capacité à y accéder (via le code arabe ou analogique) pour le NS.

L'objectif de l'évaluation via le subtest Numération de l'EDA est de mettre en relation les résultats obtenus avec une l'épreuve 7 de l'Examath évaluant les mêmes compétences et d'y chercher une corrélation de résultats. Il permet d'évaluer le transcodage arabe/oral et/ou oral arabe pour le module Numération de l'EDA.

[4] 76813, 4012120, 963548, 500005 pour la lecture et 30030, 10100, 45896, 110000 pour la dictée

b) Evaluation expérimentale

Il s'agit de la passation du module 2 Numération de la batterie Examath. Ce module est composé de 8 épreuves (numérotées de 7 à 14) visant chacune à évaluer un aspect précis de la numération. Les épreuves 7 à 11 évaluent la numération entière et celles de 12 à 14 la numération décimale et fractionnaire. Toutes les épreuves du module (annexe 1) commencent par une consigne puis un exemple (sauf les épreuves 8 et 9 qui n'ont pas d'exemple) :

- Epreuve 7 : elle évalue les numérations orale et écrite par le transcodage du code oral au code arabe et inversement.
- Epreuve 8 : elle teste la mémoire à court terme en modalité orale, dans un contexte de grands nombres via la répétition de grands nombres.
- Epreuve 9 : c'est un QCM d'identification d'unités/centaines/dizaine (U/D/C) évaluant la compréhension de la signification des chiffres en fonction de leur position et la précision lexicale.
- Epreuve 10 : elle évalue la compréhension du système de numération entière ainsi que l'accès au sens du nombre via le code arabe des nombres. Elle est composée de 3 subtests que sont la production arabe/analogique, la production analogique/arabe et une épreuve de jugement de correspondance arabe/analogique.
- Epreuve 11 : elle teste la compréhension du nombre et la connaissance des lois de position en proposant un QCM de décomposition additive.
- Epreuve 12 : c'est une identification de fraction par QCM. Elle teste l'accès au sens « partie-tout » des fractions.
- Epreuve 13 : elle évalue la compréhension du rôle de la virgule et la signification des écritures décimales via un test de jugement d'écriture décimale (équivalence entre présentation arabe et analogique).
- Epreuve 14 : c'est une comparaison de fractions qui évalue la connaissance conceptuelle des fractions.

3. Procédure

Pour le groupe « contrôles », la passation s'est faite au sein même du lieu de scolarisation des sujets. Pour les enfants dyscalculiques, elle a eu lieu au cabinet des orthophonistes (sauf un sujet dont la passation a eu lieu à son domicile, pour des raisons d'agenda). Le testing s'est fait de la fin du mois de juin à la première quinzaine de septembre 2015, toujours de manière individuelle. Pour des raisons d'éloignement géographique et d'organisation, certaines passations de la phase expérimentale chez des sujets du groupe

dyscalculique ont été effectuées le même jour que l'évaluation cognitive, en veillant à faire une pause entre les deux phases afin d'éviter des biais de résultats dus à la fatigue.

V/ Résultats

A. Résultats de l'étude 1 : normalisation de deux tests mathématiques

1. Tempo Test Rekenen (TTR)

Une analyse selon une technique de Boostrap a été effectuée pour identifier la note aux sous-tests « Addition + Soustraction + Multiplication » du TTR représentant le seuil de suspicion de trouble fixé au percentile 10. Selon cette analyse, on doit suspecter un trouble lorsque cette note est égale ou inférieure à 43.60 chez les enfants français de 9-10 ans scolarisés en CM2. L'analyse permet aussi de déterminer un intervalle représentant un risque de trouble. L'analyse indique donc qu'un enfant est à risque de trouble arithmétique si sa note se situe dans l'intervalle [37.80 ; 46.60].

2. Numeracy Screnner (NS)

Tout d'abord, parce que certains enfants finissaient l'ensemble des 56 items du NS en modalité arabe, un score de vitesse a été calculé selon la formule suivante : $[\frac{Nombre\ total\ d'item \times 60}{Temps\ mis\ par\ l'enfant}]$. Cette même technique de Boostrap a ensuite été effectuée pour identifier la note représentant le seuil de suspicion de trouble fixé au percentile 10 pour chacun des sous-tests du NS (non-symbolique et symbolique). Selon cette analyse, on doit suspecter un trouble lorsque la note est égale ou inférieure à 36.00 (intervalle [34.00; 39.00]) pour la partie non symbolique (points) et 45.60 (intervalle [42.00; 50.90]) pour la partie symbolique (arabe).

B. Résultats de l'étude 2 : validation du module 2 Numération d'Examath

1. Age

Un test-t (Groupe : Contrôle vs. « Dyscalculiques » DC) a été réalisé sur la variable dépendante « âge ». Les résultats montrent que les deux groupes ne diffèrent pas ($t(32) = -0.66$, $p = .51$).

2. Résultats de l'évaluation cognitive générale

a) TTR

Une Manova (Multivariate ANalyse Of VAriance) a été réalisée pour analyser les résultats au TTR selon le plan expérimental $S_{34} < G_2 >$ où S représente la variable

indépendante Sujet et G représente la variable indépendante Groupe à deux modalités (Contrôle vs. DC). L'analyse des scores montre un effet de Groupe pour les additions (F (1, 32) = 18.84, $p < .001$), les soustractions (F (1, 32) = 19.74, $p < .001$) et les multiplications (F (1, 32) = 11.84, $p = .002$). Le groupe Contrôle a des résultats significativement supérieurs au groupe DC. Les résultats sont rapportés dans le tableau 2.

Tableau 2 : ***Tableau récapitulatif des résultats aux TTR, NS et EDA dans les groupes « contrôle » et « DC »***

	Groupe Contrôle		**Groupe DC**	
	Moyenne	**Ecart-type**	**Moyenne**	**Ecart-type**
Age (en mois)	130.96	4.32	132.20	6.41
Total TTR	57.25	10.32	38.50*	10.26
Total TTR (addition)	22.04	3.46	15.10*	5.80
Total TTR (soustraction)	16.71	4.09	10.00*	3.80
Total TTR (multiplication)	18.83	4.06	13.90*	3.07
Total NS Point	45.92	6.18	27.10*	11.54
Total NS Arabe	54.96	5.25	37.60*	7.47
Total NS (points + arabe)	100.88	9.05	64.70*	16.15
Total EDA Lecture	3.13	1.12	2.20*	1.40
Total EDA Dictée	3.58	1.14	3.00	1.05

* Ces notes diffèrent significativement de celle du groupe Contrôle.

b) Numeracy Screener

Une Manova a été réalisée pour analyser les résultats obtenus à chaque sous-test du NS selon le même plan expérimental. L'analyse des scores révèle un effet de Groupe pour la partie non symbolique (F(1, 32) = 38.51, $p < .001$) et la partie symbolique (F(1, 32) = 59.85, $p < .001$). Le groupe Contrôle a des résultats significativement meilleurs que le groupe DC. Les résultats sont rapportés dans le tableau 2.

c) Module de numération de l'EDA

Une Manova a été réalisée pour analyser les résultats aux épreuves de transcodage de l'EDA selon le même plan expérimental. L'analyse des scores révèle un effet de Groupe en Lecture de nombres (F (1, 32) = 4.18, $p = .049$), mais aucun effet significatif en Dictée de nombres (F (1, 32) = 1.93, $p = .17$). Les résultats sont rapportés dans le tableau 2.

