DEPARTEMENT ORTHOPHONIE
FACULTE DE MEDECINE
Pôle Formation
59045 LILLE CEDEX
Tél : 03 20 62 76 18
departement-orthophonie@univ-lille.fr

MEMOIRE

En vue de l'obtention du

Certificat de Capacité d'Orthophoniste

présenté par

Rose RAMBAUD

soutenu publiquement en juin 2022

Conception d'une épreuve de résolution de faits arithmétiques s'inscrivant dans un projet de création d'une batterie d'évaluation de la cognition mathématique

MEMOIRE dirigé par

Sophie FRAGNON, orthophoniste, Wingles, et enseignante, Département d'Orthophonie Gabriel Decroix, Lille

Sandrine MEJIAS, Maître de conférences, Université de Lille, Lille

Lille – **2022**

Résumé :

L’évaluation des troubles des apprentissages mathématiques nécessite l’utilisation de tests normés et standardisés. Ce jour, les outils disponibles n’évaluent pas tous les mêmes habiletés numériques (Lafay et al., 2014). Cette présente étude s’inscrit donc dans une démarche de création d’une nouvelle batterie de la cognition mathématique se voulant la plus exhaustive possible en matière d’épreuves et reposant sur des modèles théoriques récents. Plus précisément, dans le cadre de ce mémoire universitaire, deux épreuves permettant une évaluation rapide et dynamique des compétences du sujet dans le domaine des faits arithmétiques seront créées. Le champ de la cognition mathématique étant vaste, il semble primordial de fournir aux orthophonistes des épreuves courtes et sensibles afin de tenir compte des contraintes temporelles de l’évaluation orthophonique. De plus, selon De Visscher et Noël (2014b), les enfants présentant un trouble des apprentissages mathématiques rencontreraient systématiquement des difficultés dans la mémorisation des faits numériques. Les orthophonistes pourront donc utiliser ces épreuves pour objectiver la présence de difficultés dans ce domaine et procéder à un éventuel diagnostic de déficit cognitif numérique, à la lumière de l’ensemble des habiletés mathématiques évaluées chez le sujet.

Mots-clés :

cognition mathématique - évaluation - faits arithmétiques - additions - multiplications

Abstract :

The assessment of mathematical learning disabilities requires the use of normed and standardised tests (Lafay et al., 2014). To date, the tools available do not all assess the same numerical skills. This study is therefore part of an effort to create a new test of mathematical cognition that is as comprehensive as possible in terms of tests and is based on recent theoretical models. More precisely, within the framework of this university dissertation, two tests allowing a rapid and dynamic evaluation of the subject's competences in the field of arithmetical facts will be created. As the field of mathematical cognition is vast, it seems essential to provide speech therapists with short and sensitive tests in order to take into account the time constraints of speech therapy assessment. Furthermore, according to De Visscher and Noël (2014b), children with a mathematical learning disability would systematically encounter difficulties in memorising number facts. Speech and language therapists can therefore use these tests to determine the presence of difficulties in this area and to make a possible diagnosis of a numerical cognitive deficit, in the light of all the mathematical skills assessed in the subject.

Keywords :

mathematical cognition - evaluation - arithmetic facts - additions - multiplications

Introduction

Les troubles des apprentissages mathématiques (TAM) sont définis par la présence de difficultés sévères et persistantes à maîtriser le sens du nombre, le raisonnement mathématique, le calcul ou encore les faits arithmétiques. Ces difficultés interfèrent significativement avec les performances académiques et les activités quotidiennes du sujet (American Psychiatric Association, 2013). Ainsi, il semble primordial que les orthophonistes disposent d'outils standardisés et normés afin d'objectiver ces difficultés et de proposer par la suite une prise en charge orthophonique adaptée à chaque patient.

Actuellement, les outils d'évaluation de la cognition mathématique chez l'enfant n'évaluent pas tous les mêmes habiletés numériques (Lafay et al., 2014). Il est donc nécessaire de connaître chaque outil disponible afin de pouvoir proposer une évaluation complète de ce que l'on souhaite observer. Ainsi, cette présente étude s'inscrit dans une démarche de création d'une nouvelle batterie d'évaluation de la cognition mathématique permettant de dépasser la limite précédemment évoquée. En effet, cette batterie, fondée sur le modèle cognitiviste du Triple Code (Dehaene, 1992) se voudra la plus exhaustive possible en matière d'épreuves et s'appliquera à une large tranche d'âge. L'orthophoniste pourra alors évaluer précisément l'ensemble des différentes compétences mathématiques du patient grâce à l'utilisation d'un seul outil, ce qui permettra d'adapter au mieux la future prise en charge.

Ce présent mémoire universitaire proposera notamment deux épreuves évaluant les faits arithmétiques, qui seront intégrées à cette nouvelle batterie de la cognition mathématique. Les faits numériques correspondent aux opérations dont les résultats sont stockés en mémoire à long terme (Noël & Karagiannakis, 2020). Des difficultés dans leur mémorisation seraient systématiquement retrouvées chez les enfants présentant un trouble des apprentissages mathématiques (De Visscher & Noël, 2014b). Il apparaît donc primordial que les orthophonistes disposent d'épreuves précises pour objectiver ces difficultés. Plus précisément, notre étude s'inscrit dans la continuité d'un mémoire universitaire (Bardet, 2021) dans lequel des subtests pour l'évaluation des faits numériques ont déjà été créés. Ainsi, cette présente étude s'attachera à élaborer des épreuves différentes de celles précédemment proposées, notamment en raison de l'ordre de leurs items et de leur méthodologie de passation.

Après avoir présenté le contexte théorique dans lequel s'inscrit cette étude, nous expliciterons les critères retenus pour la création de nos deux épreuves évaluant le stockage et la récupération des faits numériques en mémoire à long terme. Ensuite, nous argumenterons nos propositions d'épreuves tout en discutant de leurs limites et de leurs intérêts pour l'évaluation et la pratique orthophoniques.

Contexte théorique, buts et hypothèses

Dans un premier temps, nous introduirons cette partie par une présentation générale du domaine du calcul, notamment par le biais d'un modèle théorique de référence de la cognition mathématique. Cela permettra d'expliciter la manière dont les différentes compétences arithmétiques, notamment les faits numériques, sont appréhendées à travers ce modèle. Dans un deuxième temps, nous décrirons plus précisément la mise en œuvre des faits arithmétiques et l'évolution de leur mobilisation au cours du développement lors de la résolution d'additions et de multiplications élémentaires, c'est-à-dire composées d'opérandes à un chiffre. Cette première partie s'achèvera par une présentation des difficultés pouvant freiner la constitution du réseau des faits numériques chez les enfants présentant un trouble des apprentissages mathématiques, ainsi que des différents moyens de remédiation pouvant faciliter leur mémorisation et leur récupération.

1. Le calcul

Le calcul étant un domaine varié de la cognition mathématique, nous présenterons ici les diverses compétences arithmétiques qui peuvent être impliquées dans des tâches de calcul selon le modèle cognitiviste du Triple Code (Dehaene, 1992).

1.1. Une répartition des compétences impliquées dans le domaine du calcul selon le Triple Code

Ce modèle, qui fait à ce jour le plus consensus dans le domaine du calcul, stipule que les traitements numériques reposent sur l'existence de trois systèmes de représentation mentale des nombres : une représentation analogique et deux représentations symboliques (verbale et arabe). Ces trois systèmes, également appelés codes, sont indépendants les uns des autres mais interconnectés. Pour chacun d'entre eux, diverses compétences arithmétiques y sont rattachées.

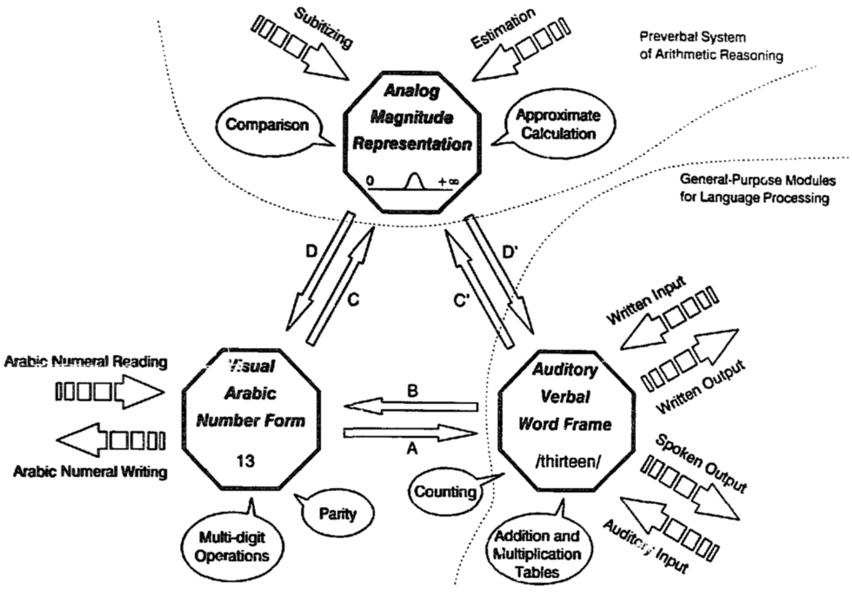

Figure 1 : Modèle du Triple Code (issu de Dehaene, 1992)

Le code analogique correspond à la représentation abstraite des quantités. Il partage des ressemblances, généralement perceptives, avec la cardinalité qu'il représente et nécessite une abstraction (Fayol, 2018). Par exemple, les quantités peuvent être matérialisées par des points, des entailles ou encore des parties du corps comme les doigts. A ce système sont rattachés le subitizing et l'estimation. Si le subitizing permet un calcul exact sur de très petites quantités, l'estimation permet quant à elle la réalisation d'un calcul approché sur de grandes quantités.

Le code verbal correspond au système de compréhension et de production des noms de nombres sous leur forme verbale (ex. : /trwa/) ou écrite (ex. : « trois »). Ce système, permettant la réalisation de calculs exacts, regroupe plusieurs compétences arithmétiques nécessitant des capacités langagières : comptage, dénombrement, calcul mental et accès aux faits arithmétiques. Plus précisément, concernant les faits numériques, ces derniers correspondent à des opérations fréquentes dont la « résolution repose sur l'activation quasi-automatique de séquences verbales emmagasinées en mémoire déclarative » (Le Bel Beauchesne et al., 2009), la mémoire déclarative étant un système de stockage et de rappel de données que la personne peut exprimer par le langage.

Le code arabe correspond quant à lui au système numérique écrit en chiffres arabes. Il est composé de dix éléments (de 0 à 9) et implique le système positionnel (Fayol, 2018). A cette représentation sont rattachées plusieurs compétences arithmétiques permettant la réalisation de calculs exacts : pose d'opérations, résolution de tâches arithmétiques complexes (à plusieurs chiffres) et algorithmes de calcul.

Ainsi, le système verbal et le système arabe permettent la résolution de calculs exacts et plus précisément d'opérations arithmétiques. Nous allons présenter par la suite les deux grands types de stratégies qui peuvent alors être mis en œuvre pour résoudre ces calculs.

1.2. Deux types de stratégies de résolution des calculs exacts

Les stratégies de comptage (ou procédurales) et les stratégies de récupération (ou déclaratives) correspondent aux deux grands types de stratégies de résolution de calculs qui ont été observés dans la littérature.

Tout d'abord, les stratégies déclaratives permettent de récupérer en mémoire à long terme le résultat d'un calcul (Noël & Karagiannakis, 2020). Le terme « fait arithmétique » correspond alors aux opérations dont la réponse est stockée en mémoire déclarative. Ces stratégies n'impliquent qu'une seule étape de traitement cognitif, elles sont donc rapides et peu coûteuses. Toutefois, les connaissances déclaratives étant stockées dans un réseau associatif, ces dernières sont donc sensibles aux effets d'interférence. En effet, les différentes associations opérandes-résultat à mémoriser sont très similaires entre elles étant donné qu'elles partagent diverses combinaisons de chiffres allant de 0 à 9, ce qui créé alors de l'interférence en mémoire à long terme lors du stockage du fait arithmétique et de sa récupération.

A l'inverse, les stratégies procédurales comportent plusieurs étapes pour aboutir à la résolution d'un problème arithmétique. Leur exécution nécessite une vitesse de résolution et un coût cognitif plus importants que pour les stratégies déclaratives. Elles impliquent la nécessité de connaître des algorithmes spécifiques, de sélectionner la procédure la plus adaptée à la situation et d'exécuter d'une manière adéquate celle-ci (Noël & Karagiannakis, 2020). Les stratégies procédurales sont dites générales car l'utilisation d'une même procédure permet de résoudre un certain nombre d'opérations. De plus, une procédure étant indépendante des autres algorithmes existants, celle-ci est peu sensible aux effets d'interférence (Lépine et al., 2003).

