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

Amélie SAVARIT

soutenu publiquement en juin 2022

Création et validation du bilan de cognition mathématique (BCM)

Focus sur le subitizing : une revue de la littérature

MEMOIRE dirigé par

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

Sophie FRAGNON, orthophoniste, Wingles, et enseignante, Institut d'orthophonie Henri Warembourg, Lille

Lille – **2022**

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes ayant participé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, notamment Mesdames Mejias et Fragnon pour leurs remarques et leurs conseils. Un merci particulier aux membres de ma famille pour leur soutien sans faille et leur amour sans limite, tout au long de mon parcours.

Résumé :

Dans le champ de la cognition mathématique, un mécanisme spécifique permet le traitement exact et rapide des petites quantités allant jusque trois ou quatre items, il s'agit du subitizing. Certaines recherches mettent en lumière un déficit de subitizing chez les personnes présentant des troubles des apprentissages mathématiques (TAM), tandis que d'autres invalident cette hypothèse. Actuellement, il n'existe pas de consensus au sein de la communauté scientifique quant à la potentielle implication du subitizing dans les TAM. Ce travail a pour but d'analyser les études traitant de ce lien et d'en extraire les caractéristiques méthodologiques pouvant expliquer les divergences de points de vue retrouvées dans la littérature. Les dix-sept études analysées présentent des caractéristiques différentes telles que : leur design, les critères d'inclusion des participants (e.g. âge, genre, mesure des performances mathématiques, cognitives, langagières), la nature et la durée de présentation des stimuli, le nombre d'essais proposés, les mesures effectuées. La présente recherche met en exergue la nécessité d'uniformiser les méthodes de recherche dans le champ de la cognition mathématique, pour permettre une comparaison fiable des études et de leurs conclusions. Ce travail propose également des pistes concernant la création d'une tâche de subitizing qui soit la plus pure possible, appuyée sur des bases théoriques et des critères méthodologiques solides.

Mots-clés :

Dyscalculie, Troubles des apprentissages mathématiques, Subitizing

Abstract :

In the field of mathematical cognition, a specific mechanism allows for the accurate and rapid processing of small quantities of up to three or four items, called subitizing. Some researches highlight a subitizing deficit in people with mathematical learning disorders (MLD), while others invalidate this hypothesis. Currently, there is no consensus in the scientific community as to the potential involvement of subitizing in MLD. The aim of this work is to analyze the studies dealing with this link and to extract the methodological characteristics that may explain the divergent points of view found in the literature. The seventeen analyzed studies present different characteristics such as: their design, the inclusion criteria of the participants (e.g. age, gender, measure of mathematical, cognitive and language performance), the nature and duration of the presentation of the stimuli, the number of trials proposed, the measures carried out. The present research highlights the need for standardization of research methods in the field of mathematical cognition, to allow for reliable comparison of studies and their conclusions. This work also suggests ways to create the purest possible subitizing task, based on strong theoretical bases and methodological guidelines.

Keywords :

Dyscalculia, Mathematical learning disorders, Subitizing

Table des matières

Introduction

Programmer son réveil, estimer une distance, suivre une recette de cuisine, calculer une remise... Les habiletés mathématiques interviennent dans de nombreuses tâches quotidiennes. Le vocabulaire et les notions mathématiques sont mobilisés sans cesse dans nos conversations et nos actions, et s'avèrent pleinement intégrés dans nos mécanismes de pensée. En conséquence, des difficultés mathématiques peuvent entraîner une importante perte d'autonomie quotidienne. La dyscalculie ou Trouble spécifique des Apprentissages Mathématiques tel que défini dans le DSM-5 (APA, 2013) produit donc des effets négatifs, nuisant fortement au bien-être professionnel, social ou encore émotionnel des personnes touchées (Kaufmann et al., 2020). Il apparaît primordial pour les personnes concernées par ces difficultés de bénéficier d'un diagnostic et d'un accompagnement adapté et efficace, lesquels peuvent être assurés par un orthophoniste.