Une analyse de corrélation (Pearson) a été réalisée pour analyser les liens entre les scores aux épreuves de transcodage de l'EDA et les scores au module Numération d'Examath. L'analyse a montré une corrélation positive significative entre les deux variables dépendantes Lecture et Dictée de l'EDA (r = .38, p = .025). Des corrélations positives significatives ont également été relevées entre les épreuves de transcodages de l'EDA et le module Numération d'Examath. Les résultats sont rapportés dans le tableau 3.

Tableau 3 : ***Matrices de corrélation entre EDA et Examath***

	EDA Lecture	**EDA Dictée**	**Examath E7 Lecture S1-99 Temps**	**Examath E7 Lecture S99+ Temps**
EDA Lecture				
EDA Dictée	.384*			
Examath Numération (score total)	.551**	.463**		
Examath E7 Lecture S1-99 Tps	-.614**	-.454**		
Examath E7 Lecture S99+ Tps	-.628**	-.730**	.658**	
E7 (score total)	.456**	.544**	-.497**	-.682**

* La corrélation est significative avec p ≤ 0.05 (bilatérale)

** La corrélation est significative avec p ≤ 0.01 (bilatérale)

d) Synthèse

En résumé, les enfants du groupe DC sont moins performants que les enfants du groupe Contrôle en fluence de calcul mental (addition, soustraction, multiplication), en traitement (i.e., comparaison) des nombres symbolique et non symbolique, suggérant un profil de dyscalculie, ainsi qu'en transcodage arabe/oral (lecture de nombres). En revanche, ils sont aussi performants en transcodage oral/arabe (dictée de nombres) au test standardisé EDA

3. Résultats de l'évaluation expérimentale

Les variables étant distribués suivant la loi normale dans les deux échantillons pour la majorité des séries, des tests paramétriques ont été réalisés pour toutes les variables pour vérifier un effet de Groupe (Contrôle *vs*. DC). Cependant pour quelques scores ou sous-scores, l'un des échantillons ne respectant pas une distribution gaussienne, un test non

paramétrique de Mann-Whitney a été réalisé en sus afin de vérifier la concordance des résultats obtenus. En cas de discordance sur la significativité de la différence, ce sont les conclusions du test non paramétrique qui sont présentés. L'ensemble des résultats est rapporté dans le Tableau 4.

Tableau 4 : ***Résultats du Module 2 d'Examath selon le Groupe***

	Groupe Contrôle		**Groupe DC**	
	Moyenne	**Ecart-type**	**Moyenne**	**Ecart-type**
M2 Total	131.79	13.70	106.70**	9.06
E7 Lecture S 1-99 Tps (/10)	12.38	1.44	13.90*	2.18
E7 Lecture S 99+ Tps (/10)	36.33	14.11	47.10	17.55
E7 Lecture S 1-99 score (/10)	10.00	0.00	9.90	0.32
E7 Lecture S 99+ scores (/10)	9.04	1.40	7.90*	1.60
E7 Dictée S 1-99 Score (/10)	10.00	0.00	10.00	0.00
E7 Dictée S99+ score (/10)	9.29	1.55	7.90*	2.77
E7 Lecture score (/20)	19.04	1.40	17.80*	1.69
E7 Dictée score (/20)	19.29	1.55	17.90	2.77
E7 Total (/40)	38.63	2.24	35.80*	3.99
E8 (/10)	7.75	1.45	6.60*	1.26
E9 (/15)	11.29	2.40	10.00	1.94
E10a (/18)	17.58	1.84	15.00**	3.16
E10b (/6)	5.79	0.41	5.00**	1.25
E10c (/6)	5.91	0.29	5.50**	0.53
E10 Total (/30)	29.21	2.04	25.50**	3.81
E11 (/12)	11.25	2.15	9.80*	1.87
E12 (/34)	22.25	6.10	13.10**	2.38
E13 (/12)	6.13	2.49	5.40	2.37
E14 (/10)	5.29	3.14	0.00**	0.00

* La différence avec le groupe contrôle est significative avec $p \leq 0.05$ (bilatérale)

** La différence avec le groupe contrôle est significative avec $p \leq 0.01$ (bilatérale)

a) Transcodage (E7)

Une Manova (score et temps en lecture) et un test de Mann-Whitney (score en dictée série 99+) ont été réalisés pour analyser les résultats à l'épreuve de transcodage du module Numération d'Examath selon le même plan expérimental.

i. Lecture

L'analyse des scores révèle un effet de Groupe significatif en « temps » pour la série 1-99 (F (1, 32) = 5.80, p = .02) et une tendance à la significativité pour la série 99+ (F (1, 32) = 3.56, p = .068). Les scores en « lecture » ne sont pas significativement différents entre les deux groupes pour la série 1-99 (F (1, 32) = 2.51, p = .12) mais ils le sont pour la série 99+ (F (1, 32) = 4.34, p = .05). Les DC ne font donc pas davantage d'erreurs en lecture de petits nombres mais sont plus lents que les enfants Contrôle.

Concernant, la correction des épreuves de transcodage de notre étude (EDA et Examath), le type d'erreurs faites a été analysé en plus du score et du temps. Il a été choisi de suivre le modèle ADAPT (Barrouillet *et al.*, 2004) (cf. III/B. p : 4). Une observation qualitative met en évidence que les erreurs les plus fréquentes chez les DC sont les erreurs syntaxiques (en lecture et en dictée). Les résultats sont rapportés dans le tableau 5.

Tableau 5 ***: Tableau récapitulatif des erreurs de transcodage***

	Lecture				**Dictée**		
	Erreurs lexicales	**Erreurs syntaxiques**	**Erreurs mixtes**	**Pas de réponse**	**Erreurs lexicales**	**Erreurs syntaxiques**	**Erreurs mixtes**
Contrôles	8	9	0	0	1	11	3
DC	3	11	1	1	3	17	1

ii. Dictée

Pour la série 1-99, les statistiques descriptives montrent des résultats strictement équivalents pour les deux séries, avec 100% de réussite, il n'y a donc aucun effet de groupe pour ce subtest. Pour la série 99+ analysée, le test non paramétrique de Mann Whitney (bilatéral) indique un effet de Groupe (U (34) = 172.5, p = .024).

b) Répétition de grands nombres (E8)

Un test-t a été réalisé sur la variable dépendante Score. Les résultats montrent que le groupe Contrôle a de meilleurs résultats que le groupe DC (t (32) = 2,18, p = .04).

c) Identification d'U/D/C (E9)

Un test-t a été réalisé sur la variable dépendante Score. Les analyses ne révèlent pas d'effet de Groupe (t (32) = 1,50, p = .27).

d) Relation arabe/analogique sur les U/D/C (E10)

Un test-t a été réalisé sur la variable dépendante Score et a révélé que le groupe Contrôle a des résultats significativement meilleurs que le groupe DC ($t(32) = 3{,}70$, $p = .001$).