Après avoir introduit les compétences et stratégies impliquées dans le domaine du calcul, nous allons maintenant nous concentrer sur la mise en œuvre des stratégies déclaratives, et donc du réseau des faits arithmétiques. Nous nous intéresserons également à l'évolution de la mobilisation de ces stratégies au cours du développement.

2. Mise en œuvre des stratégies déclaratives et évolution de leur mobilisation dans la résolution des additions et des multiplications élémentaires

Dans cette partie, nous aborderons l'apprentissage des faits arithmétiques. Au cours du développement, un nombre de plus en plus conséquent d'additions et de multiplications simples, c'est-à-dire composées d'opérandes à un seul chiffre, sont résolues par récupération directe du résultat en mémoire à long terme. Dans cette partie, nous considérerons donc comme faits numériques les additions et multiplications élémentaires impliquant des termes à un chiffre. Les soustractions et les divisions étant majoritairement résolues par l'application de stratégies procédurales, ces dernières n'aboutiraient pas à la constitution d'un réseau de faits arithmétiques (Noël & Karagiannakis, 2020). Ces dernières ne seront donc pas abordées dans cette partie.

2.1. Les faits additifs

Selon la conception dominante décrite dans la littérature depuis une quarantaine d'années, la mise en œuvre du réseau des faits additifs découlerait d'une pratique répétée des stratégies de comptage (Thevenot, 2018).

En effet, au cours du développement, les enfants utilisent diverses stratégies de comptage pour résoudre les opérations simples (Groen & Parkman, 1972), généralement exécutées dans cet ordre :

- La procédure « all » : l'enfant compte les deux opérandes de l'addition. Dès trois ans, les enfants peuvent utiliser cette procédure à l'aide de la manipulation d'objets : ils matérialisent alors chaque opérande avec des objets, réalisent la réunion de l'ensemble des éléments et dénombrent le tout (Fayol, 2018). Le dénombrement est en effet généralement considéré comme la base de l'apprentissage des opérations arithmétiques (Lépine & Camos, 2004) et constitue la première stratégie de calcul utilisée par les enfants. Les enfants âgés de quatre ou cinq ans utilisent plus souvent le comptage digital (ex. pour résoudre l'opération « 2+4 », l'enfant compte jusqu'au premier opérande tout en levant deux doigts, il compte ensuite jusqu'au second opérande en levant quatre autres de ses doigts puis recompte alors le tout pour parvenir au total de l'addition) ou le comptage verbal (ex. pour résoudre l'opération « 2+4 », l'enfant compte d'abord jusqu'au premier opérande en effectuant « 1, 2 » puis avance d'autant de pas que le spécifie le second opérande, c'est-à-dire « 3, 4, 5, 6 »).

- La procédure « max » : l'enfant compte à partir du premier terme du calcul et incrémente d'un nombre de pas égal à la valeur du second terme (ex. pour résoudre l'opération 2+4, l'enfant compte 2, 3, 4, 5, 6).
- La procédure « min » : l'enfant sélectionne le plus grand des opérandes et incrémente d'un nombre de pas égal au plus petit opérande (ex. pour résoudre l'opération 2+4, l'enfant compte 4, 5, 6). Cette procédure nécessite une connaissance conceptuelle de la commutativité (Noël et Karagiannakis, 2020).

Ainsi, d'une manière générale, les stratégies pour résoudre les additions simples évoluent chez les enfants. Les stratégies procédurales utilisées deviennent de plus en plus matures au cours du développement puis ces dernières laisseront finalement place à la récupération en mémoire, stratégie la plus rapide et la moins coûteuse (Noël & Karagiannakis, 2020). Ainsi, les enfants âgés entre quatre et cinq ans utilisent des stratégies variées pour résoudre des additions comme le comptage « all », le comptage « min » et quelques récupérations (Siegler, 1987). Les enfants scolarisés en classe de CP utilisent majoritairement la stratégie du comptage « min » pour résoudre des additions simples (Groen & Parkman, 1972), puis celle-ci diminue au profit des stratégies de récupération et de décomposition les années suivantes (Noël & Karagiannakis, 2020). La stratégie de décomposition, dite mixte (de récupération et de comptage) permet à l'enfant de décomposer alors un des opérandes de l'addition pour récupérer un fait arithmétique qu'il connaît et faciliter la résolution du problème additif (ex. un enfant qui connaît la réponse du calcul « 6+6 » mais pas celle du calcul « 6+7 » pourra décomposer cette dernière en « 6+6+1 » pour récupérer le fait arithmétique connu et y ajouter un).

Selon Siegler (1988), une forte association entre l'opération et le résultat sera créée en mémoire si les enfants exécutent correctement les stratégies de comptage et trouvent régulièrement la réponse correcte au problème. Plus cette association sera forte et plus elle fera l'objet d'une récupération directe en mémoire à long terme. Toutefois, au-delà de cette mise en œuvre du réseau des faits additifs via une pratique répétée des stratégies procédurales, un apprentissage spécifique des tables d'additions est généralement effectué à l'école (Dehaene, 2010) afin de faciliter la constitution de ce réseau de faits additifs. La stratégie de récupération deviendrait dominante à partir de dix ans pour les additions constituées de deux opérandes à un chiffre dont la somme est inférieure à dix (Thevenot et al., 2016). Les faits additifs corresponderaient donc aux petites opérations dont la somme ne dépasse pas dix (Barrouillet et Lépine, 2005) et les calculs avec des sommes plus importantes nécessiteront alors l'utilisation de stratégies procédurales.

Chez l'adulte expert, 70% des additions seraient résolues par récupération en mémoire du résultalt (LeFevre et al., 1996), des stratégies procédurales comme le comptage et la décomposition seraient également utilisées. Ainsi, même si la récupération domine, l'addition semble conserver un caractère procédural. La sélection d'une stratégie procédurale reposerait alors sur plusieurs critères, notamment la vitesse et le coût de sa mise en oeuvre, ses réussites antérieures ainsi que le contexte de l'opération (Lemaire & Arnaud, 2004, cités dans Fayol, 2018).

Toutefois, cette hypothèse dominante d'une récupération en mémoire des résultats des additions a été récemment remise en cause au profit d'une hypothèse d'une automatisation des processus de comptage. En effet, Barrouillet et Thevenot (2013) ont prouvé un effet de taille dans les très petites additions composées d'opérandes allant de 1 à 4. Autrement dit, à chaque fois que la somme de l'addition augmentait d'un pas, le temps de résolution augmentait de façon linéaire de vingt millisecondes. Les auteurs ont donc supposé que cette augmentation régulière du temps de réponse pourrait être obtenue par une mise en œuvre très rapide des processus de comptage de pas en pas. Les additions très simples seraient donc résolues chez les adultes par des déplacements mentaux extrêmement rapides et inconscients le long de la ligne numérique mentale orientée de gauche à droite (Thevenot, 2018). Ainsi, une confusion pourrait exister entre une application extrêmement rapide des procédures et une récupération en mémoire à long terme. Ce passage de stratégies lentes à des procédures rapides est également retrouvé chez des sujets à partir de dix ans (Thevenot et al., 2016). En outre, Fayol et Thevenot (2012) avaient également démontré à travers une étude que la présentation du signe de l'opération de l'addition avant les opérandes permettait aux adultes experts de la résoudre plus rapidement. Cet effet d'amorçage du signe de l'opération permettait selon les auteurs d'activer « quelque chose » qui les aidait à résoudre l'opération, suggérant alors que des connaissances procédurales abstraites seraient préactivées par la présentation du signe.

2.2. Les faits multiplicatifs

L'apprentissage des faits multiplicatifs ne suit pas le même développement que celui des additions. Le concept de multiplication est généralement enseigné à l'école sans prendre suffisamment de temps pour que les enfants puissent développer une compréhension informelle de cette opération, contrairement à l'addition (Noël et Karagiannakis, 2020). Au début de l'apprentissage, les multiplications peuvent être appréhendées sous forme d'additions itérées (ex. : 7x4 = 7+7+7+7) ou de suites de multiples (ex. 7x4 = 7, 14, 21, 28). Très rapidement, un apprentissage mémoriel des tables de multiplications sera toutefois privilégié afin de favoriser la mise en œuvre des stratégies de récupération. Cet apprentissage fait donc l'objet d'une activité scolaire à part entière en deuxième et troisième années de primaire (Ministère de l'Education Nationale, 2022), celle de la mémorisation par cœur des faits arithmétiques. L'enseignement de ces derniers est progressif et est divisé en huit tables (de 2 à 9). La résolution des tables de 0, de 1 et de 10 repose sur l'application de stratégies procédurales (Sokol et al., 1991), ces dernières sont donc rarement enseignées de manière aussi formelle à l'école. De plus, l'apprentissage d'une table de multiplication est facilité par celles déjà mémorisées. En effet, via le principe de commutativité, le nombre de nouvelles associations à mémoriser est réduit.

En outre, différents paramètres peuvent influencer l'apprentissage de ces faits multiplicatifs. Premièrement, les multiplications avec deux termes identiques (ex. « 3x3 ») seraient mieux mémorisées que les produits multiplicatifs impliquant des facteurs différents (Noël & Karagiannakis, 2020). Les opérations avec des termes plus petits (ex. « 3x2 ») seraient également mieux encodées que celles comportant des plus grands chiffres (ex : « 9x8 »). Enfin, un dernier facteur influençant la mémorisation des tables de multiplication est la similitude que chaque calcul présente avec ceux précédemment appris. En effet, chaque nouvelle multiplication à apprendre présente des similitudes, des chiffres en commun avec celles déjà mémorisées. Plus cette ressemblance sera forte et plus le phénomène d'interférence qui va se créer en mémoire à long terme sera important, rendant alors difficile la création d'une trace mnésique pour ce fait numérique (Noël et Karagiannakis, 2020).

L'apprentissage mémoriel des tables de multiplication réalisé durant le cursus scolaire favorise la mise en œuvre des stratégies déclaratives. Ainsi, les enfants utilisent principalement la récupération en mémoire pour résoudre des multiplications simples (Lemaire & Siegler, 1995 ; Mabbott & Bisanz, 2003). Toutefois, d'autres stratégies pourront également être mises en œuvre par les enfants pour la résolution de problèmes multiplicatifs, à savoir les additions itérées et le comptage par pas (Noël & Karagiannakis, 2020). Chez l'adulte, la stratégie de récupération est également prédominante (80% pour les multiplications simples). Diverses stratégies procédurales sont toutefois utilisées en cas d'échec d'une récupération d'un résultat en mémoire à long terme : récitations de tables (ex. 6x3 = 6, 12, 18), additions répétées (ex. 6x3 = 6+6+6), dérivations à partir de faits proches connus (ex. 7x9 = (7x10) - 7) (LeFevre et al., 1996).

La constitution du réseau des faits additifs et celle du réseau des faits multiplicatifs résultent donc de processus différents, l'un découlant d'une pratique intensive des stratégies de comptage permettant d'associer en mémoire à long terme les opérandes et leur résultat et l'autre découlant d'une mémorisation par cœur des tables de multiplication. De nombreux enfants créent un réseau correct de faits arithmétiques au cours de leur scolarité à l'école primaire, réseau nécessaire pour résoudre des calculs simples au quotidien et pour soulager la mémoire de travail lors de la résolution de calculs plus complexes. La constitution d'un bon réseau de faits numériques est notamment l'un des objectifs du cycle des études élémentaires (Noël & Karagiannakis, 2020). Toutefois, des enfants rencontrent des difficultés pour mémoriser les faits arithmétiques et ne parviennent pas à mettre en œuvre un réseau de faits numériques satisfaisant. Plus précisément, les sujets présentant un trouble des apprentissages mathématiques présenteraient systématiquement des difficultés dans l'apprentissage de ces faits arithmétiques (De Visscher & Noël, 2014b).

3. Le trouble des apprentissages mathématiques et la mémorisation des faits numériques

Le trouble des apprentissages mathématiques est un trouble neurodéveloppemental qui touche environ six pourcents des enfants (Noël & Karagiannakis, 2020). Ce trouble est défini par la présence de difficultés à maîtriser le sens du nombre, le raisonnement mathématique, le calcul ou encore les faits arithmétiques. Ces difficultés interfèrent significativement avec les performances académiques ou les activités quotidiennes de la personne (American Psychiatric Association, 2013). A l'heure actuelle, de nombreuses études démontrent l'existence de différents profils de troubles des apprentissages mathématiques. Les difficultés pourraient alors être expliquées par diverses causes sous-jacentes, à savoir un déficit numérique de base ou une faiblesse des processus cognitifs généraux (Noël & Karagiannakis, 2020). Dans cette partie, nous allons expliquer comment chacune de ces hypothèses causales peut influer sur la mise en œuvre du réseau des faits arithmétiques.