Pour évaluer et analyser les compétences mathématiques, les orthophonistes disposent de quelques tests et de batteries qui se révèlent parfois peu appuyés sur les modèles théoriques faisant consensus à l'heure actuelle. Lafay et Cattini (2018), ont analysé les qualités psychométriques de 22 outils évaluant les habiletés mathématiques ou comportant un ou quelques subtests d'évaluation mathématique. Elles révèlent que ces outils présentent, pour la grande majorité, une qualité psychométrique insuffisante : « Parmi les 22 recensés, seulement trois outils évaluant spécifiquement les habiletés mathématiques obtiennent un score de qualité supérieur à 50% » (Lafay & Cattini, 2018, p.162). Selon elles, les outils à disposition du clinicien doivent observer des critères précis de standardisation, de validité, de fidélité et de normalisation (Lafay & Cattini, 2018). Par conséquent, il nous semble primordial de proposer aux orthophonistes un outil supplémentaire : une batterie exhaustive d'évaluation de la cognition mathématique, informatisée, standardisée et validée au regard des données de littérature les plus pertinentes.

Ce travail sera consacré spécifiquement au subitizing, un mécanisme de traitement immédiat et exact des petites quantités. Actuellement, il existe un débat au sein de la communauté scientifique quant au rôle du subitizing dans le cadre des difficultés mathématiques. Certains chercheurs observent un lien entre déficit de subitizing et dyscalculie tandis que d'autres réfutent cette théorie. Ce travail aura donc pour objectif d'identifier les facteurs pouvant expliquer les divergences de conclusions retrouvées entre les chercheurs, en analysant des recherches scientifiques traitant du lien entre déficit de subitizing et difficultés mathématiques. Cette analyse pourra servir de base à la création d'une épreuve testant le subitizing dans le Bilan de Cognition Mathématique (BCM).

D'abord, le subitizing sera défini puis seront présentés les grands modèles théoriques de la cognition mathématique. Les substrats neuroanatomiques impliqués dans le subitizing seront décrits. Enfin, la question du lien entre subitizing et dyscalculie sera investiguée. Dans la partie méthodologie, il s'agira de comprendre ce qui explique les divergences d'opinions entre les auteurs traitant du lien subitizing-dyscalculie, en comparant leurs travaux pour en extraire les caractéristiques méthodologiques. L'analyse de ces caractéristiques permettra de dégager les critères de création d'une épreuve de subitizing la plus pure possible.

Contexte théorique, buts et hypothèses

Un mécanisme spécifique permettant le traitement exact des petites quantités sera détaillé dans une première partie : il s'agit du subitizing. Des clefs de compréhension concernant le domaine de la cognition mathématique et plus précisément du subitizing seront apportées au lecteur à travers des modèles théoriques de référence. Le lecteur sera amené tout au long de ce travail à considérer le rôle prédictif du subitizing sur les habiletés mathématiques et à mesurer l'importance de disposer d'outils sensibles, valides et normés pour le tester.

.1. Le subitizing : qu'est-ce que c'est ?

Cette partie consistera à expliciter le processus de subitizing, ses mécanismes et ses implications cérébrales. Ainsi, le lecteur pourra constater le rôle prédictif d'une évaluation fine et exacte du subitizing sur les compétences mathématiques.

.1.1. Définition générale

Le subitizing correspond à la capacité à identifier très rapidement une quantité limitée d'items et a été décrit pour la première fois par Kaufman et ses collègues en 1949. Selon ces auteurs, le jugement de numérosité (i.e. l'identification d'une certaine quantité) peut être comparatif (e.g. comparer deux ensembles de quantités et déterminer quel est le plus grand) ou bien absolu, auquel cas il peut prendre une forme particulière consistant en l'identification directe d'une numérosité. Un nombre est alors attribué pour indiquer « combien de choses il y a dans une collection d'objets donnée » (Kaufman et al., 1949, p.498). Starkey et Cooper (1995) ont mené trois études auprès d'enfants âgés de deux à cinq ans. Ces jeunes enfants étaient capables d'énumérer avec précision et presque instantanément (200ms) de petits ensembles d'objets, quelle que soit leur disposition dans l'espace. La rapidité des enfants excluait un mécanisme de comptage verbal. Pour Kaufman et ses collègues (1949), la quantité identifiée ne dépasse pas six éléments, pour Mandler et Shebo (1982) elle ne dépasse pas trois ou quatre éléments. Pour Starkey et Cooper (1995), le subitizing permet d'appréhender jusqu'à trois éléments chez les nourrissons et jusqu'à cinq éléments chez l'adulte. La compétence de subitizing se consoliderait avec les apprentissages et la maturation cérébrale (Von Aster, 2000). Pour Fayol, Perros et Seron (2004), le subitizing se limite aux quantités une à trois. Cette hypothèse est également partagée par Schleifer et Landerl (2011), qui ont mené une étude transversale auprès d'une centaine d'enfants. Feigenson et collègues (2004) évoquent un mécanisme attentionnel préverbal, l'OTS (Object Tracking System) en jeu dans la représentation de petites quantités d'objets (1-4) chez les nourrissons et les animaux. L'OTS serait un mécanisme sous-jacent du subitizing, il mobiliserait la mémoire de travail et serait sujet à maturation.