De plus, une Manova a été réalisée pour analyser les sous-scores. L'analyse révèle un effet de Groupe significatif pour le Score « arabe → analogique » ($F(1, 31) = 8.48$, $p = .01$), pour le Score « analogique → arabe » ($F(1, 31) = 8.52$, $p = .01$) et pour le Score « jugement » ($F(1, 31) = 8.52$, $p = .01$). Les enfants Contrôle ont de meilleures performances que les enfants DC, quel que soit le sous-score.

e) Décomposition additive (E11)

Un test U de Mann-Whitney a été réalisé sur la variable dépendante Score. L'analyse des résultats montre un effet de Groupe significatif ($U(33) = 172{,}5$, $p = .009$).

f) Identification de fractions par QCM (E12)

Un test-t a été réalisé sur la variable dépendante Score. L'analyse des résultats montre un effet de Groupe significatif ($t(32) = 4.57$, $p < .001$).

g) Jugement d'écriture décimale (E13)

Un test-t a été réalisé sur la variable dépendante Score. Les résultats ne montrent aucun effet de Groupe ($t(32) = .78$, $p = .44$).

h) Comparaison de fractions (E14)

Un test-t a été réalisé sur la variable dépendante Score. L'analyse des résultats montre un effet de Groupe ($t(32) = 5.28$, $p < .001$).

i) Synthèse

En résumé, les enfants du groupe DC sont moins performants que les enfants du groupe Contrôle en vitesse de lecture de petits nombres, en lecture, dictée et répétition de grands nombres, en traitement de relation entre l'arabe et l'analogique, en décomposition additive ainsi qu'en identification et comparaison de fractions. Ils sont aussi marginalement moins performants en vitesse de lecture de grands nombres et en lecture de petits nombres. En revanche, ils sont tout aussi performants en dictée de petits nombres et en identification d'unités/dizaines/centaines.

DISCUSSION

Le but de ce mémoire était de vérifier le caractère discriminant et convergent des épreuves de numération d'Examath. Pour cela, deux hypothèses ont respectivement été formulées, à savoir que le groupe contrôle aurait de meilleurs résultats aux épreuves de numération que le groupe dyscalculique et qu'une corrélation apparaitrait entre le module de numération d'Examath et des épreuves déjà existantes (module de transcodage de l'EDA) testant des compétences de même nature que celle du module 2 de l'Examath.

I/ Interprétation des résultats de l'épreuve expérimentale

A. Hypothèse 1 : meilleurs résultats du groupe contrôle aux épreuves du module 2 Numération d'Examath

L'hypothèse 1 était que les enfants du groupe « contrôle » obtiendraient de meilleurs résultats que ceux du groupe « dyscalculique ». Après analyse des résultats, certaines hypothèses ont été validées mais d'autres ne l'ont été que partiellement (résultats marginalement différents) voire pas du tout (résultats non significatifs).

1. Résultats pour lesquels l'hypothèse est validée

L'hypothèse 1 est validée pour les épreuves pour lesquelles le groupe « contrôle » a obtenu des résultats significativement supérieurs à ceux de groupe « dyscalculique ». Cela a été le cas pour les épreuves de vitesse de lecture de petits nombres (E7), de lecture (E7), de dictée (E7) et répétition de grands nombres (E8), de traitement de relation entre l'arabe et l'analogique (E10), de décomposition additive (E11) ainsi que pour l'identification (E12) et la comparaison (E14) de fractions.

En CM2, les enfants dyscalculiques ont donc acquis les petits nombres mais de façon moins automatisée que les enfants du groupe « contrôle », ce qui ralentit leur vitesse de lecture. Les dyscalculiques ont obtenu de moins bons résultats que les contrôles en lecture de grands nombres alors que les résultats étaient saturés en lecture de petits nombres, ce qui confirme l'impact plus fort de la complexité syntaxique chez les DC (Moura *et al.,* 2013, 2015).

L'hypothèse 1 est également validée, en répétition de grands nombres (E8), les DC ayant été moins performants que le groupe contrôle. Comme ils ont aussi été moins bons en dictée de grands nombres, on peut supposer que ce déficit à répéter des grands nombres pourrait être en partie responsable des difficultés observées en dictée de grands nombres. L'impact de la contrainte en mémoire de travail (MDT) dans cet échec peut poser question.

Cette hypothèse irait dans le sens de l'étude de Von Aster et Shalev (2007) qui évoque une dyscalculie conséquente à une trouble de la MDT. Camos (2008) va aussi dans ce sens en montrant que les erreurs de transcodage sont plus nombreuses en cas de trouble de la MDT.

L'épreuve de décomposition additive (E11) est globalement bien réussie pour les deux groupes, même si une différence significative est notée en faveur des sujets contrôle dont le score moyen est proche de la saturation (effet plafond). L'étude de Noël et Turconi (1999) concluait sur le fait que le transcodage des nombres à 4 chiffres est parfaitement maitrisé en CM2. Diverses études (Landerl, Bevan et Butterworth, 2004, Moura *et al.*, 2015) ont montré la possibilité pour les dyscalculiques de compenser leurs difficultés de transcodage jusqu'à pourvoir les surmonter vers 9 ans. Les résultats de cette épreuve, pour laquelle les nombres les plus grands sont constitués de quatre chiffres, rejoignent les conclusions de ces études sur le transcodage (lecture de nombres arabes), avec cet effet plafond pour les CM2 Contrôle et le taux de réussite élevé des sujets dyscalculiques. Il sera intéressant d'observer si l'épreuve est moins saturée dans les deux niveaux scolaires inférieurs prévus pour cette batterie et l'on peut présumer que l'épreuve sera peu pertinente pour le niveau collège.

Une différence significative entre les deux groupes est retrouvée pour les épreuves de traitement des relations entre représentations arabes et analogiques (E10). Ces résultats étaient attendus si l'on se réfère aux études émettant l'hypothèse d'un déficit d'accès au sens du nombre (Andersson et Ostergren, 2012 ; Rousselle et Noël, 2007). En effet, ces études ont montré que les enfants dyscalculiques sont moins bons que les non-dyscalculiques lorsqu'il s'agit de traiter des nombres arabes mais que leurs compétences sont équivalentes en présentation analogique (points). Ce problème d'accès aux représentations numériques mentales ne leur a pas permis de réaliser correctement ces différentes parties de l'épreuve 10, les nombres arabes étant présents sur la totalité des items (à produire ou à lire).

Les épreuves d'identification (E12) et comparaison de fractions (E14) ont été difficiles pour les deux groupes mais d'autant plus sévèrement échouées pour le groupe « dyscalculique ». Cela met en évidence un déficit de conceptualisation du nombre. Les fractions, notion déjà complexe pour un enfant de CM2 sans dyscalculie apparait donc nécessairement très laborieuse, voire impossible pour un pair dyscalculique. C'est pour cela que dans la version définitive d'Examath, les épreuves contenant des fractions ne seront proposées qu'aux collégiens.

2. Résultats pour lesquels l'hypothèse 1 est partiellement validée

Pour certains exercices, on n'observe qu'une tendance à la significativité des résultats, pour un des critères de scorage. Les enfants du groupe DC sont marginalement moins performants que les enfants du groupe Contrôle. On ne peut donc pas pleinement valider ces critères. C'est le cas pour le score de précision en lecture de petits nombres et la vitesse de lecture de grands nombres.

A l'épreuve de lecture de petits nombres, on peut considérer les items acquis par tous à cet âge. D'après le modèle asémantique de Barrouillet *et al*. (2014), c'est parce qu'il y a un effet de fréquence des petits nombres. En revanche, les DC sont plus lents à lire ces petits nombres (cf. paragraphe I/ A. 1). Cela peut être dû à un manque d'automatisation et à la mise en place de compensations chez les DC qui les ralentiraient. La sous-épreuve « lecture de petits nombres » reste donc pertinente pour la batterie définitive, le critère discriminant à prendre en considération étant le critère de temps.