3.1. Un déficit numérique de base

Selon les auteurs, ce déficit purement numérique pourrait se manifester de deux manières différentes : soit par un déficit du sens du nombre, soit par un déficit de l'accès au sens du nombre à partir des codes symboliques (code verbal et code arabe).

Concernant le déficit du sens du nombre, des études d'imagerie cérébrale ont en effet démontré un développement anormal du sillon intrapariétal dans le trouble des apprentissages mathématiques, région de la localisation du sens du nombre (Wilson & Dehaene, 2007). De nombreuses études contradictoires ont été décrites dans la littérature concernant l'existence d'une corrélation entre la précision de la représentation approximative de la magnitude numérique et le développement mathématique ultérieur (Noël & Karagiannakis, 2020). Selon les différents auteurs soutenant cette hypothèse, tout apprentissage arithmétique ultérieur se baserait sur cette représentation de la quantité. Les difficultés d'apprentissage dans le domaine arithmétique présentes chez les enfants avec un trouble des apprentissages mathématiques seraient donc secondaires à une faiblesse du traitement de la quantité (Wilson & Dehaene, 2007). En arithmétique, notamment, ce déficit numérique influera par exemple sur l'application des stratégies procédurales permettant la constitution du réseau des faits numériques (notamment additifs) ou des algorithmes utilisés dans le cas d'une récupération en mémoire des résultats non fonctionnelle.

En outre, l'hypothèse causale d'une faiblesse du traitement de la magnitude des nombres symboliques chez les enfants avec une dyscalculie développementale est quant à elle observée de manière consistante à travers les études (Noël et al., 2013). Plus précisément, une étude récente a établi un lien entre la compétence de l'accès au sens du nombre via les codes symboliques et la récupération des faits arithmétiques. En effet, les enfants les plus compétents dans le traitement des magnitudes numériques symboliques récupèrent davantage de faits arithmétiques stockés en mémoire à long terme et cette récupération est plus rapide que celle des autres enfants (Vanbinst et al., 2015).

3.2. Un déficit des processus généraux

Une faiblesse des processus cognitifs généraux pourrait être à l'origine des difficultés de mémorisation des faits numériques chez les enfants présentant un trouble des apprentissages mathématiques.

3.2.1. Un déficit mnésique

Tout d'abord, les enfants présentant une dyscalculie développementale présenteraient une faiblesse mnésique et auraient donc tendance à utiliser des supports externes (comme le recours aux doigts) plus longtemps que leurs pairs (Geary, 2004). De plus, ces enfants utiliseraient davantage de stratégies immatures, stratégies ayant un temps de résolution important. Ainsi, les opérandes du problème ne seraient alors plus maintenus en mémoire lorsque la réponse est obtenue, l'association opérandes-résultat ne pourra donc être encodée en mémoire à long terme. Ainsi, de faibles ressources en mémoire de travail peuvent affecter l'efficacité des procédures mises en place et donc retarder le développement des faits arithmétiques en mémoire déclarative (Barrouillet & Lépine, 2005). De plus, une faiblesse de la mémoire à court terme pourrait expliquer le nombre important d'erreurs réalisées lors du comptage (Geary, 2004). Des associations en mémoire vont alors être établies entre les réponses incorrectes et le problème arithmétique. Au plus ces dernières seront fortes, au plus elles seront récupérées en mémoire par l'enfant, à défaut de la réponse exacte.

3.2.2. Une hypersensibilité à l'interférence

Les enfants avec un trouble des apprentissages mathématiques présenteraient une hypersensibilité à l'interférence pouvant expliquer les difficultés à stocker et à récupérer les faits arithmétiques en mémoire à long terme (De Visscher & Noël, 2014b). Des données d'imagerie et d'études comportementales ont prouvé la présence de cette hypersensibilité chez des enfants n'ayant pas pu constituer un réseau de faits arithmétiques correct (Noël & Karagiannakis, 2020).

Les faits numériques partagent de nombreux chiffres communs entre eux (Oberauer & Kliegl, 2006), qu'il s'agisse des chiffres des opérandes ou de ceux contenus dans les résultats. Chaque nouveau calcul présente donc des similitudes en commun avec ceux déjà appris. Plus une nouvelle association opérandes-résultat ressemble à celles déjà apprises et plus la création d'une trace mnésique pour ce fait numérique sera difficile en raison de l'interférence créée en mémoire (De Visscher & Noël, 2014b). En outre, en ce qui concerne la récupération des faits arithmétiques, des difficultés à inhiber les autres résultats candidats peuvent être retrouvées. Ceci est à mettre en lien avec le modèle de récupération de Graham et Campbell (1988) dans lequel un problème arithmétique simple va activer la bonne réponse mais aussi d'autres réponses candidates car elles partagent un facteur commun du calcul (ex. pour l'opération « 6 x 4 », les réponses « 16 » et « 18 » peuvent également être activées car elles partagent un multiple commun de l'opération). Selon Noël et Karagiannakis (2020), cela pourrait d'ailleurs expliquer le fait que la plupart des erreurs produites appartiennent à la table de l'un des opérandes de l'opération (ex. « 4x6 = 18 »). En outre, des réponses associées aux termes du calcul mais dans une autre opération peuvent également être activées (Campbell & Timm, 2000). Par exemple, l'opération « 6x2 » activerait également la réponse « 8 », somme de ces deux opérandes.

Après avoir analysé les difficultés observées dans la dyscalculie pouvant influer sur le stockage et la récupération des faits arithmétiques en mémoire à long terme, nous allons nous intéresser aux moyens de rééducation de ces derniers.

4. Les pistes de rééducation

Selon Noël et Karagiannakis (2020), les grands principes de la rééducation en cognition mathématique correspondent aux critères suivants : donner des instructions explicites et claires, fournir une modélisation importante (montrer régulièrement à l'enfant comment il doit procéder) et utiliser la pratique répétée (drill).

4.1. Les additions simples

Selon une hypothèse récente, les additions seraient résolues par une automatisation des processus de comptage plutôt que par une récupération directe du résultat en mémoire. Il serait donc important de favoriser une rééducation qui couple la pratique répétée de résolution d'opérations additives à un travail de modélisation concernant les stratégies efficaces à mettre en œuvre pour résoudre les additions simples, comme la stratégie du counting min pour les plus jeunes (Tournaki, 2003). Le bénéfice de l'intervention serait augmenté lorsque celle-ci couple un travail de drill à un travail de modélisation comportant des instructions explicites, notamment pour les enfants avec un trouble des apprentissages mathématiques. Pour ces derniers, les exercices de drill seuls ne suffisent pas à accroître la fluidité dans la résolution des faits arithmétiques.

Fuchs et ses collègues (2010) ont réalisé une étude évaluant les effets d'une intervention couplant un apprentissage par cœur des additions simples à un apprentissage procédural, dans lequel les enfants devaient résoudre les opérations en comptant à partir de l'un des opérandes, tout en étant encouragés à utiliser leurs doigts ou une ligne numérique mentale. Les auteurs concluent que les effets de l'apprentissage par cœur sont augmentés lorsque l'intervention couple un apprentissage mémoriel à un apprentissage procédural. En outre, ils démontrent qu'en présence d'une réduction de l'apprentissage par cœur, l'apprentissage procédural comporte toujours les mêmes effets bénéfiques. Le comptage permettrait donc une meilleure mémorisation des faits additifs que l'apprentissage mémoriel basé sur la répétition. Selon Thevenot (2018), cet entraînement procédural favoriserait l'automatisation des procédures de comptage. En effet, les additions simples seraient résolues par une automatisation des procédures de comptage permettant des déplacements mentaux extrêmement rapides sur la ligne numérique mentale. Une intervention favorisant ces déplacements rapides sur cette chaîne numérique comme la pratique répétée du comptage serait donc à privilégier à un apprentissage mémoriel (Thevenot, 2018). En outre, Siegler et Ramani (2008) évoquent des entraînements basés sur l'utilisation d'une ligne numérique mentale orientée de gauche à droite permettant aux enfants d'être plus performants dans la résolution de problèmes arithmétiques. En effet, cet entraînement impliquerait des déplacements mentaux sur la ligne numérique lors de la résolution d'additions simples, ce qui favoriserait les représentations des nombres et influerait sur la résolution des calculs simples.

4.2. Les multiplications simples

D'un point de vue général, le exercices de drill sont très importants pour permettre une automatisation des faits multiplicatifs.

Il est important que les sujets présentant des difficultés dans la mémorisation des faits numériques soient conscients du principe de commutativité, ce dernier permettant de réduire considérablement le nombre de faits à mémoriser. Il est possible de proposer une intervention qui débutera par l'apprentissage des tables les plus simples, à savoir les tables de 2, de 5 et de 10, l'objectif étant de dériver par la suite les faits les plus difficiles à partir des faits les plus faciles (Noël & Karagiannakis, 2020). Par exemple, pour résoudre l'opération « 9 x 4 », l'enfant pourra effectuer 10 x 4 - 9. Le thérapeute pourra également utiliser une ligne numérique horizontale présentant de gauche à droite les produits d'une table dans un ordre croissant. Cette représentation permettra à l'enfant de visualiser les allers-retours qu'il peut réaliser pour parvenir à la réponse des faits les plus difficiles en s'appuyant sur les faits les plus simples.

Pour les enfants présentant une faiblesse mnésique, il est possible de proposer un entraînement durant lequel la récitation des tables est facilitée par le recours aux doigts. En effet, dans un premier temps, l'enfant devra écrire les dix produits d'une table sur ses doigts puis réciter chaque résultat dans l'ordre en pointant le doigt correspondant, afin de s'habituer aux associations entre ses doigts et les résultats. Dans un second temps, quand l'enfant sera capable de réciter les mulitplications avec leurs résultats dans l'ordre, il pourra fermer le poing, produire une multiplication à l'oral en pointant le doigt correspondant, donner le produit et vérifier sa réponse en retournant son doigt. Cette activité permet ainsi une autocorrection.

En outre, Domahs et ses collègues (2004) ont évalué les effets d'une intervention en ajoutant des indices perceptifs pour faciliter la mémorisation des faits numériques. A chaque problème multiplicatif était alors associée une couleur en fonction du chiffre des unités de la réponse. Ainsi, les problèmes « 2x2 », « 2x7 », « 3x8 », « 4x6 », « 8x8 » et « 9x6 » étaient présentés de la même couleur durant l'intervention car le chiffre des unités de leur résultat correspondait au chiffre « 4 ». Durant les dix premières séances d'entraînement, le patient devait s'exercer à résoudre les calculs avec leur code couleur. Durant les dix séances suivantes, il devait résoudre les calculs qui étaient présentés en noir, sans code couleur. Les auteurs ont démontré qu'après les dix premières séances, les patients résolvaient mieux les calculs s'ils étaient présentés avec leur code couleur plutôt qu'en noir. A la fin des vingt séances d'intervention, les patients réussissaient aussi bien les calculs présentés en noir que les calculs présentés en couleur. Les indices perceptifs visuels semblent donc faciliter la mémorisation des faits multiplicatifs. Dans une autre étude, Domahs et ses collègues (2008) ont étudié l'ajout d'indices perceptifs sonores. Un son spécifique était alors associé à chaque chiffre des unités et était présenté avant chaque apparition d'un calcul. Les auteurs ont également démontré que l'ajout d'un indice sonore était facilitateur pour la résolution de multiplications simples. Toutefois, il est important de préciser que ces entraînements ont été effectués chez des patients adultes présentant une acalculie acquise et n'ont pas fait l'objet d'études chez l'enfant.

Enfin, il est également intéressant de travailler la résistance à l'interférence chez les sujets présentant une hypersensibilité à cette dernière. Pour cela, Noël et Karagiannakis (2020) proposent de présenter au sujet un tableau composé de produits appartenant à diverses tables. Le sujet devra alors entourer tous les produits d'une même table dans l'ordre croissant ou décroissant afin d'apprendre à résister aux interférences.

5. But de la présente étude

Après avoir présenté le contexte théorique de cette étude, nous allons à présent nous intéresser à l'objectif de ce mémoire universitaire, à savoir la proposition de deux subtests évaluant les faits additifs et les faits multiplicatifs, qui seront intégrés à une future batterie de la cognition mathématique. Des propositions d'épreuves d'évaluation des faits numériques ayant déjà été effectuées dans un précédent mémoire (Bardet, 2021), cette étude s'attachera donc à proposer des subtests différents, notamment en raison de leur administration et de l'ordre des opérations au sein de ces derniers. Plus précisément, l'objectif de ce mémoire est de créer deux épreuves reposant sur le modèle du Triple Code (Dehaene, 1992) et comportant une méthodologie de passation innovante. En effet, à notre connaissance, aucun test permettant l'évaluation des faits numériques ne propose une telle administration. De plus, la durée d'application de ces subtests sera courte afin de tenir compte des contraintes temporelles liées à l'évaluation orthophonique.