Pour Clements (1999), il existe deux types de subitizing. Le subitizing « perceptuel » permettrait de reconnaître une quantité sans faire appel à d'autres compétences mathématiques. Il impliquerait des mécanismes primitifs retrouvés chez les animaux, permettant de regrouper des items ou de les individualiser dans le but de les dénombrer. Le deuxième type, le subitizing « conceptuel », correspondrait à un niveau de traitement supérieur permettant de traiter un modèle numérique à la fois comme un tout et comme un agrégat de parties. Pour le développer, les enfants s'appuieraient sur le comptage et la modélisation de configurations. Le subitizing « conceptuel » renforcerait le sens du nombre et les capacités arithmétiques.

Par ailleurs, le subitizing comporte deux étapes de traitement dissemblables. Pour identifier un petit nombre d'items, le motif est d'abord séparé du fond dans son ensemble. Ensuite, dans une seconde phase, le nombre d'éléments est précisément identifié grâce à une discrimination élément par élément (Wender & Rothkegel, 2000). Mandler et Shebo (1982) postulent que le subitizing se base sur la reconnaissance visuelle de configurations canoniques. D'après eux, la manière dont sont disposés les objets forme des configurations spatiales que l'on peut reconnaître, quelles que soient la nature et la disposition exactes de ces objets. De plus, les motifs divisibles en sous-modèles réguliers sont traités plus rapidement que les motifs complètement irréguliers. Cette observation vient conforter l'hypothèse de la reconnaissance canonique des formes (Wender & Rothkegel, 2000).

.1.2. Subitizing ou estimation ?

D'après Dehaene (1992), certains auteurs suggèrent que le subitizing appartient à un processus plus général d'estimation qui serait précis, car appliqué à de petites numérosités. L'estimation est un processus de traduction entre des représentations quantitatives alternatives, dont l'une au moins est inexacte (Siegler & Booth, 2005). Ce processus deviendrait plus précis à mesure que l'individu se développe.

Toutefois, d'autres auteurs postulent que le subitizing fonctionne sur la base d'un système d'identification spécifique aux petits nombres (Revkin et al., 2008). Ces auteurs ont conduit une étude afin de déterminer si l'estimation constituait le mécanisme sous-jacent du subitizing. Leurs résultats concordent avec les études menées chez les jeunes enfants et les animaux. Ils suggèrent l'existence d'un système de traitement dédié aux petites numérosités (1-4). L'estimation ne constituerait donc pas le mécanisme sous-tendant le subitizing.

.1.3. Subitizing ou comptage ?

Les mécanismes de comptage et de subitizing peuvent être confondus de par leur similarité et leur objectif : appréhender une quantité. De plus, le comptage et le subitizing présentent le même input (i.e. entrée visuelle) et le même output (i.e. sortie verbale orale). Selon Dehaene (1992), le subitizing apparaît bien distinct du comptage, mais cette assertion donne lieu à de nombreuses controverses. Par exemple, Gallistel et Gelman (1992) avancent que le subitizing correspond à un comptage rapide, basé sur des représentations préverbales. Pour Trick (1992), le subitizing et le comptage sont deux types d'énumération. Le subitizing permet l'identification sans effort de maximum quatre items, rapidement (40-100 ms/item) et précisément. Le comptage permet d'identifier un plus grand nombre d'items, mais est plus lent (250-350 ms/item), peut engendrer des erreurs et demande un effort explicite (Trick, 1992).