Si le temps de lecture est significativement différent pour les petits nombres, les deux groupes se rejoignent sur la lecture de grands nombres, notamment à cause du temps de traitement du nombre. Or, les DC font davantage d'erreurs que les contrôles. Ces résultats suggèrent qu'ils ne sont pas conscients de leurs erreurs. S'ils avaient conscience de leurs difficultés, ils prendraient certainement plus de temps pour déchiffrer les nombres afin de réduire leurs nombres d'erreurs. La sous-épreuve « lecture de grands nombres » reste donc pertinente pour la batterie définitive, le critère discriminant à prendre en considération étant le score de précision.

De plus, le type d'erreurs de transcodage diffère d'un groupe à l'autre (cf. tableau 2). Les sujets du groupe Contrôle n'ont fait que des erreurs lexicales (47.06%) ou syntaxiques (54.94%) alors que dans le groupe DC, on retrouve des erreurs lexicales (13.04%), syntaxiques (73.91%), des absences de réponse (8.70%) et des erreurs mixtes lexicales et syntaxiques (4.35%). Une prochaine étude pourrait évaluer de façon plus approfondie les différences de types d'erreurs de transcodage faits par les DC versus les Contrôles et leurs causes éventuelles. On notera également une prédominance d'erreurs syntaxiques dans les deux groupes (69,57% des erreurs faites à l'épreuve E7 sont syntaxiques : 60,60% en lecture et 77,78% en dictée). Ces résultats vont dans le sens de l'étude de Barrouillet *et al.* (2004).

3. Résultats pour lesquels l'hypothèse 1 est invalidée

L'hypothèse 1 n'est pas validée pour certains résultats, les enfants du groupe « contrôle » n'ayant pas obtenu de meilleurs résultats que ceux du groupe « dyscalculique ».

Le cas s'est présenté pour les épreuves de dictée de petits nombres (E7), d'identification d'unités/dizaines/centaines (U/D/C) (E9) et de jugement d'écriture décimale (E13).

Concernant la dictée de petits nombres, l'équivalence des résultats dans les deux groupes peut s'expliquer par le fait qu'à cet âge, les petits nombres sont acquis par tous et compensés chez les sujets dyscalculiques. Cette explication va dans le sens des études de Landerl, Bevan et Butterworh (2004) et Moura *et al*. (2013, 2015).

Dans l'épreuve d'identification d'U/D/C, on remarque qualitativement un nombre plus important d'échecs aux questions « Quel est le **nombre de** (U/D/C) dans… ? » qu'aux questions « Quel est le **chiffre des** (U/D/C) dans… ? », dans les deux groupes. Cela pourrait refléter une imprécision lexicale chez les enfants de CM2 entrainant une mauvaise compréhension de la question, qu'ils soient dyscalculiques ou non. Les difficultés rencontrées dans cette épreuve par l'ensemble des enfants n'apparaissent pas comme dépendantes du facteur dyscalculie, car davantage d'ordre langagier. La formulation « le nombre de » demande plus de réflexion et d'analyse que « le chiffre de ». Cela nécessite plus de lien au sens du nombre alors que la tournure « le chiffre de » est davantage procédurale. Les réponses erronées sur « le nombre de » peuvent aussi signer un facteur attentionnel, l'enfant ne percevant pas la modification de l'énoncé et continuant à répondre sur le même mode. Pour différencier une imprécision lexicale d'un facteur attentionnel ou de réponses impulsives, il pourrait être intéressant de modifier la formulation de la question sous la forme « Combien y a-t-il de (U/D/C) dans… ? » et voir si ces items seraient ainsi moins échoués. En effet, si sur l'ensemble de l'épreuve, 72,73% des réponses données par tous sont justes, seul 49,50% des réponses aux questions « le nombre de » le sont. Les items portant sur le terme « chiffre de » sont globalement compris (87,62% de bonnes réponses) par l'ensemble des enfants, et ne posent pas davantage de problème aux enfants avec dyscalculie à ce niveau scolaire. A noter également 78,43% des items du type « Dans 153, il y 15… unités/centaines/dizaines » ont été réussis, soit en moyenne légèrement plus que pour la globalité de l'exercice.

La batterie étant conçue pour une tranche d'âge plus large que les CM2, on peut s'attendre, d'après les études citées supra, que ces deux épreuves soient davantage discriminantes pour les enfants plus jeunes. Pour l'épreuve d'identification d'U/D/C, il sera intéressant de noter lors des expérimentations ultérieures auprès d'enfants sains scolarisés au collège, si la précision lexicale s'accroit avec une diminution des échecs aux questions portant sur « le nombre de ».

Si, à l'épreuve de jugement d'écriture décimale, les résultats n'ont pas révélé de différences significatives entre les deux groupes, une analyse qualitative a mis en évidence

que les scores sont tout proches du seuil du hasard (6,04/12 pour les Contrôles, 5,64/12 pour les DC), suggérant que cette épreuve était peut-être trop difficile pour cette tranche d'âge et expliquant pourquoi aucune différence significative n'a été mise en évidence. C'est pourquoi il serait pertinent de réserver cette épreuve aux collégiens.

4. Synthèse

L'hypothèse 1 selon laquelle le groupe contrôle obtient de meilleurs résultats aux épreuves du module 2 de Numération d'Examath est globalement validée dans la mesure où les DC se montrent significativement moins performants pour les tests de vitesse de lecture de petits nombres, précision de lecture, dictée et répétition de grands nombres, traitement de relation entre les nombres arabe et analogique, décomposition additive et identification et comparaison de fractions, suggérant une bonne validité discriminante. En revanche, les tests de dictée de petits nombres, d'identification d'U/D/C et de jugement d'écriture décimale ne permettent pas de mettre en évidence des différences entre les deux groupes, suggérant que ces subtests doivent être adaptés pour obtenir une validité discriminante ou seront davantage pertinents pour un autre niveau scolaire. Enfin, pour les critères de précision de lecture de petits nombres et vitesse de lecture de grands nombres, dont la différence de résultats entre les deux groupes n'est que marginalement différente, un échantillon plus grand permettrait une analyse plus fine des performances et d'objectiver ou non une différence significative de niveau entre les groupes. Les deux épreuves sont cependant dès lors validées comme discriminantes pour la version définitive de la batterie dans la mesure où au moins l'un des deux scores des épreuves (précision ou vitesse) est significativement inférieur pour les sujets dyscalculiques.

B. Hypothèse 2 : corrélation entre les subtests du module Numération d'Examath et des épreuves déjà publiées évaluant des compétences de même nature

Le second objectif de ce protocole était de démontrer la validité convergente de certains subtests d'Examath en objectivant des corrélations entre ces subtests et des épreuves déjà publiées (EDA) évaluant des compétences de même nature. L'hypothèse est validée puisqu'une corrélation a effectivement été trouvée entre les épreuves de transcodage de l'EDA et d'Examath. Le fait que les résultats à l'EDA soient saturés est très certainement dû au peu d'items présents (4 items). Cela justifie d'autant plus la nécessité de créer une nouvelle épreuve comportant plus d'items (épreuve 7 d'Examath).

II/ Limites

A. Modalités de recrutement

Les enfants du groupe DC ont été recrutés auprès d'orthophonistes les suivant pour « rééducation des troubles du calcul et du raisonnement logico-mathématique », sans distinction entre les troubles numériques et les troubles du raisonnement. Cela a pu créer une certaine hétérogénéité au sein de ce groupe.