Méthodologie : proposition de subtests évaluant la mémorisation des faits arithmétiques

Précédemment, nous avons pu observer que la mise en œuvre des faits additifs et celle des faits multiplicatifs résultent de processus différents, l'une découlant d'une pratique répétée des stratégies de comptage (selon la conception dominante décrite dans la littérature depuis une trentaine d'années) et l'autre résultant d'un apprentissage mémoriel des tables de multiplications. Ainsi, dans la mesure où le développement de ces faits numériques repose sur des procédures différentes, il apparaît nécessaire de diviser l'évaluation des faits arithmétiques en deux épreuves : un premier subtest pour l'évaluation des faits additifs et un second pour l'évaluation des faits multiplicatifs. En outre, ces deux subtests seront informatisés et chronométrés afin de permettre une standardisation optimale ainsi qu'une mesure de la vitesse de résolution de ces faits arithmétiques.

1. Modalité d'entrée et modalité de réponse

Les faits arithmétiques correspondent à des associations verbales qui ne diffèrent pas d'autres séries automatiques comme l'alphabet ou les mois de l'année (Dehaene, 1992). Afin de reproduire le plus fidèlement possible l'émission de ces enchaînements verbaux, chaque opération sera énoncée par l'ordinateur et chaque réponse sera fournie à l'oral par le patient. Toutefois, les additions et les multiplications seront également présentées en code arabe sur l'écran afin de ne pas pénaliser les sujets présentant une faiblesse mnésique.

2. Consignes

Les consignes seront énoncées par l'ordinateur afin de garantir une fidélité inter-juges. Pour les faits additifs, la consigne sera énoncée telle quelle : « *Sur l'écran, tu vas voir apparaître des additions. Tu vas également les entendre. Tu devras donner le résultat de chaque addition le plus rapidement possible* ».

Pour les faits multiplicatifs, la consigne sera similaire à celle des additions : « *Sur l'écran, tu vas voir apparaître des multiplications. Tu vas également les entendre. Tu devras donner le résultat de chaque multiplication le plus rapidement possible* ».

3. Sélection et ordre des items

Une sélection de trente items avait déjà été réalisée pour chaque épreuve dans le précédent mémoire universitaire traitant des faits arithmétiques (Bardet, 2021). Ces calculs additifs et multiplicatifs, constitués d'opérandes de 2 à 9, ont été repris dans nos propositions d'épreuves. Toutefois, des items d'entraînement ainsi que des items de type N+0, Nx0, N+1, Nx1, N+10 et

Nx10 ont également été insérés à nos subtests. En outre, l'ordre des opérations au sein des épreuves sera également différent de celui proposé dans la précédente étude.

3.1. Items additifs

Deux items d'apprentissage composés de deux additions très simples seront proposés aux sujets avant de débuter les épreuves chronométrées, afin de permettre une familiarisation avec la tâche et une mise en confiance du patient. Une étude réalisée cette année dans le cadre d'un mémoire universitaire (Guillaume, soumis) a permis d'extraire deux opérations additives résolues correctement par une majorité d'enfants scolarisés en classes de CP et de CE1. Ainsi, l'opération lacunaire « 4+N = 4 » correspondait à l'une des additions les mieux réussies par les enfants de niveau scolaire CP. L'addition « 2+1 = 3 » correspondait quant à elle à l'une des opérations les mieux résolues par les enfants scolarisés en classe de CE1 durant une tâche de calcul mental. Ainsi, les problèmes additifs « 4+0 » et « 2+1 » ont été retenus comme items d'entraînement.

Le subtest évaluant la récupération en mémoire des additions simples à un chiffre est composé de trente-quatre items. Plus précisément, cette épreuve est constituée des trente additions sélectionnées dans le précédent mémoire pour l'évaluation des faits additifs (Bardet, 2021), ainsi que de quatre nouvelles opérations de type N+0, N+1 et N+10. Les trente items auparavant sélectionnés avaient été extraits des données de Bagnoud et ses collègues (2021) (doi : https://doi.org//10.17605/osf.io/etgbs), proposant pour chaque addition simple à un chiffre (de « 1+1 » à « 9+9 ») des temps de résolution moyens réalisés par des enfants de divers niveaux scolaires (début de première année primaire, fin de première année primaire, troisième année primaire, quatrième année primaire et cinquième années primaire). Cette sélection se compose donc de trente additions nécessitant des temps de résolution plus ou moins conséquents au cours du développement. Cette dernière inclut huit *ties*[1], additions constituées du même opérande (ex. « 2+2 ») ainsi que vingt-quatre *non-ties*[1], additions constituées d'opérandes différents (ex. « 4+5 »). S'agissant des items de tye N+0, N+1 et 10+N, il nous paraissait important de pouvoir évaluer leur résolution dans ce subtest dans la mesure où ces opérations additives font communément partie intégrante de chaque table d'addition. Par conséquent, deux items avec un opérande 10 ont été joints à cette épreuve. Un seul item N+0 ainsi qu'un unique item N+1 ont été intégrés à ce subtest en raison de la présence d'un exemplaire de chacune de ces opérations dans les items d'apprentissage.

Au sein de ce subtest, ces additions ont été ordonnées selon un ordre ascendant de difficulté. Pour cela, nous avons sélectionné comme critère de difficulté le temps de résolution nécessaire pour chaque addition. Ainsi, au plus les opérations nécessitent un temps de réponse conséquent, au plus leur résolution sera considérée comme difficile. Nous avons donc utilisé les données de Bagnoud et ses collègues (2021) qui fournissent pour chaque addition de notre subtest, hormis pour les items de type N+0 et 10+N, des temps de résolution moyens réalisés par des enfants de différents niveaux scolaires (début de première année primaire, fin de première année primaire, troisième année primaire, quatrième année primaire et cinquième année primaire). Plus précisément, pour ordonner notre liste d'items, nous avons calculé une moyenne globale des temps de réponse moyens disponibles pour chaque addition. Dans un premier temps, nous avons d'abord effectué cette moyenne pour les dix-sept additions dont la somme est inférieure

[1] Pour un souci d'uniformité avec la littérature, nous avons décidé de conserver dans cette présente étude les termes anglophones « tie » et « non-tie ».

ou égale à dix en utilisant les temps de résolution moyens obtenus par les enfants des cinq niveaux scolaires cités précédemment (y compris pour l'item N+1 que nous avons inséré à cette épreuve). Nous avons ensuite classé ces items additifs dans un ordre croissant selon la moyenne globale obtenue pour chaque addition. Dans un second temps, nous avons procédé de la même manière avec les quatorze additions dont la somme est supérieure à dix et les avons classées à la suite de la première série d'opérations additives. Toutefois, pour ces plus grandes additions, la moyenne a été calculée en utilisant seulement les temps de résolution moyens des enfants de troisième, quatrième et cinquième années primaire. Ces opérations n'avaient en effet pas été proposées aux enfants de première année primaire étant jugées trop difficiles pour ce niveau scolaire. Ainsi, nous avons donc obtenu une liste d'items additifs rangés selon un ordre croissant de difficulté, du temps de résolution le plus court au plus conséquent. Néanmoins, il est important de préciser que les données de Bagnoud et ses collègues (2021) ne fournissent pas de temps de réponse moyens pour les trois items de ce subtest avec un opérande 0 et un opérande 10, ces derniers seront donc positionnés au sein de l'épreuve en émettant des suppositions quant au degré de difficulté de leur résolution. Ces hypothèses seront discutées dans la dernière partie de ce mémoire.

En outre, il nous semblait préférable que les additions appartenant à une même table et dont la somme ne diffère que d'un pas (ex. « 9+6 = 15 » et « 9+7 = 16 ») ne soient pas positionnées l'une après l'autre au sein du subtest. En effet, le sujet pourrait utiliser la réponse produite pour l'item précédent et énoncer le nombre venant juste avant ou juste après dans la chaîne verbale afin d'obtenir le résultat de l'addition cible. Nous avons donc modifié la position de certaines additions d'un ou deux emplacement(s) au sein de l'épreuve pour pallier cette limite.

3.2. Items multiplicatifs

Deux items d'entraînement considérés comme simples précéderont les multiplications du subtest, à savoir les items « 2x2 » et « 3x1 » qui appartiennent aux premières tables de multiplications apprises par les enfants. De plus, ces items ont été sélectionnés en raison de la petite taille de leurs produits. En effet, selon Fayol (2018), la taille des produits présage la survenue d'erreurs et donc le degré de difficulté de l'opération.

Le subtest évaluant la récupération en mémoire des multiplications simples à un chiffre sera ensuite composé de trente-quatre items. Plus précisément, il sera constitué des opérations qui avaient été sélectionnées dans le précédent mémoire universitaire pour l'évaluation des faits multiplicatifs (Bardet, 2021), ainsi que de cinq nouvelles multiplications de type Nx0, Nx1 et Nx10. Concernant les trente opérations disponibles dans la précédente étude (Bardet, 2021), la multiplication « 2x2 » a été déplacée dans les items d'entraînement. Pour les vingt-neuf autres multiplications, nous avons également extrait leurs degrés d'interférence proactif, proposés dans l'étude de De Visscher et Noël (2014b). Ces auteurs ont en effet calculé un poids d'interférence pour chacune des multiplications appartenant aux tables de 2 à 9, en considérant cet ordre habituel d'apprentissage. Cette mesure du degré d'interférence correspond alors au nombre d'associations de paires de chiffres qu'une multiplication partage avec les autres items appris précédemment, qu'il s'agisse des chiffres contenus dans les opérandes ou dans les résultats (ex. l'opération « 3x9 = 27 » partage trois chiffres avec la multiplication 3x7 = 21, soit « 2 », « 3 » et « 7 ». Ces deux opérations ont donc en commun trois combinaisons de deux chiffres, à savoir « 2 et 3 », « 2 et 7 » et « 3 et 7 ». De plus, l'opération « 3x9 = 27 » partage également six associations de paires de chiffres avec d'autres multiplications apprises précédemment. Son degré d'interférence est donc égal à 9.). Ces vingt-neuf items comportent donc un poids d'interférence plus ou moins élevé. En outre, à l'instar de l'épreuve des faits additifs, il nous paraissait également intéressant d'évaluer la résolution des items Nx0, Nx1 et Nx10 qui font communément partie des tables de multiplication. Par conséquent, deux items avec un opérande 10 ainsi que deux items avec un opérande 0 ont été joints à cette épreuve. Un unique item Nx1 a été intégré à ce subtest en raison de la présence d'un exemplaire de ce type d'opération dans les items d'entraînement.

Les multiplications ont également été échelonnées selon un ordre croissant de difficulté. Dans un premier temps, pour ordonner les vingt-neuf multiplications extraites dans la précédente étude (Bardet, 2021), nous avons sélectionné trois critères de difficulté considérés dans cet ordre : niveau scolaire d'acquisition, degré d'interférence et taille des produits. Dans un premier temps, ces items ont été divisés en deux groupes selon le niveau scolaire de leur apprentissage : un premier groupe a été réalisé pour les multiplications apprises en deuxième année primaire (tables de 2, 3, 4 et 5) et un deuxième groupe a été créé pour celles apprises en troisième année primaire (tables de 6, 7, 8 et 9). Ensuite, à l'intérieur de ces deux groupes, les multiplications ont été ordonnées selon la catégorie à laquelle appartient leur degré d'interférence (catégorie 1 : items à degré d'interférence très faible, catégorie 2 : items à degré d'interférence faible, catégorie 3 : items à degré d'interférence moyen et catégorie 4 : items à degré d'interférence élevé). Selon ce critère, les items les moins interférents sont considérés comme étant les plus faciles et les produits qui comprennent le plus grand nombre d'associations comme étant les plus difficiles. Il existe en effet une corrélation entre le poids d'interférence et la survenue d'erreurs (Fayol, 2018). Enfin, à l'intérieur de ces différents groupes de degrés d'interférence, les items ont été classés selon la catégorie de la taille de leurs produits (catégorie 1 : petits produits, catégorie 2 : produits de taille moyenne, catégorie 3 : grands produits). La résolution des items avec des grands opérandes est en effet plus difficile que celle avec des plus petits opérandes (Aschcraft & Christy, 1995), et donc avec des produits de petite taille. Ainsi, nous obtenons une liste d'items organisés selon trois critères de difficulté. En ce qui concerne les cinq multiplications de type Nx0, Nx1 et Nx10, leur résolution repose sur l'application de règles (Sokol et al., 1991) et ne fait donc pas l'objet d'une récupération du résultat en mémoire à long terme à l'instar des autres items de cette épreuve. Un calcul du degré d'interférence n'a ainsi pu être réalisé pour ces multiplications. Leurs emplacements au sein de l'épreuve seront donc discutés dans la dernière partie de cette étude.