Starkey et Cooper (1995) ont mis en évidence des compétences de subitizing chez des enfants de deux à cinq ans. Leurs temps de réponse étaient trop courts pour permettre un comptage verbal, ce qui soutient l'hypothèse de la distinction comptage/subitizing et signifie que ce dernier se développe avant le comptage. Schleifer et Landerl (2011) ont évalué les performances d'enfants d'âges différents dont le développement des compétences arithmétiques était typique ou atypique. Dans une tâche de subitizing, le temps de réponse des enfants dyscalculiques était significativement plus long que celui des enfants au développement typique. Ce phénomène souligne un dysfonctionnement du processus de subitizing chez les enfants dyscalculiques. Or, aucune différence n'a été relevée entre les deux groupes concernant les temps de réponse pour la tâche de comptage. Ce constat avait également été réalisé par Moeller et collègues (2009). Le subitizing et le dénombrement désignent donc deux mécanismes mathématiques distincts (Schleifer & Landerl, 2011). D'ailleurs, d'autres chercheurs ont démontré une activation cérébrale temporelle et spatiale différente chez des adultes pour une tâche de subitizing ou pour une tâche de comptage explicite (Vuokko et al., 2013). A l'aide d'un magnétoencéphalographe, ces chercheurs ont mis en lumière une activation des zones temporo-pariétales postérieures bilatérales dans le cerveau lors du subitizing, tandis que le comptage mobilisait les zones pariétales bilatérales puis les cortex frontaux.

Par ailleurs, le comptage nécessite des mouvements attentionnels vers des emplacements précis : il est nécessaire d'orienter l'attention visuelle sur chacun des objets à compter (Dehaene & Changeux, 1993). De son côté, la détection de petites numérosités appartiendrait plutôt à une forme de « vision pré-attentive » (Trick, 1992). Le subitizing correspond au résultat de deux traitements d'analyse visuelle s'effectuant en parallèle : l'analyse préattentive et l'analyse attentive. Il fait donc appel à un mécanisme d'individuation, limité à un petit nombre d'items et permettant d'isoler un nombre restreint de caractéristiques. L'individuation des éléments se produit après les processus préattentifs de repérage et de regroupement des caractéristiques, mais avant le déclenchement de l'attention spatiale (Trick, 1992). Le subitizing reposerait donc sur un mécanisme préattentif et le comptage sur un mécanisme d'attention spatiale. Toutefois, Sophian et Crosby (2008) ont réalisé des mesures de suivi oculaire démontrant que le subitizing et le comptage mobilisent tous deux l'attention visuelle, ce qui va à l'encontre de l'hypothèse selon laquelle le subitizing serait un mécanisme préattentionnel (Trick & Pylyshyn, 1994).

.1.4. Un subitizing ou des subitizings ?

Tel que décrit initialement par Kaufman (1949), le subitizing permet le traitement rapide et exact des petites numérosités. Ce processus est en jeu lors d'un stimulus présenté visuellement. Il apparaît légitime de se demander si le subitizing intervient également en modalité tactile ou encore auditive et, le cas échéant, de quelle manière. Certains auteurs expliquent que la définition initiale du subitizing présente un biais majeur, celui d'intégrer une modalité d'entrée visuelle uniquement (Katzin et al., 2019). Le subitizing auditif ou tactile ne peut présenter les mêmes caractéristiques que le subitizing décrit initialement en modalité visuelle. D'ailleurs, Anobile et ses collègues (2019) soulignent le fait que les adultes comme les enfants peuvent subitizer des stimuli visuels (simultanés) et des stimuli auditifs (séquentiels). Le rang de subitizing s'avère plus élevé pour le subitizing visuel que temporel. Dans leur étude, Katzin et collègues (2019) ont analysé les processus de subitizing visuel, auditif et tactile traités par différents chercheurs. Ils ont synthétisé les caractéristiques des différentes modalités de subitizing :

- Modalité visuelle : le rang de subitizing s'étend d'un à quatre, pouvant être augmenté par la présentation de patterns familiers.
- Modalité tactile : le rang de subitizing dépend de la nature de l'input (doigts ou autres parties du corps), de l'utilisation (une ou deux mains, toucher actif ou passif) et du type de stimulus (vibration ou pression).
- Modalité auditive : le rang de subitizing peut être de deux ou trois, jusqu'à six pour les musiciens. Les stimuli ont été présentés de manière séquencée.

Pour ces auteurs, il convient de modifier la définition du subitizing afin de rendre compte du caractère amodal du processus. Il s'agirait d'un mécanisme sous-jacent du comptage, qui serait sollicité en présence de facteurs facilitateurs tels que la disponibilité de ressources attentionnelles ou la présentation des items sous forme de motifs familiers, permettant ainsi une énumération plus rapide et exacte (Katzin et al., 2019). Par ailleurs, l'output du subitizing semble être verbal par définition, mais il apparaît légitime de questionner cet état de fait. Par exemple, dans une étude de 2017, Lafay et ses collègues ont créé une tâche originale de production analogique dans laquelle les enfants devaient entourer sur une feuille la même quantité de points que celle perçue sur l'écran. Ainsi, l'output devient moteur, évitant de faire appel au système langagier des enfants.