B. Modalités de passation

Par souci d'organisation, certaines passations auprès de la population dyscalculique ont été effectuées en une seule session. La plus grande fatigabilité de ces enfants aurait pu biaiser les résultats. Cependant, pour limiter au maximum cette fatigabilité, une pause a été faite entre l'évaluation cognitive générale préalable et l'évaluation expérimentale.

De plus, les dictées de nombres n'étaient pas préenregistrées. La qualité d'énonciation a pu être fluctuante. Toutefois, pour éviter au maximum cet effet, toutes les dictées de nombres ont été lues par la même personne en veillant à toujours utiliser un même ton neutre et en surveillant son articulation. Afin d'éviter cet éventuel biais, un enregistrement le plus neutre possible des dictées serait à préconiser. Ce sera d'ailleurs le cas dans la version finale de la batterie Examath pour que cette épreuve respecte le critère de standardisation.

C. Items du module 2 d'Examath

Les enfants DC ont des résultats plus faibles que les contrôles à l'épreuve de *Comparaison de fractions*. Cependant, l'épreuve a semblé difficile pour les deux groupes. La totalité des enfants du groupe DC ont obtenu 0/10. Le groupe contrôle a obtenu une moyenne de 5,29/10 dont plus d'un tiers des enfants (34,78%) n'ont pas obtenu la moyenne. La notion évaluée est donc probablement encore fragile en CM2 (car moyenne sous le seuil du hasard), même si elle est présente dans les programmes scolaires de ce niveau et attendue comme acquise à l'entrée en 6ème (Durepaire et Megard, 2010). Les résultats de notre étude incitent à ne proposer cette épreuve dans la version finale de la batterie qu'aux enfants du collège.

Les DC ne semblent pas avoir plus de mal à identifier les groupements d'unités mais ils sont plus en difficulté lorsqu'il s'agit d'établir des relations entre ces groupements. Lors de la passation de l'épreuve *Relation arabe/analogique sur les U/D/C*, il a été remarqué que les enfants (contrôles et DC) étaient plus à l'aise avec les items présentés sous forme de « monnaie » (NB : les items étaient de type « monnaie », « billes » ou « cubes »). Nous pouvons supposer que les enfants sont plus à l'aise avec les items « monnaie », qui correspondent à cet âge-là à une situation plus écologique que les « billes » ou « les cubes ». Le caractère fonctionnel de la monnaie peut avoir influencé les résultats, mais il est

possible aussi que la valeur des pièces et des billets inscrite en nombres arabes sur la monnaie ait pu favoriser la visualisation des quantités et les groupements. Il demeure intéressant de proposer plusieurs supports visuels cependant afin de vérifier si les connaissances sont transférables et généralisables sur des supports moins habituels.

III/ Questionnements et perspectives de recherche

Les résultats de cette étude montrent qu'un ralentissement de vitesse de lecture chez les DC leur permet de devenir aussi performants que les contrôles pour la précision de lecture de petits nombres. Toutefois, cette étude révèle aussi que la vitesse de lecture de grands nombres n'est que marginalement impactée chez les DC alors qu'ils sont moins performants en lecture de grands nombres. Nous pouvons supposer que les enfants contrôle compensent si nécessaire les difficultés rencontrées en ajustant leur temps de traitement, ce que ne font pas ou peu les DC. Une étude complémentaire pourrait être menée afin de comprendre pourquoi, à un niveau de difficulté supérieur, les enfants DC ne ralentissent plus leur vitesse de lecture afin d'essayer de mieux lire, et lisent presqu'aussi vite que les contrôles, au détriment de la qualité de lecture des grands nombres. Il serait effectivement intéressant de savoir s'ils ont conscience de faire des erreurs et si ce non-ralentissement est dû au fait qu'ils savent ne pas correctement lire les grands nombres et préfèrent avancer au plus vite et passer à l'épreuve suivante par exemple.

La question de l'influence du mode de présentation sur les résultats a été soulevée plus haut. Ce point pourrait être approfondi afin d'évaluer plus précisément dans quelle mesure le visuel peut jouer un rôle dans les résultats aux épreuves de numération. Cette étude pourrait aussi être complétée et mise en lien avec l'influence de la familiarité des stimuli sur les réponses données.

A l'ère du numérique où les enfants sont dès leur plus jeune âge habitués aux ordinateurs, l'informatisation de cette batterie de tests aura-t-elle eu une influence sur les résultats des enfants ? Cette influence aura-t-elle été positive, en apportant un support connu et généralement apprécié des enfants, favorisant ainsi la concentration et l'investissement ? Ou au contraire, ce type de support aurait-il pu avoir un impact négatif pour certains choix de réponses ? Une recherche complémentaire pourrait comparer les résultats obtenus en version numérique et en version papier pour le module 2 d'Examath. Toutefois, les compétences ciblées dans d'autres modules de la batterie nécessitent une présentation et un traitement informatisé (présentation très rapide d'items, enregistrement de temps de réaction brefs, etc.).

Le choix du support informatique semble donc être le plus approprié pour un diagnostic précis.

Enfin, nous avons vu l'importance des fractions dans le développement et l'affinement du sens du nombre. Les dyscalculiques ont d'importantes difficultés pour appréhender cette notion. De plus, une distinction a été faite entre les connaissances conceptuelles et procédurales de ces fractions. Savoir les manipuler (additionner, soustraire, etc.) ne signifie pas forcément se représenter leur magnitude. Le module Arithmétique d'Examath propose également des épreuves visant l'évaluation des connaissances procédurales sur les fractions ; il serait intéressant d'investiguer connaissances conceptuelles mais aussi procédurales chez les dyscalculiques. Dans ce mémoire, les fractions sont représentées avec des images (parts de pizza, etc.) afin de permettre un accès au sens de la fraction. Mais ce n'est qu'une seule conceptualisation de la fraction. La fraction représente ici une partie d'un tout. Or, une fraction est aussi une magnitude en tant que telle. Cet aspect ne figurant pas dans la batterie Examath au moment de la réalisation de ce mémoire, une épreuve de ligne numérique pour les fractions a été rajoutée à la batterie et sera proposée aux enfants du collège.

CONCLUSION

Face à l'importance du rôle des mathématiques dans la vie quotidienne, le diagnostic et la prise en charge orthophonique de la dyscalculie est importante, d'autant plus que notre connaissance de ce trouble s'affine au gré de l'avancée des recherches à ce sujet. La création de la batterie d'évaluation Examath vise à pallier le manque d'outils existants et adaptés aux nouveaux modèles théoriques. Dans cette étude, les épreuves du module « Numération » ont révélé leur caractère discriminant entre deux groupes « contrôle » et « dyscalculique » de niveau CM2 pour six d'entre elles. De plus, la corrélation trouvée avec d'autres épreuves existantes évaluant les mêmes compétences en transcodage a montré la validité de convergence des sous-tests d'Examath.

Deux épreuves n'ont pas montré de caractère discriminant. Pour l'une d'entre elles (Identification U/D/C), les difficultés lexicales et de compréhension de la consigne sont partagées par les deux groupes et une modification de la consigne générale a été prévue. Pour l'autre épreuve concernée (Jugement d'écriture décimale), l'appropriation par les enfants de CM2 des compétences évaluées est encore trop limitée et instable. Elle ne sera par la suite proposée dans la version définitive de la batterie qu'aux enfants de niveau collège. De même, à l'issue de cette étude, les épreuves concernant les fractions, quoique discriminantes mais à faible taux de réussite ne seront normalisées lors de l'étalonnage que pour le niveau collège.