4. Administration

La passation de ces deux épreuves s'inspire de celle de l'Echelle de Vocabulaire en Images Peabody, l'adaptation française du Peabody Picture Vocabulaire test-revised, qui évalue le stock lexical passif des sujets (Dunn et al., 1993). Dans ce test, le patient ne débute pas nécessairement l'épreuve à partir du premier item mais commence cette dernière à un certain palier correspondant à sa tranche d'âge. Ainsi, dans nos deux subtests, le sujet ne répondra dans un premier temps qu'aux faits arithmétiques présents dans sa zone d'habileté, c'est-à-dire correspondant à son niveau scolaire. Il ne sera alors pas contraint de répondre à des items jugés trop faciles ou trop difficiles pour lui. Toutefois, si le sujet présente des difficultés à résoudre les faits arithmétiques censés correspondre à son niveau scolaire, des retours en arrière seront effectués par l'ordinateur afin d'analyser la résolution d'additions et/ou de multiplications d'un niveau antérieur. Ces retours en arrière seront réalisés autant que nécessaire afin de déterminer les opérations qu'il est capable de résoudre. A l'inverse, si le patient répond correctement à un certain nombre d'items correspondant à son niveau, des faits arithmétiques plus complexes lui seront proposés. Un critère d'arrêt sera toutefois appliqué si un nombre conséquent d'erreurs consécutives est effectué dans une zone d'habileté d'un niveau supérieur. Ces trois critères (passage à la catégorie supérieure, retours en arrière et critère d'arrêt), ainsi que les périmètres des différentes zones d'habileté, seront définis à la suite de l'étalonnage de ces deux subtests.

L'item de départ de chaque zone d'application sera sélectionné selon les propositions de Dunn et ses collègues (1993). Dans leur test, ce dernier correspond à « l'item situé légèrement au-dessous d'un écart-type en dessous de la moyenne des scores bruts » pour un groupe de même niveau (Dunn et al., 1993, p. 12). Ainsi, selon ce critère, celui-ci se situerait environ cinq items en dessous du premier item de la zone d'habileté du sujet afin de garantir une suite de réussites et d'assurer la motivation du patient.

5. Cotation

La cotation de cette épreuve sera binaire : seul le résultat exact de l'opération sera accepté. Un point sera accordé en cas de bonne réponse et aucun point ne sera attribué si la réponse est erronée. Plus précisément, l'orthophoniste appuiera sur la touche « O » du clavier si la réponse énoncée par le sujet est correcte et sur la touche « N » si la réponse est incorrecte.

Un temps global nécessaire à la réalisation de l'épreuve ainsi qu'un temps de réponse pour chaque item seront recueillis. Après chaque prise en compte de la réponse du sujet par l'intermédiaire des touches « O » ou « N » du clavier, les mesures de temps seront interrompues. Une page vierge apparaîtra alors sur l'écran de l'ordinateur afin que l'orthophoniste puisse retranscrire la réponse de l'enfant sans que cette saisie n'influe sur les temps de réponse du sujet. Un appui sur la barre d'espace permettra de poursuivre l'épreuve avec l'apparition du fait numérique suivant.

Toutefois, pour chaque opération, le temps de réponse sera également contraint afin de permettre à l'orthophoniste de départager chez un sujet l'application de stratégies procédurales d'une récupération du résultat en mémoire à long terme. Ainsi, cette contrainte sur les temps de réponse devra permettre au thérapeute de conclure que le sujet ne possède pas l'association opérandes - résultat en mémoire à long terme si le résultat correct n'est pas énoncé dans le temps imparti. Cette limitation de temps sera définie à la suite de l'étalonnage de ces deux épreuves. De la même manière que précédemment, lorsque le temps de réponse sera écoulé, une page vierge apparaîtra sur l'écran afin que l'orthophoniste puisse retranscrire ses observations. Un appui sur la barre d'espace permettra alors la poursuite du subtest.

6. Analyse quantitative et analyse qualitative

S'agissant de l'analyse quantitative, un score brut sera obtenu pour chaque subtest et correspondra alors au nombre d'items réussis par rapport au nombre total d'items de l'épreuve. Les items situés dans des zones d'habileté inférieure qui n'ont pas été présentés au patient seront considérés comme des réponses correctes. A l'inverse, les items situés dans des zones d'habileté supérieure n'ayant pas été proposés au sujet seront comptabilisés comme des échecs. Ce score brut sera ensuite comparé aux scores réalisés par les sujets de même niveau scolaire. Le thérapeute obtiendra donc un écart-type et/ou un percentile permettant d'apprécier la performance du patient par rapport à ses pairs. Cette comparaison à la norme sera également réalisée pour les mesures de temps, qu'il s'agisse du temps global nécessaire à la réalisation de l'épreuve ou des temps de résolution obtenus pour chaque item. Le calcul du temps de réponse est en effet un critère important à considérer car il permet d'évaluer « le degré de maturité des stratégies utilisées » par l'enfant (Noël & Karagiannakis, 2020, p. 150). En effet, plus les stratégies sont immatures et plus les temps de résolution sont longs. A l'inverse, plus les stratégies sont matures et automatisées et plus les temps de réponse sont courts, la stratégie la plus mature étant celle de la récupération du résultat en mémoire à long terme (Noël & Karagiannakis, 2020).

D'un point de vue qualitatif, une analyse fine des items réussis et échoués par le sujet sera effectuée pour chaque subtest afin de rendre compte des critères qui lui posent le plus de difficultés (ex. taille des opérandes du calcul, degré d'interférence). Il sera également intéressant d'observer le type de stratégies utilisées par le sujet en cas d'un défaut de récupération d'un résultat en mémoire à long terme ou bien d'un déficit d'automatisation des processus de comptage pour le subtest des additions simples. Afin de faciliter la prise de notes de l'orthophoniste, une liste préétablie composée des différentes stratégies pouvant être utilisées par un sujet pour la résolution d'un calcul additif (ex. comptage digital, procédural « all », décomposition) ou d'un calcul multiplicatif (ex. additions répétées, dérivation à partir de faits proches connus) sera disponible en version papier. L'orthophoniste pourra alors écrire à côté de chaque stratégie les opérations qui ont nécessité son utilisation. A la fin de la passation, le thérapeute pourra alors analyser le répertoire stratégique des sujets, ainsi que la fréquence et les conditions de leur utilisation. Toutefois, il est possible que l'orthophoniste ne puisse observer de quelconque verbalisation ou de comportement pouvant faire penser à l'usage d'une stratégie, il pourra alors être intéressant de demander au patient celles qu'il a mises en œuvre pour parvenir aux résultats des calculs proposés.

Résultats

L'évaluation des faits arithmétiques que nous proposons dans cette étude est ainsi divisée en deux épreuves : un premier subtest pour les faits additifs et un second pour les faits multiplicatifs.

1. Subtest des faits additifs

Afin de mettre en confiance le sujet et de le familiariser avec la tâche, deux items d'entraînement lui seront proposés avant de débuter l'épreuve chronométrée. Ces derniers sont présentés dans le tableau 1.

Tableau 1. Items d'entraînement.

Numéro de l'item	Addition
Ex. 1	2 + 1
Ex. 2	4 + 0

Le sujet débutera ensuite l'épreuve en ne répondant qu'aux items propres à son niveau scolaire, situés dans sa zone d'habileté. Selon les performances du patient, des items jugés plus faciles ou plus difficiles lui seront proposés par la suite afin d'évaluer son niveau d'aptitude.

Le tableau 2 présente les items additifs de cette épreuve, classés par ordre ascendant de difficulté.

Tableau 2. Epreuve des faits additifs s'appuyant sur les données de Bagnoud et ses collègues (2021).

Numéro de l'item	Type d'opération	Addition	Moyenne globale des temps de réponse	Temps de réponse moyens (ms)				
				Début 1ᵉ P	Fin 1ᵉ P	3ᵉ P	4ᵉ P	5ᵉ P
1	Tie	**1 + 1**	**1 215**	1 708	1 426	1 070	981	892
2	Tie	**5 + 5**	**1 325**	1 806	1 498	1 174	1 131	1 017
3	Tie	**2 + 2**	**1 420**	2 295	1 629	1 144	1 058	978
4	Tie	**3 + 3**	**1 469**	2 499	1 665	1 147	1 066	970
5	Non-tie C	**4 + 1**	**1 538**	2 491	1 644	1 340	1 191	1 024
6	Tie	**4 + 4**	**1 645**	2 878	2 110	1 163	1 107	967
7	Non-tie A	**3 + 2**	**2 157**	3 503	3 025	1 653	1 438	1 168
8	Non-tie C	**3 + 0**	/	/	/	/	/	/
9	Non-tie A	**8 + 2**	**2 433**	4 214	3 017	2 053	1 546	1 335
10	Non-tie A	**5 + 2**	**2 538**	4 184	3 043	2 061	1 863	1 539
11	Non-tie A	**7 + 2**	**2 695**	4 369	2 936	2 458	2 040	1 672
12	Non-tie A	**4 + 2**	**2 734**	4 452	3 608	2 333	1 754	1 524
13	Non-tie A	**6 + 2**	**2 780**	4 416	3 477	2 255	2 021	1 732
14	Non-tie A	**7 + 3**	**2 984**	5 157	3 541	2 805	1 929	1 490
15	Non- tie C	**10 + 4**	/	/	/	/	/	/
16	Non-tie A	**6 + 3**	**3 038**	5 106	4 069	2 477	1 916	1 624
17	Non-tie A	**5 + 4**	**3 210**	5 300	4 677	2 415	1 924	1 736
18	Non-tie A	**4 + 3**	**3 246**	4 987	4 483	2 703	2 248	1 809
19	Non-tie A	**6 + 4**	**3 339**	5 589	4 594	2 779	2 052	1 683
20	Non-tie C	**10 + 2**	/	/	/	/	/	/
21	Non-tie B	**6 + 6**	**1 475**			1 807	1 416	1 202
22	Non-tie B	**9 + 9**	**1 830**			2 520	1 690	1 280
23	Non-tie B	**7 + 7**	**2 103**			3 118	1 911	1 280
24	Non-tie B	**9 + 5**	**2 729**			3 432	2 560	2 197
25	Non-tie B	**8 + 4**	**3 001**			3 838	2 884	2 283
26	Non-tie B	**9 + 6**	**3 128**			4 052	2 949	2 385
27	Non-tie B	**7 + 4**	**3 065**			3 783	3 029	2 384
28	Non-tie B	**9 + 7**	**3 343**			4 300	3 178	2 551
29	Non-tie B	**8 + 5**	**3 438**			4 076	3 434	2 806
30	Non-tie B	**9 + 8**	**3 591**			4 651	3 547	2 575
31	Non-tie B	**8 + 6**	**4 109**			4 788	4 028	3 513
32	Non-tie B	**7 + 5**	**3 763**			4 493	3 771	3 025
33	Non-tie B	**8 + 7**	**4 319**			5 335	4 265	3 358
34	Non-tie B	**7 + 6**	**3 829**			5 007	3 535	2 946

S'agissant des non-ties, la catégorie A correspond aux additions proposées aux enfants des cinq niveaux scolaires, dont la somme est inférieure ou égale à 10. Le groupe B est quant à lui composé des items additifs dont la somme est supérieure à 10. Ces derniers n'ont pas été proposés aux enfants scolarisés en première année primaire étant jugés trop difficiles pour ce niveau scolaire. Enfin, la catégorie C comprend les additions de type N+0, N+1 et N+10 qui ont été ajoutées aux items précédemment sélectionnés (Bardet, 2021).

En outre, nous avons modifié la position de certaines additions d'un ou deux emplacement(s) au sein de l'épreuve afin d'éviter que les additions appartenant à une même table et dont la somme ne diffère que d'un pas (ex. « 9+6 = 15 » et « 9+7 = 16 ») ne soient positionnées l'une après l'autre au sein du subtest. En effet, le patient pourrait utiliser la réponse produite pour l'addition précédente et énoncer le nombre situé juste avant ou juste après dans la chaîne numérique afin d'obtenir le résultat de l'item cible.

2. Subtest des faits multiplicatifs

À l'instar du subtest des faits additifs, les deux items d'apprentissage qui précéderont l'épreuve chronométrée évaluant la récupération en mémoire des multiplications simples sont présentés dans le tableau 3.

Tableau 3. Items d'entraînement.

Numéro de l'item	Multiplication
Ex. 1	2 x 2
Ex. 2	3 x 1

Le tableau 4 présente ensuite les items de l'épreuve des faits multiplicatifs, classés selon un ordre croissant de difficulté.

Tableau 4. Epreuve des faits multiplicatifs s'appuyant sur les attendus de fin d'année scolaire (Ministère de l'Education Nationale, 2022), le calcul du poids d'interférence selon De Visscher et Noël (2014b), ainsi que sur la taille des produits.