.2. Appui sur les modèles théoriques

Dans cette deuxième partie, le lecteur sera amené à prendre connaissance des modèles théoriques régissant la cognition mathématique et sous-tendant le subitizing, qui nous intéresse particulièrement. Pour ce travail, nous nous appuierons essentiellement sur le modèle du Triple Code de Dehaene (1992) et sur le modèle développemental de Von Aster et Shalev (2007).

.2.1. Le Triple Code de Dehaene (1992)

Le modèle du Triple Code repose sur plusieurs postulats (Dehaene, 2001). Premièrement, l'information numérique peut être manipulée via trois pôles différents : la représentation analogique des quantités (e.g. « •••• ») également appelée code analogique ; la représentation verbale (e.g. « quatre », « /katr/ ») également appelée code verbal ; la représentation visuelle arabe (e.g. « 4 ») également appelée code arabe. Deuxièmement, l'information numérique peut transiter d'un pôle à l'autre grâce à un processus appelé transcodage. Troisièmement, chaque procédure de calcul implique des entrées et des sorties issues des trois pôles du modèle du Triple Code.

Pour ce travail, le code analogique nous intéresse particulièrement puisqu'il comprend le subitizing. Les quantités numériques sont symbolisées dans ce système par des points placés sur une ligne mentale orientée de gauche à droite, laquelle recevrait une distribution d'activation (Dehaene, 2001) intrinsèquement variable et obéirait à la loi de Weber-Fechner (Dehaene, 1989 ; Dehaene et al., 1990 ; Restle, 1979 ; cités par Dehaene, 1992). La ligne numérique implique une connaissance sémantique des quantités numériques : pour être établie, les notions de proximité et de « plus petit / plus grand » doivent être maîtrisées.

Le pôle analogique engloberait deux systèmes centraux de traitement des quantités qui se développent automatiquement chez les nourrissons et d'autres espèces animales et qui persistent tout au long de la vie (Feigenson et al., 2004). Selon ces auteurs, il existe un système central de représentations approximatives de la magnitude numérique, le Système Numérique Approximatif (SNA) et un système central de représentations précises d'individus distincts, le Système Numérique Précis (SNP). Dans le modèle du Triple Code (Dehaene, 1992), le SNA se situerait au sein du code analogique et inclurait les capacités de comparaison et d'estimation des quantités numériques. Le SNP quant à lui, permettrait l'identification quasi instantanée d'un nombre limité de numérosités. De plus, son développement entraînerait une augmentation de l'acuité du SNA, ce qui suggère un lien réciproque entre les deux systèmes (Libertus, 2015). Le SNP jouerait le rôle de médiateur entre le SNA et les nombres symboliques (Lafay, 2017).

.2.2. Le modèle développemental de Von Aster et Shalev (2007)

Von Aster et Shalev (2007) ont décrit un modèle de développement en quatre étapes qui suit une organisation hiérarchique par paliers, où la perception des nombres est définie par une partie innée (cf. Le système de la magnitude, étape 1) et par une partie acquise (cf. La ligne numérique mentale, étape 4). Le modèle décrit à la fois les représentations cognitives, les aires cérébrales impliquées et les compétences associées pour chaque étape. Une flèche en pointillés délimite une zone grisée correspondant au développement de la mémoire de travail (cf. Annexe A1).

Première étape : Cette étape se déroule pendant la petite enfance et correspond à l'acquisition de la cardinalité à travers le système de la magnitude. La signification de base du nombre se développe à travers des compétences reliées aux zones cérébrales bipariétales et associées au pôle analogique. Il s'agit du subitizing, lié au SNP et de l'estimation et de la comparaison, rattachées au SNA. Ce premier palier constitue une condition préalable à l'association d'un nombre d'objets ou d'événements perçus à des symboles oraux, écrits et arabes.

Deuxième étape : Ce palier correspond au processus de symbolisation linguistique, se déroulant à l'âge préscolaire. L'enfant apprend le comptage verbal, les stratégies de comptage, et récupère des faits arithmétiques en mémoire. Le cortex préfrontal gauche sous-tend cette étape. Si l'acquisition du langage s'avère perturbée, l'association entre les quantités et leur symbole linguistique ne pourra se développer convenablement.