Ce module est aujourd'hui un outil valide d'évaluation de la numération, ce qui devrait permettre avec les autres modules de la batterie Examath d'évaluer un large panel de compétences qu'on sait aujourd'hui clés dans le domaine de la cognition mathématique et ainsi faciliter les diagnostics précis de la dyscalculie pour optimiser les projets thérapeutiques des interventions orthophoniques.

BIBLIOGRAPHIE

Andersson, U. et Östergren, R. (2012). Number magnitude processing and basic cognitive functions in children with mathematical learning disabilities. *Learning and Individual Differences*, *22*(6), p. n701 - n714.

Barrouillet, P., Camos, V., Perruchet, P. et Seron, X. (2004). ADAPT: A Developmental, Asemantic, and Procedural Model for Transcoding From Verbal to Arabic Numerals. *Psychological Review*, *111*(2), p. 368

Bideaud, J., Lehalle, H. et Vilette, B. (2004). *La conquête du nombre et ses chemins chez l'enfant*. Presses Univ. Septentrion

Brin, F., Courrier, C., Lederlé, E. et Masy, V. (2011). *Dictionnaire d'orthophonie*. Ortho édition.

Butterworth, B. (2005). Developmental dyscalculia. Dans *Child Neuropsychology: Concepts, Theory, and Practice*, p. n455 - n467.

Camos, V. (2008). Low working memory capacity impedes both efficiency and learning of number transcoding in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *99*(1), p. n37 - n57.

Comrie, B. (2005). Endangered numeral systems. Dans *Bedrohte vielfalt: Aspekte des sprach (en) tods* (p. n203 - n230). Weißensee-Verl.

Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, *44*(1-2), p. n1 - n42.

Dehaene, S. (1996). *La bosse des maths*. Odile Jacob.

Dehaene, S., Molko, N., Cohen, L. et Wilson, A. J. (2004). Arithmetic and the brain. *Current opinion in neurobiology*, *14*(2), p. n218 - n224.

Durpaire, J.-L.et Megard, M. (2010). *Le nombre au cycle 2*.

Fuson, K. C., Richards, J. et Briars, D. J. (1982). The acquisition and elaboration of the number word sequence. Dans *Children's logical and mathematical cognition* (p. n33 - n92). Springer New York.

Habib Michel. (2014). *La constellation des Dys*, De Boeck Solal.

Imbo, I., Vanden Bulcke, C., De Brauwer, J. et Fias, W. (2014). Sixty-four or four-and-sixty? The influence of language and working memory on children's number transcoding. *Frontiers in psychology*, *5*.

Iuculano, T., Tang, J., Hall, C. W. B.et Butterworth, B. (2008). Core information processing deficits in developmental dyscalculia and low numeracy. *Developmental Science*, *11*(5), p. n669 – n680.

Klein, E., Bahnmueller, J., Mann, A., Pixner, S., Kaufmann, L., Nuerk, H. C. et Moeller, K.

(2013). Language influences on numerical development - Inversion effects on multi-digit number processing. *Frontiers in Psychology*, *4*(August), p. n1 - n6.

Kucian, K., Grond, U., Rotzer, S., Henzi, B., Schönmann, C., Plangger, F. et Von Aster, M. (2011). Mental number line training in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage*, *57*(3), p. n782 - n795.

Lafay, A, St-Pierre, M.-C. et Macoir, J. (2014). Revue narrative de littérature relative aux troubles cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale : déficit du sens du nombre ou déficit de l'accès aux représentations numériques mentales. *Canadian Psychology / Psychologie Canadienne*, *56*(1), p. n96.

Lafay, A., St-Pierre, M.-C. et Macoir, J. (2014). L'évaluation des habiletés mathématiques de l'enfant : inventaire critique des outils disponibles. *Glossa*, *116*, p. n33 - n58.

Mazzocco, M. M. M., Myers, G. F., Lewis, K. E., Hanich, L. B. et Murphy, M. M. (2013). Limited knowledge of fraction representations differentiates middle school students with mathematics learning disability (dyscalculia) versus low mathematics achievement. *Journal of Experimental Child Psychology*, *115*(2), p. n371 - n387.

Morel, C. (2013). *L'impact des performances en arithmétique et des compétences cognitives sur le développement des performances liées à la notion de fraction: une étude au CM1* (Mémoire de certificat de capacité, université de Lorraine, France).

Moura, R., Lopes-Silva, J. B., Vieira, L. R., Paiva, G. M., Prado, A. C. d. A., Wood, G. et Haase, V. G. (2015). From "Five" to 5 for 5 Minutes: Arabic Number Transcoding as a Short, Specific, and Sensitive Screening Tool for Mathematics Learning Difficulties. *Archives of Clinical Neuropsychology*, *30*(1), p. n88 - n98.

Moura, R., Wood, G., Pinheiro-Chagas, P., Lonnemann, J., Krinzinger, H., Willmes, K. et Haase, V. G. (2013). Transcoding abilities in typical and atypical mathematics achievers: The role of working memory and procedural and lexical competencies. *Journal of Experimental Child Psychology*, *116*(3), p. n707 - n727.

Ni, Y. (2001). Semantic Domains of Rational Numbers and the Acquisition of Fraction Equivalence. *Contemporary Educational Psychology*, *26(3)*, p. n400 - n417.

Noël, M-P., De Visscher, A. et Rousselle, L. (2013). La dyscalculie développementale : à la croisée de facteurs numériques spécifiques et de facteurs cognitifs généraux. *Développements,* (2), p. n24 - n31.

Noël, M. P. et Turconi, E. (1999). Assessing number transcoding in children. *European Review of Applied Psychology*, *49*(4), p. n295 - n304.

Noirfalise, A. et Matheron, Y. (2009). *Enseigner les mathématiques à l'école primaire.* Vuibert.

Nuerk, H.-C., Kaufmann, L., Zoppoth, S. et Willmes, K. (2004). On the development of the mental number line : more, less, or never holistic with increasing age? *Developmental*

Psychology, *40*(6), p. n1199 - n1211.

Rousselle, L.et 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), p. n361 - n395.

Saad, L. (2010). Transcodage des nombres chez l ' enfant Approche développementale inter-linguistique et différentielle., (Thèse de doctorat, université de Dijon, France), p.245.

Siegler, R. S. et Booth, J. L. (2004). Development of numerical estimation in young children. *Child development*, *75*(2), p. n428 - n444.

Stafylidou, S. et Vosniadou, S. (2004). The development of students' understanding of the numerical value of fractions. *Learning and instruction*, *14*(5), p. n 503 - n518.

Von Aster, M. G. et Shalev, R. S. (2007). Number development and developmental dyscalculia. *Developmental Medicine and Child Neurology*, *49*(11), p. n868 - n873.

Vukovic, R. K., Fuchs, L. S., Geary, D. C., Jordan, N. C., Gersten, R. et Siegler, R. S. (2014). Sources of individual differences in children's understanding of fractions. *Child Development*, *85*(4), p. n1461 - n1476.

Wang, Y. et Siegler, R. S. (2013). Representations of and translation between common fractions and decimal fractions. *Chinese Science Bulletin*, 58(36), p. n4630 - n4640.