Numéro de l'item	Multiplication	Niveau scolaire d'acquisition	Catégorie du degré d'interférence *(degré d'interférence)*	Catégorie de la taille du produit *(taille du produit)*
1	**2 x 3**	Fin CE1	1 *(0)*	1 *(6)*
2	**2 x 5**	Fin CE1	1 *(0)*	1 *(10)*
3	**3 x 3**	Fin CE1	1 *(0)*	1 *(9)*
4	**2 x 4**	Fin CE1	1 *(1)*	1 *(8)*
5	**4 x 1**	/	/	/
6	**3 x 5**	Fin CE1	1 *(2)*	1 *(15)*
7	**2 x 6**	Fin CE1	1 *(3)*	1 *(12)*
8	**5 x 5**	Fin CE1	1 *(3)*	1 *(25)*
9	**3 x 0**	/	/	/
10	**2 x 7**	Fin CE1	2 *(4)*	1 *(14)*
11	**4 x 4**	Fin CE1	2 *(5)*	1 *(16)*
12	**5 x 6**	Fin CE1	2 *(6)*	2 *(30)*
13	**5 x 9**	Fin CE1	2 *(6)*	2 *(45)*
14	**4 x 10**	Fin CE1	/	/
15	**5 x 7**	Fin CE1	2 *(6)*	2 *(35)*
16	**3 x 4**	Fin CE1	3 *(10)*	1 *(12)*
17	**3 x 7**	Fin CE1	3 *(13)*	1 *(21)*
18	**4 x 6**	Fin CE1	3 *(11)*	1 *(24)*
19	**5 x 0**	/	/	/
20	**3 x 8**	Fin CE1	3 *(13)*	1 *(24)*
21	**4 x 9**	Fin CE1	3 *(9)*	2 *(36)*

Numéro de l'item	Multiplication	Niveau scolaire d'acquisition	Catégorie du degré d'interférence *(degré d'interférence)*	Catégorie de la taille du produit *(taille du produit)*
22	**5 x 8**	Fin CE1	3 *(9)*	2 *(40)*
23	**4 x 7**	Fin CE1	4 *(17)*	1 *(28)*
24	**3 x 10**	Fin CE1	/	/
25	**4 x 8**	Fin CE1	4 *(25)*	2 *(32)*
26	**6 x 6**	Fin CE2	2 *(4)*	2 *(36)*
27	**9 x 9**	Fin CE2	2 *(6)*	3 *(81)*
28	**6 x 8**	Fin CE2	3 *(11)*	2 *(48)*
29	**7 x 8**	Fin CE2	3 *(9)*	3 *(56)*
30	**6 x 9**	Fin CE2	3 *(13)*	3 *(54)*
31	**6 x 7**	Fin CE2	4 *(22)*	2 *(42)*
32	**8 x 8**	Fin CE2	4 *(17)*	3 *(64)*
33	**7 x 9**	Fin CE2	4 *(17)*	3 *(63)*
34	**8 x 9**	Fin CE2	4 *(19)*	3 *(72)*

Pour rappel, les degrés d'interférence des différentes multiplications ont été divisés en quatre catégories :

- Catégorie 1 : items à degré d'interférence très faible (entre 0 et 3)
- Catégorie 2 : items à degré d'interférence faible (entre 4 et 6)
- Catégorie 3 : items à degré d'interférence moyen (entre 9 et 13)
- Catégorie 4 : items à degré d'interférence élevé (entr 17 et 25)

Différentes catégories ont également été réalisées pour la taille des produits des items multiplicatifs :

- Catégorie 1 : petits produits (de 4 à 29)
- Catégorie 2 : produits de taille moyenne (de 30 à 55)
- Catégorie 3 : grands produits (de 56 à 81)

Pour une meilleure lisibilité, les parties en gris et blanc permettent de visualiser les différentes catégories de degrés d'interférence dans lesquelles les items ont ensuite été classés selon la catégorie de la taille de leurs produits.

Discussion

Ces propositions d'épreuves évaluant les faits arithmétiques s'inscrivent dans un travail plus global de création d'une nouvelle batterie de la cognition mathématique, fondée sur le modèle cognitiviste du Triple Code (Dehaene, 1992). Cette future batterie a notamment comme objectif de fournir aux orthophonistes une large variété d'épreuves permettant d'évaluer l'ensemble des compétences numériques d'un sujet. S'agissant de notre étude, il paraît primordial que l'orthophoniste dispose de subtests évaluant le stockage et la récupération des faits numériques en mémoire à long terme. En effet, les enfants avec un trouble des apprentissages mathématiques présenteraient systématiquement des difficultés dans la mémorisation de ces derniers (De Visscher & Noël, 2014b). Ces épreuves permettront donc à l'orthophoniste d'objectiver des difficultés dans ce domaine et d'envisager, à la lumière des habiletés numériques de base évaluées chez ce même sujet, un éventuel trouble des apprentissages mathématiques. Ce déficit cognitif numérique étant principalement expliqué par un déficit du sens du nombre et/ou par un défaut d'accès au sens du nombre via les codes symboliques, une évaluation de ces habiletés numériques de base sera donc primordiale afin de réaliser un diagnostic différentiel entre un enfant présentant un trouble des apprentissages mathématiques et un enfant présentant un retard scolaire dans le domaine de la cognition mathématique (Lafay et al., 2014). Toutefois, un regard multidisciplinaire sera également important à considérer dans la pose d'un diagnostic de trouble cognitif numérique.

Dans ce mémoire universitaire, nous avons donc proposé deux épreuves permettant d'évaluer le stockage et la récupération des faits numériques qui seront intégrées à une future batterie de la cognition mathématique. Dans cette partie, nous argumenterons nos propositions d'épreuves tout en discutant de leurs limites et de leurs intérêts pour la pratique orthophonique.

1. Sélection et ordre des items

Dans cette présente étude, nous considérons comme faits arithmétiques les additions et les multiplications simples, c'est-à-dire dont les opérandes sont composés d'un chiffre. Toutefois, concernant les opérations additives, il est important de préciser que certaines études ont récemment mis en évidence la présence d'un effet de taille lors de la résolution de petites additions constituées d'opérandes allant de 1 à 4, suggérant alors que ces problèmes additifs seraient résolus rapidement et inconsciemment par des processus de comptage automatisés (Barrouillet & Thevenot, 2013). Ainsi, ces observations remettent en cause l'hypothèse qui faisait actuellement consensus dans la littérature depuis une trentaine d'années, à savoir la récupération en mémoire des résultats d'additions dont la somme est inférieure à dix.

En outre, les soustractions et les divisions étant majoritairement résolues par récupération de l'addition associée (Fayol, 2018) ou du fait multiplicatif correspondant (Robinson et al., 2006), ces dernières n'ont pas fait l'objet d'une proposition d'épreuve pour notre évaluation des faits arithmétiques.

1.1. Subtest des faits additifs

Nous avons considéré dans cette épreuve les opérations appartenant aux tables d'addition de 0 à 10. Ces dernières ont été classées au sein du subtest selon un ordre croissant de difficulté en fonction du temps de réponse nécessaire à leur résolution. Les premiers items de ce subtest pourront être proposés dès le cours préparatoire. En effet, selon les attendus de fin d'année et les repères annuels de progression (Ministère de l'Education Nationale, 2022), les enfants apprennent les compléments à dix dès le début de l'année de CP. Les doubles des nombres inférieurs à dix sont quant à eux appris au plus tard durant le deuxième trimestre de cette même année. En fin de cours préparatoire, les élèves doivent alors « connaître » l'ensemble des additions précédemment citées. En outre, ils doivent également « connaître » ou savoir « retrouver rapidement » la somme de deux nombres inférieurs à dix. Dans ce contexte, l'emploi du verbe « connaître » semble signifier « mémoriser », tandis que celui du verbe « retrouver » accompagné de l'adverbe « rapidement » semble évoquer l'utilisation d'une stratégie procédurale efficace permettant de résoudre l'addition proposée. En fin de deuxième année primaire, les élèves doivent « connaître » l'ensemble des tables d'addition.

L'évolution des temps de résolution des problèmes additifs au cours du développement a été étudiée par Bagnoud et ses collègues (2021) chez 133 enfants scolarisés de la première année à la cinquième année primaire, ainsi que chez 34 adultes. Ainsi, concernant les *ties*, un effet de taille pour les petits problèmes allant de « 1+1 » à « 4+4 » devrait être identifiable chez les enfants de première année primaire lors de la passation de ce subtest. Selon les auteurs, la présence de cet effet de taille suggère que les enfants n'apprennent pas par cœur les résultats des *ties* au début de leur scolarité. En outre, dès la troisième année primaire, cet effet de taille ne devrait plus être observable pour les doubles dont la somme est inférieure ou égale à dix, ce qui est en faveur d'un passage de l'utilisation de stratégies procédurales à une récupération des résultats des additions en mémoire à long terme. S'agissant des *ties* avec de grands opérandes (allant de 6 à 9), des temps de solution plus longs que les *ties* avec de petits opérandes devraient être observés. Toutefois, dans les données de Bagnoud et ses collègues (2021), nous relevons la présence d'une certaine hétérogénéité concernant ces temps de résolution réalisés par les différents groupes d'âge pour les additions allant de « 6+6 » à « 9+9 ». Selon les auteurs, leur résolution pourrait conduire, à l'instar des *non-ties*, à un mélange de stratégies déclaratives et procédurales, pouvant expliquer cette observation. La sélection d'une quelconque procédure pourrait notamment dépendre du contexte de l'opération, des réussites antérieures de cette stratégie procédurale et du coût de son utilisation (Lemaire & Arnaud, 2014, cités dans Fayol, 2018). Cela pourrait alors expliquer cette hétérogénéité observée concernant les temps de solution. D'un point de vue général, les *ties* seraient plus facilement encodés et récupérés en mémoire que les *non-ties* (Blankenberger, 2001 ; LeFevre et al., 2004). Leur résolution serait ainsi plus rapide et donnerait lieu à moins d'erreurs (Campbell & Gunter, 2002).

Concernant les *non-ties* de petite taille dont les opérandes sont inférieurs ou égaux à 4, un effet de taille devrait être observable pour chaque groupe d'âge, ceci étant en faveur de l'hypothèse d'une automatisation des processus de comptage concernant la résolution d'opérations additives. Pour les *non-ties* de taille moyenne (dont la somme est inférieure ou égale à dix et dont au moins un opérande est supérieur à quatre), les données de Bagnoud et ses collègues (2021) n'ont mis en évidence aucun effet de taille, quelle que soit la somme de l'opération (entre 8 et 10) et quelle que soit la tranche d'âge. Ce même plateau a été retrouvé pour les *non-ties* de grande taille dont la somme varie entre 13 et 17. Selon les auteurs, il est pourtant indéniable qu'un effet de taille devrait être mis en évidence pour les moyens et les grands *non-ties* dans la continuité de celui observé pour les petits problèmes. Cet absence d'effet de taille dans leur étude ne fait actuellement l'objet d'aucune explication théorique précise.

En outre, il nous semblait intéressant de pouvoir évaluer dans cette épreuve les problèmes additifs de type N+0, N+1 et 10+N qui font communément partie intégrante des tables d'addition. La résolution des problèmes de type +1, c'est-à-dire des additions composées d'un opérande 1, est spécifique. Cette dernière semble en effet reposer sur l'application d'une règle qui consiste à énoncer le nombre venant juste après le terme de l'addition qui diffère de 1 (Bagnoud et al., 2021). Dès la première année primaire, les problèmes de type +1 sont résolus plus rapidement que tous les autres items *non-ties*, quelle que soit la taille de l'autre opérande. Ils ne font donc pas l'objet d'un effet de taille et semblent ainsi être traités différemment des autres problèmes additifs. L'item de type +1 que nous avons décidé d'inclure aux additions précédemment sélectionnées (Bardet, 2021) sera positionné à l'instar des autres opérations additives, c'est-à-dire selon la moyenne globale des temps de résolution moyens obtenus par les enfants des cinq niveaux scolaires selon les données de Bagnoud et ses collègues (2021). En outre, concernant les items constitués d'un opérande 0, la résolution de ces derniers repose sur l'application d'une règle, à savoir N+0 = N (Noël & Karagiannakis, 2020). Ne disposant pas de données concernant les temps de solution de ces opérations, nous avons dû émettre des hypothèses quant à la difficulté de leur résolution, et ainsi à leur emplacement au sein de l'épreuve. Nous avons ainsi considéré la résolution de ce type d'additions comme ayant un degré de difficulté faible. En effet, selon une étude récente réalisée cette année dans le cadre d'un mémoire universitaire (Guillaume, soumis), l'opération « 4+N = 4 » avait été présentée à des enfants scolarisés en classe de cours préparatoire et avait alors été correctement résolue par la grande majorité des sujets. Cette opération, jugée facile, avait donc fait l'objet d'un item d'exemple de notre subtest. L'addition de type N+0 que nous avons décidé d'intégrer à notre épreuve sera donc positionnée parmi les premières additions du subtest.