Troisième étape : Au sein de ce palier se développe le processus de symbolisation arabe, contrôlé par le cortex bioccipital. L'enfant apprend à maîtriser les symboles numériques arabes, autrement dit les outils que constituent les chiffres. Il appréhende également les calculs écrits et acquiert la notion de pair et impair.

Quatrième étape : Cette dernière étape se compose du développement de la ligne numérique mentale avec l'acquisition de l'ordinalité. Les connexions cérébrales bipariétales impliquées dans le calcul approximatif et le raisonnement arithmétique vont permettre à l'enfant d'âge scolaire de construire une représentation spatiale du nombre sous la forme d'une ligne numérique, organisée de gauche à droite et accessible mentalement. Pour accéder à cet ultime palier, les étapes précédentes doivent être maîtrisées.

Ce modèle suggère que ces quatre étapes se succèdent de manière indépendante, sans tenir compte de leurs interactions au cours du développement. L'intégration du sens du nombre se ferait uniquement à la dernière étape du modèle. Or, ce sens du nombre se construit et se consolide tout au long de l'enfance à travers les expériences et les apprentissages mathématiques (cf. Annexe A2). Les différents modules décrits dans le Triple Code émergent et se consolident à diverses étapes du développement en fonction des prédispositions génétiques ou encore de l'environnement de l'individu (Von Aster, 2000). Selon cet auteur, chaque module du Triple Code se construit en s'appuyant sur le développement de ses modules voisins. Ce système serait semi-autonome : les modules sont indépendants, mais chacun soutient le développement de l'autre. Il y aurait donc un cercle vertueux des apprentissages symboliques sur les compétences innées. De la même manière, les capacités de subitizing s'étofferaient au fur et à mesure des apprentissages symboliques (passage de 4-5 éléments à 6-7 éléments).

.3. Substrats neuroanatomiques impliqués dans le subitizing

Cette section traitera des régions cérébrales impliquées dans le subitizing, processus sous-tendu par le code analogique.

.3.1. L’hypothèse d’un traitement global

Certains auteurs postulent que les compétences analogiques seraient sous-tendues par un traitement cérébral global et non spécifique. Les compétences numériques innées reposeraient sur le système pariétal, qui gagnerait en précision au cours du développement de l’enfant et guiderait l’acquisition de l’arithmétique et des concepts mathématiques élaborés. Les petites et les grandes numérosités seraient traitées par les mêmes régions cérébrales, ce qui suggèrerait une certaine continuité développementale (Izard et al., 2008). D’autre part, Gray et Reeve (2014) ont montré que le subitizing est sous-tendu par des compétences spécifiques, mais aussi par des compétences cognitives générales telles que la mémoire de travail ou l’inhibition. Ainsi, les hypothèses d’un traitement global vs spécifique ne s’excluraient pas, mais devraient être appréhendées conjointement.

.3.2. L’hypothèse de deux voies neuronales de traitement

Certains auteurs parlent de deux voies neuronales différentes sous-tendant le traitement des petites et des grandes quantités (Kaufmann et al., 2014). Une étude réalisée chez des nourrissons montre que le cerveau traite les petites quantités comme des objets individuels et les grandes quantités comme des collections approximatives. Il existerait donc deux systèmes distincts pour traiter les petites quantités et les grandes quantités. De plus, ces systèmes de traitement non verbaux des quantités se développeraient de manière précoce. Ces résultats sont retrouvés chez l’adulte, suggérant que cette dissociation de traitement persiste malgré les différences interindividuelles de développement, d’apprentissage mathématique et d’expériences générales (Hyde & Spelke, 2011).