ANNEXES

<u>Annexe 1</u> : Synthèse des épreuves du module 2 d'Examath

Epreuve 7 (E7) : Transcodage (Transcodage arabe/oral)		
Objectif	Evaluer les numérations orale et écrite par le transcodage du code oral au code arabe des nombres, et inversement.	
Notation	1 point par bonne réponse	
Score	Score total sur 40	
Sous-épreuve	2	
7a. Lecture de nombres		
Objectif	Evaluer le transcodage d'un code arabe vers un code oral des nombres.	
Consigne	Tu vas voir un nombre. Lis-le.	<u>1-99</u> : 8 23 81 12 69 47 30 74 58 96 <u>99 + :</u> 245 790 604 9403 1256 15963 86074 52007 630789 2567123
Modalité de réponse	Modalité orale	
Stimuli	1 et 99 : 10 items >99 : 10 items	
Score	Sous-score sur 10 (1 et 99) Sous-score sur 10 (>99) Chronométrage global	
Critères d'arrêt	1 et 99 : Non >99 : Arrêt de cette sous-épreuve si l'enfant fait 4 erreurs consécutives	

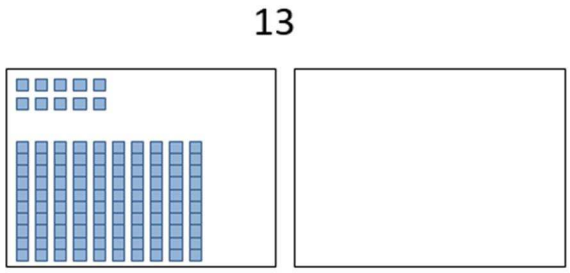
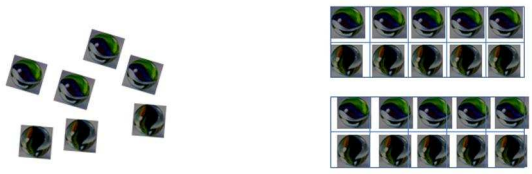
7b. Dictée de nombres		
Objectif	Evaluer le transcodage d'un code oral vers un code arabe des nombres.	
Consigne	Maintenant tu vas entendre un nombre. Ecris-le.	
Modalité de réponse	Production écrite sur papier (ou clavier si dyspraxie)	
Stimuli	1 et 99 : 10 items >99 : 10 items	
Score	Sous-score sur 10 (1 et 99) Sous-score sur 10 (>99)	
Critères d'arrêt	1 et 99 : Non >99 : Arrêt de cette sous-épreuve si l'enfant fait 4 erreurs consécutives	

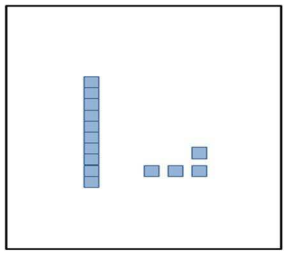
1-99 :	99+ :
6	453
38	609
82	540
25	3258
14	8101
91	63004
63	54071
40	24843
79	740652
57	3453156

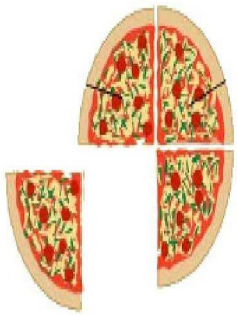
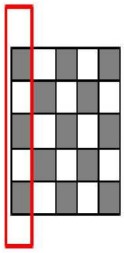
Epreuve 8 (E8) : Répétition de grands nombres		
Objectif	Tester la mémoire à court terme en modalité orale dans un contexte de grands nombres.	
Consigne	Tu vas entendre un grand nombre. Répète-le	
Modalité de réponse	Production orale	
Stimuli	12 items allant de 4 à 14 syllabes	
Score	1 point par bonne réponse. Score total sur 12	
Critères d'arrêt	Arrêt après 2 erreurs consécutives	

N° item	Nombre de syllabes orales			Réponse de l'enfant	Points
1	4	Mille cinq cent douze	1512		
2	5	Douze mille trois cent vingt	12320		
3	6	Cinquante-six mille deux cent	56200		
4	6 ou 7	Deux cent mille quatre-vingt trois	200083		
5	7	Soixante-douze mille six cent sept	92 607		
6	8 ou 9	Neuf cent quatre-vingt deux mille trois cent	982 300		
7	9	Quatre cent trente mille huit cent quarante trois	430 843		
8	10	Trois cent soixante cinq mille neuf cent dix-huit	365 918		
9	11 ou 12	Six cent quatre-vingt-dix-sept mille deux cent vingt quatre	697 224		
10	12	Deux millions cinq cent trente trois mille cent soixante dix	2 533 170		
11	12 ou 13	Dix huit millions trois cent vingt mille neuf cent trente trois	18 320 933		
12	14	Cent trente millions deux cent cinquante six mille trois cent vingt sept	130 256 327		

Epreuve 9 (E9) : Identification d'U/D/C par QCM		
Objectif	Evaluer la compréhension de la signification des chiffres en fonction de leur position et la précision lexicale.	
Chronométrage	Oui, global.	Quel est le nombre d'unités dans 23 ? ▫ 2 ▫ 3 ▫ 23 ▫ 5
Consigne	Lis la question et choisis la bonne réponse	
Modalité de réponse	Désignation de la réponse	
Score	1 point par bonne réponse. Score total sur 15	
Stimuli	15 items demandant soit le « nombre de » ou « le chiffre des »	
Critère d'arrêt	Arrêt après 5 échecs consécutifs	
Epreuve 10 (E10) : Relation Arabe – Analogique U/D/C		
Objectif	Evaluer la compréhension du système de numération entière. Evaluer l'accès aux sens du nombre via le code arabe des nombres	
Score total	Score total sur 30	
Sous-épreuves	3	

10a- Production Arabe - Analogique		
Consigne	Tu vas voir un nombre. Choisis les images pour correspondre au nombre	
Modalité de réponse	Déplacement des items avec la souris de l'ordinateur	
Stimuli	6 stimuli	
Score	Sous-épreuve sur 18 0 pt : Réponse fausse 1 pt : Réponse juste, le nombre d' « unités » (dés, billes, monnaie) est égal à la cible 2 pts : Juste et n<cible 3 pts : Si bonus (meilleure réponse possible. Minimum de n)	
Critère d'arrêt	Non	
10b – Production Analogique – Arabe		
Consigne	Tu vas voir une image. Ecris le nombre qui correspond à l'image	
Modalité de réponse	Ecrite	
Stimuli	6 stimuli	
Score	Sous-épreuve sur 6	
Critère d'arrêt	Non	

10c – Jugement		
Consigne	« Tu vas voir un nombre et une image. Indique si c'est la même quantité	14 
Modalité de réponse	Orale (réponse par oui ou non)	
Stimuli	6 stimuli	
Score	Sous-épreuve sur 6	
Critère d'arrêt	Non	
Epreuve 11 (E11) : Décomposition additive		
Objectif	Evaluer la compréhension du nombre et les lois de position.	
Consigne	Tu vas voir un nombre écrit de différentes façons. Choisis la bonne façon d'écrire ce nombre	98 ❑ 90+8 ❑ 90+80 ❑ 9+8
Modalité de réponse	Désignation parmi un QCM	
Stimuli	12	
Score	Score total sur 12	
Critère d'arrêt	Arrêt si 4 erreurs successives	
Epreuve 12 (E12) : Identification de fractions par QCM		
Objectif	Tester l'accès au sens « partie-tout » des fractions	
Consigne	« Combien a-t-on pris de……. par rapport à tout ce qu'il y avait ? »	