De plus, s'agissant des opérations constituées d'un opérande 10, la résolution de ces dernières nécessite une certaine maîtrise des concepts de dizaines et d'unités, correspondant alors à l'un des attendus de fin d'année de CP (Ministère de l'Education Nationale, 2022). Nous avons positionné aléatoirement ces deux items parmi les dernières additions qui peuvent être proposées dès le CP car nous supposons que leur résolution est plus difficile que celle des *ties* ou encore des items de type N+2. Il est important de préciser que l'emplacement de ces opérations (N+0, N+1 et 10+N) au sein de l'épreuve a fait l'objet d'une réflexion. En effet, aux prémices de la conception de l'épreuve, nous pensions positionner aléatoirement ces opérations parmi l'ensemble du subtest afin d'évaluer leur résolution qui repose sur l'application de règles ou d'une connaissance de la base 10 dans différentes zones d'habileté. Toutefois, l'ordre croissant de difficulté n'aurait pas été respecté au sein de l'épreuve (ex. insertion de l'addition « 3+0 » entre « 9+7 » et « 8+5 »), cette proposition n'a donc pas été retenue.

Ce subtest est constitué d'items dont le plus grand des opérandes est positionné en premier afin de ne pas pénaliser les sujets présentant une faiblesse mnésique lors de la résolution des faits additifs. Des difficultés de mémoire de travail peuvent en effet intervenir lors de l'inversion des opérandes de l'addition avant que le sujet ne récupère le résultat appris en mémoire. Toutefois, en cas d'échec de récupération en mémoire à long terme du résultat de l'opération, cette disposition des opérandes sous-tend l'utilisation de la procédure « min », stratégie procédurale la plus mature. Dans ce subtest, nous ne pourrons donc pas observer si le sujet sait utiliser la stratégie du « counting min » quelle que soit la position du plus grand terme dans l'addition, afin de l'incrémenter ensuite d'un nombre de pas égal au plus petit terme.

1.2. Subtest des faits multiplicatifs

L'apprentissage des tables de multiplication s'effectue durant le cycle 2 qui regroupe les classes de CP, de CE1 et de CE2. D'après les attendus de fin d'année et les repères annuels de progression de l'Education Nationale (2022), une première approche des tables de multiplication est réalisée au plus tard durant le deuxième trimestre de l'année de CP avec l'apprentissage des doubles des nombres inférieurs à dix. Ces derniers doivent être mémorisés en fin d'année par le biais d'additions itérées (ex. l'enfant sait compléter des additions comme 6 + 6 = ? et il sait répondre à des questions comme : quel est le double de 7 ?). Cette notion est en effet inhérente au concept des tables de multiplication, dont l'apprentissage mémoriel débutera l'année suivante. De plus, à partir du troisème trimestre du cours préparatoire, les élèves apprennent à résoudre quelques problèmes multiplicatifs par l'intermédiaire d'une itération d'additions, dans un objectif de construction du sens de la multiplication. Par la suite, l'apprentissage par cœur des tables de multiplication débutera avec la table de 2 dès le deuxième trimestre de l'année de CE1. Au plus tard durant le troisième trimestre de cette même année, les élèves apprendront les tables de multiplication de 3, de 4 et de 5, ainsi que les multiplications par 10. En fin de deuxième année primaire, ces faits arithmétiques devront être mémorisés et les élèves devront également savoir multiplier par 10 un nombre inférieur à 100. L'apprentissage mémoriel des tables de multiplication se poursuivra ensuite au plus tard durant le troisième trimestre de l'année de CE2 avec les tables de 6, de 7, de 8 et de 9. En fin de troisième année primaire, l'ensemble des faits multiplicatifs devront être mémorisés. Ainsi, notre subtest qui a comme objectif d'évaluer la récupération en mémoire des faits multiplicatifs pourra être proposé dès le CE1, année scolaire durant laquelle l'apprentissage répété des tables de multiplication débute. Plus précisément, notre proposition d'épreuve sera composée d'items appartenant aux tables de multiplication de 0 à 10. La sélection d'items réalisée dans le précédent mémoire pour la création d'un subtest évaluant les faits multiplicatifs (Bardet, 2021) n'incluait pas les items de type Nx0, Nx1 et Nx10. Bien que la résolution de ces derniers repose davantage sur l'application de règles (Sokol et al., 1991) que sur une récupération du résultat en mémoire à long terme, nous avons toutefois fait le choix d'intégrer ces items à notre épreuve. En effet, ces derniers font communément partie de chaque table de multiplication et la connaissance de ces algorithmes est essentielle pour la résolution de calculs plus complexes. Il nous semblait donc nécessaire de pouvoir évaluer leur résolution au sein de cette épreuve.

En outre, pour ordonner les items au sein de ce subtest, nous avons sélectionné trois paramètres de difficulté considérés dans cet ordre : le niveau scolaire d'acquisition, le degré d'interférence et la taille du produit. Au-delà du critère du niveau d'acquisition, les performances en multiplications sont massivement influencées par ces deux derniers facteurs. Dans leur étude, De Visscher et Noël (2014b) ont analysé les performances de 126 enfants de troisième et cinquième années primaire ainsi que d'étudiants. Ils ont démontré que ces deux paramètres n'influent pas de la même manière sur la résolution des multiplications. En effet, pour ces trois groupes d'âge, la taille du produit influence largement la précision des réponses tandis que le degré d'interférence influence davantage la vitesse de résolution des opérations. Chez les enfants présentant un trouble des apprentissages mathématiques, une hypersensibilité à l'interférence devrait particulièrement être retrouvée lors de la résolution des faits arithmétiques. De plus, durant la passation de cette épreuve, au-delà d'un effet de taille, nous devrions également observer de meilleures performances pour la résolution des multiplications comportant deux opérandes identiques (Campbell & Gunter, 2002), ainsi que pour les multiplications dont l'un des opérandes est 5 (De Brauwer et al., 2006).

Concernant le poids d'interférence, les paires commutatives (ex. « 2x9 » et « 9x2 ») sont considérées comme étant un unique problème multiplicatif selon De Visscher et Noël (2014b). Ces derniers suggèrent que ces paires sont en effet apprises simultanément via le principe de commutativité, possédant alors le même degré d'interférence. Ainsi, en considérant à l'instar des auteurs que le premier terme de l'opération indique la table de multiplication à laquelle appartient le problème multiplicatif, l'enfant apprendra par exemple l'opération « 2x9 » dans la table de 2. Toutefois, il apprendra conjointement via le principe de commutativité la multiplication « 9x2 » qui n'aura pas besoin d'être mémorisée dans la table de 9, ayant déjà été apprise dans la celle de 2. La position des opérandes au sein de la multiplication n'a donc aucune influence sur la difficulté de l'opération (De Visscher & Noël, 2014b). Selon cette théorie, nous aurions pu proposer, en première partie d'épreuve, des multiplications appartenant à des tables qui n'ont pas encore été enseignées explicitement durant l'année de CE1, afin d'évaluer la maîtrise de la commutativité (ex. proposer « 9x2 » alors que la table de 9 n'a pas encore été vue mais dont la paire commutative a déjà été mémorisée). Les élèves sont en effet conduits à mettre en œuvre ce principe de commutativité à partir du troisième semestre de CE1, c'est-à-dire conjointement à l'apprentissage mémoriel des tables de multiplication, et devraient donc parvenir à résoudre ces multiplications. Toutefois, nous avons préféré ne pas réaliser ces inversions et respecter l'ordre d'apprentissage des tables de multiplication établi par les programmes scolaires nationaux (Ministère de l'Education Nationale, 2022), en considérant comme De Visscher et Noël (2014b) que le premier terme de l'opération indique la table de multiplication à laquelle cette dernière appartient.

En outre, la résolution de certaines multiplications nécessite l'application de règles (Sokol et al., 1991). Il s'agit des produits avec un facteur égal à 0 (Nx0 = N), un facteur égal à 1 (Nx1 = 1) et un facteur égal à 10 (Nx10 consiste à ajouter à 0 à la fin de l'écriture du nombre N). Ainsi, ces produits ne sont pas résolus par une récupération directe du résultat stocké dans un réseau associatif interférent et ne font donc pas l'objet d'un calcul de poids d'interférence comme les autres multiplications appartenant aux tables de 2 à 9. Ces items ont donc été positionnés au sein de l'épreuve différemment des autres opérations multiplicatives. Tout d'abord, concernant les items de type Nx10, nous savons que les élèves doivent savoir multiplier par 10 un nombre inférieur à 100 en fin de deuxième année primaire (Ministère de l'Education Nationale, 2022). Les opérations de type Nx10 seront donc réparties aléatoirement parmi les autres tables de multiplication dont l'apprentissage mémoriel est effectué en CE1, c'est-à-dire les tables de 2, de 3, de 4 et de 5. En outre, s'agissant des opérations avec un opérande 0 et un opérande 1, nous ne disposons à notre connaissance d'aucune donnée concernant l'acquisition de ces règles dans les programmes scolaires nationaux. Toutefois, les tables de multiplication de 2 à 9 sont communément composées des items de type Nx0 et Nx1, les élèves sont donc confrontés à ces opérations dès le début de l'enseignement des tables. Ainsi, ces multiplications seront donc réparties de la même manière que les multiplications de type Nx10. À l'instar du subtest des faits additifs, il aurait également été possible de positionner ces items aléatoirement au sein de l'épreuve afin d'observer leur résolution dans des zones d'habileté de différents niveaux. Toutefois, l'ordre ascendant de difficulté n'aurait pas été respecté à mesure de l'épreuve (ex. insertion de la multiplication « 4x1 » entre « 8x7 » et « 9x9 »), cette proposition n'a donc pas été retenue.

2. Administration et cotation

La conception de notre épreuve s'inspire du « testing adaptatif » (Laveault & Grégoire, 1997) dont le principe consiste à n'administrer aux sujets que les items correspondant à leur niveau d'aptitude. Par exemple, pour un enfant scolarisé en classe de CM1, il s'agira de lui présenter en premier lieu les items réussis en moyenne par les enfants de ce même niveau scolaire. Ensuite, si l'enfant les réussit, des items jugés plus difficiles pourront lui être proposés. A l'inverse, s'il les échoue, des items plus faciles lui seront présentés. Ainsi, le thérapeute n'administre au sujet « que les items les plus aptes à permettre de discriminer entre les sujets d'aptitude semblable » (Dunn et al., 1993, p.11). Ce dernier n'est donc pas contraint de répondre à un trop grand nombre d'items jugés trop faciles ou trop difficiles pour lui, ce qui permet de réduire le temps d'administration de l'épreuve et d'éviter la présence d'une certaine démotivation et d'une fatigabilité pouvant alors venir fausser les résultats. Cette évaluation dynamique permet donc de tenir compte des contraintes temporelles de l'évaluation tout en fournissant au thérapeute une mesure précise des compétences du sujet (Laveault & Grégoire, 1997).

Ces épreuves qui permettent de s'adapter aux difficultés et aux compétences du sujet seront applicables à une large tranche d'âge. En effet, l'orthophoniste pourra également réaliser cette évaluation dynamique avec des adultes présentant un trouble acquis de la cognition mathématique et pouvant rencontrer des difficultés dans la récupération des faits arithmétiques. Le sujet adulte commencera alors l'épreuve au dernier palier afin d'évaluer dans un premier temps la résolution des faits numériques les plus difficiles. Si le sujet les réussit, l'épreuve prendra fin, les items situés dans des zones d'habileté inférieure seront alors comptabilisés comme réponses correctes. A l'inverse, s'il les échoue, un retour en arrière sera effectué afin d'évaluer la résolution des faits arithmétiques d'un niveau antérieur. Si le sujet rencontre des difficultés pour ces derniers, un deuxième retour en arrière sera réalisé, et ainsi de suite. Une contrainte sur le temps de réponse sera également proposée pour les adultes afin de départager l'utilisation de stratégies procédurales d'une récupération en mémoire à long terme du résultat.

De plus, nos épreuves seront informatisées afin de permettre une standardisation optimale ainsi qu'une mesure de la vitesse, qu'il s'agisse du temps global nécessaire à la réalisation de l'épreuve ou du temps de réponse pour chaque item. Selon Noël et Karagiannakis (2020), la mesure de temps réalisée pour chaque calcul est la mesure la plus pure concernant l'évaluation des compétences arithmétiques. De plus, nous avons également décidé de proposer une contrainte de temps pour chaque calcul afin que l'orthophoniste puisse départager chez un sujet l'utilisation de stratégies procédurales d'une récupération du résultat en mémoire à long terme. Toutefois, il est important de préciser que certains enfants présentent des difficultés à l'évocation, ces derniers pourraient donc être pénalisés par cette contrainte temporelle. En effet, si l'enfant ne répond pas dans le temps imparti, le thérapeute pourrait conclure que l'enfant compte mentalement alors que la difficulté concerne le langage oral, et plus particulièrement l'évocation.