Modalité de réponse	Désignation parmi un QCM	Combien a-t-on pris de pizza par rapport à tout ce qu'il y avait ? 1/4 4/1 1/2 4/4 
Stimuli	9 stimuli (avec 1, 2 ou 3 bonnes réponses par item), 19 « bonnes » réponses en tout	
Score	Score total sur 19 2 points par bonne réponse -1 point par mauvaise réponse cochée 0 (item invalide) quand 4 réponses cochées	
Critère d'arrêt	Non	
Epreuve 13 (E13) : Jugement d'écriture décimale		
Objectif	Evaluer la compréhension du rôle de la virgule et la signification des écritures décimales	0,2 
Consigne	Tu vas voir un dessin et un nombre. Est-ce que c'est juste ? Est-ce que c'est la même quantité ?	
Modalité de réponse	Orale (réponse par oui ou non)	
Stimuli	12	
Score	Score total sur 12	
Critère d'arrêt	Arrêt si 4 erreurs successives	
Epreuve 14 (E14) : Comparaison de fractions		
Objectif	Evaluer la connaissance conceptuelle des fractions	

Consigne	Tu compares des morceaux de pizza. Dis si c'est pareil, plus petit ou plus grand.	$\frac{1}{3}$ < = > $\frac{2}{3}$
Modalité de réponse	Désignation	
Stimuli	10	
Score	Score total sur 10	
Critère d'arrêt	Arrêt si 4 erreurs consécutives	

<u>Annexe 2</u> : Lettre d'information destinée aux parents

Etudiante en orthophonie à l'Université de Caen Basse-Normandie, je travaille dans le cadre de mon mémoire de fin d'études sur la pré-validation d'épreuves de numération au sein d'une batterie informatisée d'évaluation des troubles mathématiques (Examath), mise au point par mes maîtres de mémoire, Marie-Christel Helloin, orthophoniste et Anne Lafay, orthophoniste et doctorante en médecine expérimentale à l'université de Laval, Québec.

Le protocole consiste à tester des enfants dyscalculiques (enfants présentant des troubles mathématiques), et des enfants tout-venants (sans trouble avéré) sur des épreuves de numération afin de pouvoir vérifier la validité prédictive de ces épreuves.

Avec l'accord de Mme. Anne Gosse, directrice de l'école Sainte-Anne, j'interviendrai dans ce cadre dans la classe de votre enfant une première fois pour tester l'ensemble des élèves de façon collective sur des épreuves de mathématiques déjà existantes. Cela ne prendra qu'une quinzaine de minutes. Je reviendrai ensuite dans un second temps pour tester, cette fois individuellement, quinze élèves de la classe choisis aléatoirement pour une lecture et une dictée de nombres écrits en chiffres arabes (2 fois 4 items) ainsi que sur des épreuves de numération de ladite batterie Examath. Je me permets de solliciter votre autorisation pour participation de votre enfant à ce projet. Vous trouverez le formulaire de consentement ci-dessous.

Les passations auront lieu entre mai et juin. Conformément à la déontologie en vigueur, cette évaluation sera couverte par l'anonymat. Je vous ferai part des résultats de l'étude individuellement à l'issue de celle-ci.

Je vous remercie pour votre coopération et voue prie de recevoir l'expression de mes salutations les meilleures.

Anaïs Morisse.

Formulaire de consentement destiné aux parents :

Je soussigné(e) …….. autorise / n'autorise pas mon fils / ma fille ……..... à participer à la passation des épreuves mathématiques collectives et autorise / n'autorise pas mon fils / ma fille à la passation d'épreuves individuelles de numération dans le cadre du mémoire d'orthophonie d'Anaïs Morisse.

Mon enfant : (barrer la mention inutile)

* est droitier / gaucher
* a déjà redoublé : oui / non
* Si oui, quelle(s) classe(s) ? :
* a déjà été suivi en orthophonie : oui / non
* Pour quel type de suivi ? :

Date et signature des parents

Annexe 3 : Critères de recrutement

Sujets sains :

INCLUSION	EXCLUSION
• Fille/garçon de CM2 • Langue maternelle française • Scolarité classique • Pas de troubles en mathématiques avérés	• Difficultés d'apprentissage • Antécédent de PEC orthophonique • Redoublement • Antécédent de trouble spécifique du langage et/ou des apprentissages

Sujets dyscalculiques :

RECRUTEMENT	INCLUSION	EXCLUSION
• Fille/garçon de CM2 • Langue maternelle française • Scolarité classique (milieu ordinaire) • Difficultés scolaires en mathématiques depuis au moins 6 mois • Diagnostic et suivi orthophonique pour dyscalculie	• Critères de recrutement plus écart à la norme constaté au Numeracy Screener analogique et/ou arabe et au TTR	• Déficience intellectuelle • Déficience sensorielle • Trouble neurologique • TSLO • Trouble du comportement ou T.E.D

Résumé

Examath (Lafay et Helloin, en préparation) est une batterie informatisée d'évaluation des troubles de la cognition mathématique pour les 8-15 ans. Son approche va dans le sens des recherches actuelles en neurosciences et neuropsychologie cognitives qui définissent la dyscalculie comme un trouble spécifique des apprentissages en mathématiques. Face aux rares épreuves existantes dans ce domaine et pour cette tranche d'âge, ce mémoire a pour objectif la validation, auprès d'enfants de CM2, du module de numération comportant huit épreuves. Deux tests publiés (Tempo Test Rekenen et Numeracy Screener) ont été préalablement normalisés afin de permettre une évaluation cognitive des sujets en amont de la phase expérimentale. Au final, 36 enfants ont été retenus pour cette étude, dont 10 suivis pour des « troubles du calcul et du raisonnement logico-mathématique » formant le groupe « dyscalculique », les autres constituant les sujets contrôles. Les différentes épreuves du module de numération ont révélé leur caractère discriminant, montrant une différence significative entre les deux groupes pour six d'entre elles. La corrélation trouvée avec d'autres épreuves existantes évaluant les mêmes compétences a montré la fiabilité des sous-tests d'Examath. L'étude a ainsi permis de faire des ajustements et de décider de ne proposer certaines épreuves qu'aux collégiens. Ce module de numération, couplé aux autres modules de la batterie Examath devrait permettre une large évaluation des compétences clés en cognition mathématique et faciliter les diagnostics précis de dyscalculie développementale.

Mots clés : Dyscalculie développementale, numération, évaluation, diagnostic, Examath, validation

Summery

Examath (Lafay & Helloin, development in progress) is a computerized test battery to assess deficit in mathematics cognition for children aged from 8 to 15 years old. Its approach is in line with current researches in neuroscience and cognitive neurophysiology defining dyscalculia as a specific learning deficit in mathematics. Given the limited available tests in this domain and for this age group, this study tests the validity of the "Numeracy" module (eight tasks) with 5th grade children. First, two published tests (Tempo Test Rekenen and Numeracy Screener) were normalised to allow a cognitive evaluation of the subjects in the experimental phase. At the end, 36 children were selected for this study: 10 of them formed the "dyscalculia group" and were followed for their deficit in calculation and reasoning abilities ; the others constituted the control subjects group. The different tasks of the Numeracy module revealed their discriminating validity showing a significant difference between the two groups for 6 of them. The correlation with other existing tests assessing the same abilities showed the reliability of the "Numeracy" module. This study has allowed us to make adjustments and to decide to submit some tasks only to children attending high school.Thus, the "Numeracy" module, coupled to other modules of Examath should lead to a wide assessment of key competences in mathematical cognition and ease the specific diagnosis of developmental dyscalculia.

Key words: Developmental Dyscalculia, Numeracy, assessment, diagnosis, Examath, validity.