Ces épreuves permettront d'effectuer une mesure précise des compétences et des difficultés du sujet afin d'adapter au mieux la future prise en charge. Nous avons expliqué précédemment que la constitution du réseau des faits additifs et celle du réseau des faits multiplicatifs résultent de processus différents. En effet, la mise en oeuvre des faits additifs découle d'une pratique répétée des procédures de comptage permettant d'encoder en mémoire à long terme les associations opérandes - résultat à force de les rencontrer. Toutefois, une hypothèse actuelle suggère que les additions simples seraient résolues par une automatisation des processus de comptage et non par une utilisation de stratégies déclaratives. Quant au réseau des faits multiplicatifs, celui-ci découle d'un apprentissage mémoriel des tables de multiplication durant le cursus scolaire. Ainsi, la mise en œuvre de ces faits arithmétiques étant différente, les rééducations proposées seront à différencier selon le type d'opérations à entraîner. Pour les enfants utilisant des stratégies longues et coûteuses lors de la résolution d'additions simples, il sera possible de leur proposer un entraînement procédural avec des instructions claires portant sur les stratégies efficaces à mettre en oeuvre pour résoudre une addition. Cet apprentissage pourra être couplé à des exercices de drill, c'est-à-dire des exercices répétés de résolution d'additions, permettant ainsi d'accroître les performances dans ce domaine (Tournaki, 2003). Les exercices de drill seuls sans aucune démonstration préalable n'ont aucun effet sur la rééducation. La pratique répétée du comptage avec présentation d'un modèle permet également une meilleure mémorisation des faits arithmétiques en comparaison à un apprentissage mémoriel seul (Fuchs et al., 2010). Cette pratique répétée du comptage pourrait donc favoriser de meilleures possibilités de récupération des faits additifs en mémoire à long terme (Tournaki, 2003). Toutefois, des données plus récentes suggèrent qu'elle permettrait une automatisation des processus de comptage (Thevenot, 2018).

Quant aux faits multiplicatifs, une analyse qualitative des erreurs réalisées pendant la passation du subtest permettra de rendre compte de l'origine des difficultés. Des difficultés au niveau du stockage des faits arithmétiques seront suspectées lorsqu'une très faible quantité de calculs sera résolue par une récupération en mémoire à long terme du résultat. A l'inverse, nous pouvons nous attendre à des difficultés de récupération si l'enfant résout certains calculs par récupération du résultat mais qu'il réalise des erreurs appartenant à la table de l'un des facteurs. Ainsi, pour les sujets présentant des difficultés de stockage, la prise en charge se voudra fonctionnelle, il s'agira par exemple d'entraîner les tables les plus faciles (2, 5 et 10) afin de dériver les faits plus difficiles à partir de ces dernières. Il s'agira également d'expliquer l'importance de la maîtrise du principe de commutativité permettant de réduire le nombre de multiplications à apprendre. Des aides à la mémorisation pourront également être mises en place comme le recours aux doigts qui peut faciliter la récitation des tables ou l'ajout d'indices perceptifs visuels (cf. section les moyens de rééducation). De plus, pour les sujets présentant des difficultés dans la résolution des grands produits, il sera également possible de travailler les tables les plus faciles afin de dériver la réponse d'autres multiplications. Concernant les difficultés de récupération des faits arithmétiques en raison d'une hypersensibilité à l'interférence, un travail pour apprendre à résister à cette interférence pourra être effectué. Il s'agira alors de fournir un tableau avec des produits appartenant à diverses tables et de demander aux patients d'entourer tous les produits appartenant à une table.

Conclusion

Environ six pourcents des enfants présentent un trouble des apprentissages mathématiques (Noël & Karagiannakis, 2020), se manifestant par des difficultés sévères dans la maîtrise du sens du nombre, du raisonnement mathématique, du calcul ou encore des faits arithmétiques. Il paraît donc primordial que l'orthophoniste dispose d'outils sensibles, normés et standardisés pour diagnostiquer ces difficultés et proposer une prise en charge la plus adaptée aux compétences et aux difficultés du patient.

Ce présent travail s'inscrit dans une démarche de création d'une nouvelle batterie de la cognition mathématique, proposant une large variété d'épreuves et reposant sur des modèles théoriques récents. Cette étude s'est particulièrement intéressée à la création d'épreuves évaluant la mémorisation des faits arithmétiques, qui seront intégrées à cette future batterie. Plus précisément, notre objectif était de proposer deux épreuves évaluant les faits additifs et multiplicatifs comportant une méthodologie de passation innovante. En effet, dans ces subtests, le sujet ne répondra dans un premier temps qu'aux items correspondant à son niveau scolaire, c'est-à-dire aux items qui sont réussis en moyenne par ses pairs. S'il les réussit, des faits arithmétiques plus difficiles lui seront proposés. A l'inverse, s'il les échoue, des items plus faciles lui seront présentés. L'orthophoniste pourra donc réaliser une évaluation dynamique des compétences du patient, permettant une mesure rapide et précise des compétences et des difficultés de l'enfant.

Une phase de normalisation sera nécessaire afin que les orthophonistes aient à leur disposition des données de comparaison à la norme, permettant alors d'objectiver la présence ou non de difficultés dans ce domaine et de procéder à un éventuel diagnostic de déficit cognitif numérique, à la lumière de l'ensemble des habiletés mathématiques évaluées chez ce sujet.

Bibliographie

Ashcraft, C., & Christy, K. (1995). The Frequency of Arithmetic Facts in Elementary Texts: Addition and Multiplication in Grades 1-6. *Journal for Research in Mathematics Education, 26*(5), 396-421.

American Psychiatric Association. (2013). *DSM-5: Diagnostic and statistical manual of mental disorders (5th ed)*. American Psychiatric Publishing.

Bagnoud, J., Dewi, J., Castel, C., Mathieu, R., & Thevenot, C. (2021). Developmental changes in size effects for simple tie and non-tie addition problems in 6- to 12-year-old children and adults. *Journal of Experimental Child Psychology, 201*, 104987.

Bardet, M. (2021). *Création d'une batterie d'évaluation de la cognition mathématique : proposition d'épreuves de calcul* [Mémoire de Master, Université de Lille]. Pépite. https://pepite-depot.univ-lille.fr/RESTREINT/Mem_Ortho/2021/LILU_SMOR_2021_078.pdf

Barrouillet, P., & Lépine, R. (2005). Working memory and children's use of retrieval to solve addition problems. *Journal Experimental Child Psycholdy, 91*, 183-204.

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

Blankenberger, S. (2001). The arithmetic tie effect is mainly encoding-based. *Cognition, 82*, B15-B24.

Campbell, I. D., & Gunter, R. (2002). Calculation, culture and the repeated operand effect. *Cognition, 86*, 71-96.

Campbell, I. D., & Timm, J. (2000). Adult's strategy choices for simple addition: Effects of retrieval interference. *Psychonomic Bulletin and Review, 7*(4), 692-699.

De Brauwer, J., Verguts, T., & Fias, W. (2005). The representation of multiplication facts: Developmental changes in the problem size, five and tie effects. *Journal of Experimental Child Psychology, 94*, 43-56.

Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, *44*(1), 1-42.

Dehaene, S. (2018). *La Bosse des Maths*. Editions Odile Jacob.

De Visscher, A., & Noël, M. P. (2014b). The detrimental effect of interference in multiplication facts storing : Typical development and individual differences. *Journal of Experimental Psychology: General, 143*(6), 2380-2400.

Domahs, F., Lochy, A., Eibl, G., & Delazer, M. (2004). Adding colour to multiplication: Rehabilitation of arithmetic fact retrieval in a case of traumatic brain injury. *Neuropsychological Rehabilitation, 14*(3), 303-328.

Domahs, F., Zamarian, L., & Delazer, M. (2008). Sound arithmetic: Auditory cues in the rehabilitation of impaired fact retrieval. *Neuropsychological Rehabilitation, 18*(2), 160-181.

Dunn, L. M., Thériault-Whalen, C., & Dunn, L. M. (1993). *Echelle de vocabulaire en images Peabody. Adaptation française du Peabody Picture Vocabulary test-revised*. Psycan.

Fayol, M. (2018). *L'acquisition du nombre*. Presses Universitaires de France.

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

Fuchs, L. S., Powell, S. R., Seethaler, P.M., Fuchs, D., Hamlett, C.L., Cirino, P. T., & Fletcher, J. M. (2010). A Framework for remediating number combination deficits. *Exceptional Children, 76*(2), 135-165.

Geary, D. C. (2004). Mathematics and learning disabilities. *Journal of Learning Disabilities, 37*(1), 4-15.

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

Guillaume, L. (soumis). *Lien entre la cognition mathématique, le langage écrit et la zone d'éducation - Action de repérage dans différentes zones éducatives des Hauts-de-France*.

Laveault, D., & Grégoire, J. (1997). *Introduction aux théories des tests en sciences humaines*. De Boeck Université.

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

LeFevre, J. A., Shanahan, T., & DeStefano, D. (2004). The tie effect in simple arithmetic: An access-based account. *Memory & Cognition, 32*, 1019-1031.

Lemaire, P., & Arnaud, L. (2004). Le calcul mental et la question des stratégies. Dans M. Pesenti & X. Seron (Eds.), *La cognition numérique* (pp.161-187).

Lemaire, P., & Siegler, R. (1995). Four Aspects of Strategic Change: Contributions to Children's Learning of Multiplication. *Journal of Experimental Psychology General, 124*(1), 83-97.

Lépine, R., & Camos, V. (2004). Le développement de la quantification et ses contraintes. Dans E. Gentaz & P. Dessus (dir.), *Comprendre les apprentissages : sciences cognitives et éducation*. Dunod.

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

Mabbott, B., & Bisanz, J. (2003). Developmental Change and Individual Differences in Children's Multiplication. *Child Development, 74*(4), 1091-1107.

Ministère de l'Education Nationale. (2022). *Attendus de fin d'année et repères annuels de progression du CP à la 3ème*. Eduscol. Consulté le 05/04/2022 sur https://eduscol.education.fr/137/attendus-de-fin-d-annee-et-reperes-annuels-de-progression-du-cp-la-3e

Noël, M. P., & Karagiannakis, G. (2020). *Dyscalculie et difficultés d'apprentissage en mathématiques : Guide pratique de prise en charge*. De Boeck Supérieur.

Noël, M. P., Rousselle, L., & De Visscher, A. (2013). La dyscalculie développementale : à la croisée de facteurs numériques spécifiques et de facteurs cognitifs généraux. *Développements, 2*(15), 24-31.

Oberauer, K., & Kliegl, R. (2006). A formal model of capacity limits in working memory. *Journal of Memory and Language, 55*, 601-626.

Robinson, K. M., Arbuthnott, K. D., Rose, D., McCarron, M. C., Globa, C. A., & Phonexay, S. D. (2006). Stability and change in children's division strategies. *Journal of Experimental Child Psychology*, *93*(3), 224-238.

Siegler, R. S. (1987). The Perils of Averaging Data Over Strategies: An Example From Children's Addition. *Journal of Experimental Psychology General, 116*(3), 250-264.

Siegler, R. S. (1988). Strategy Choice Procedures and the Development of Multiplication Skill. *Journal of Experimental Psychology General, 117*(3), 258-275.

Siegler, R. S., & Ramani, G. B. (2009). Playing linear number board games -but not circular ones- improves low-income preschoolers' numerical understanding. *Journal of Educational Psychology, 101*, 545-560.

Sokol, S. M., McCloskey, M., Cohen, N. J., & Aliminosa, D. (1991). Cognitive representations and processes in arithmetic: Interferences from the performance of brain-damaged subjects. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition, 17*, 355-376.

Thevenot, C. (2018). La résolution d'additions simples par procédures de comptage automatisées. *ANAE, 156*, 1-7.

Thevenot, C., Barrouillet, P., Castel, C., & Uittenhove, K. (2016). Ten-year-old children strategies in mental addition: A counting model account. *Cognition*, *146*, 48-57.

Tournaki, N. (2003). The differential effects of teaching addition through strategy instruction versus drill and practice to students with and without learning disabilities. *Journal of Learning Disability, 36*, 449-458.

Vanbinst, K., Ghesquière, P., & De Smedt, B. (2015). Does numerical processing uniquely predict first graders' future development of single-digit arithmetic? *Learning and Individual Differences, 37*, 153-160.

Wilson, A. J. & Dehaene, S. (2007). Number Sens and Development Dyscalculia. Dans D. Coch, K. Fishcer, & G. Dawson (Eds.), *Human behavior and the developing brain* (pp. 212-237).