.3.3. L’implication du lobe pariétal

Le lobe pariétal est souvent décrit comme le siège de la représentation des quantités. D’après Dehaene (2001), les quantités numériques s’imposent à nous via les circuits du lobe pariétal inférieur. Celui-ci est impliqué dans les fonctions verbales, spatiales et attentionnelles mobilisées dans les tâches de calcul. Pour rappel, la représentation analogique est une compétence innée qui permet de traiter approximativement les quantités et représente la sémantique des nombres. Elle apparaît reliée au lobe pariétal (Lafay et al., 2013). Les résultats de l'imagerie cérébrale fonctionnelle chez les adultes et les enfants indiquent que le sens du nombre est sous-tendu par un réseau neuronal situé dans le sillon intrapariétal (SIP ; Von Aster & Shalev, 2007). Le segment horizontal du sulcus intrapariétal correspond à un système central de quantité qui s’active dès que les nombres sont manipulés, indépendamment de leur représentation. Son activation augmente lorsque la tâche met davantage l'accent sur le traitement des quantités (Dehaene et al., 2003). Des études d’imagerie cérébrale ont permis de mettre en exergue une réduction de matière grise au niveau du SIP chez les enfants dyscalculiques comparés aux enfants au développement mathématique typique (Rotzer et al., 2008). Une multitude d’aires cérébrales participent au traitement des nombres et pour Dehaene (2001), le lobe pariétal inférieur n’est qu’un nœud du circuit. Une zone du gyrus angulaire gauche, en lien avec d'autres zones périsylviennes de l'hémisphère gauche, soutient la manipulation des nombres verbaux. Enfin, un système pariétal supérieur postérieur bilatéral soutient l'orientation attentionnelle sur la ligne numérique mentale (Dehaene et al., 2003). Comme chez les adultes et les enfants, l’identification d’objets chez les nourrissons est codée le long d'une voie ventrale dans les lobes temporaux. Le nombre active un réseau pariétopréfrontal droit supplémentaire. Les zones cérébrales répondant aux changements d'objet ou de nombre apparaissent donc distinctes et révèlent une organisation ventrale/dorsale de base, déjà en place dans le cerveau du nourrisson. Ces résultats soulignent la continuité mentale du développement du sens des nombres (Izard et al., 2008).

.4. De l'intérêt d'évaluer le subitizing dans un bilan de cognition mathématique

Dans cette partie seront abordées les difficultés mathématiques, leur origine et leur potentiel lien avec les compétences de subitizing.

.4.1. Terminologie des difficultés mathématiques

Dans le Manuel Diagnostique et Statistique des Troubles Mentaux (DSM-5 ; APA, 2013), au sein de la catégorie des troubles neurodéveloppementaux, se trouve une nosologie correspondant aux difficultés sévères d'apprentissage de l'arithmétique. Ces difficultés font l'objet d'un diagnostic spécifique de « Trouble spécifique de l'Apprentissage avec déficience en Mathématique » ou TAM (APA, 2013). Cette appellation fait suite au terme de dyscalculie, usité jusqu'alors. Les critères issus du DSM-5 (APA, 2013) sont les suivants : persistance du trouble malgré les efforts de remédiation, compétences mathématiques très inférieures au niveau attendu pour l'âge, répercussions sur les activités de la vie quotidienne, professionnelles ou scolaires, apparition des difficultés dès l'âge scolaire, non expliquées par d'autres difficultés (e.g. sensorielles, langagières). Quatre domaines mathématiques peuvent ainsi être entravés : le sens du nombre, les faits arithmétiques, le calcul, le raisonnement (i.e. les problèmes).

Les manifestations de la dyscalculie développementale apparaissent liées à l'âge ainsi qu'au niveau scolaire (Shalev & Gross-Tsur, 2001). Selon ces auteurs, elle correspond à un trouble d'apprentissage persistant chez environ la moitié des élèves préadolescents concernés. La dyscalculie toucherait autant les filles que les garçons et sa prévalence s'élèverait à 5-6% dans la population d'âge scolaire, 1 à 10 % pour Lafay (2017).

.4.2. Lien entre déficit de subitizing et dyscalculie

Selon Von Aster et Shalev (2007), il semble y avoir un consensus sur la base neuropsychologique de la dyscalculie qui correspondrait à un déficit du sens du nombre. Ce dernier serait caractérisé par une atteinte des compétences numériques de base : la capacité à identifier de manière exacte de petits ensembles d'objets (i.e. subitizing) et de manière approximative de plus grands ensembles (i.e. estimation). En effet, selon ces auteurs, la représentation de la magnitude ainsi que ses fonctions associées (i.e. subitizing et estimation) participent à élaborer un sens du nombre basique. Ceci correspond à l'étape 1 de leur modèle développemental en quatre étapes (cf. Annexe A1). Il s'agirait d'une étape nécessaire à « l'association d'un nombre perçu d'objets ou d'évènements à un symbole oral, ou, plus tard, à des symboles écrits et arabes » (Von Aster & Shalev, 2007, p.870). Si l'étape 1 ne peut se développer efficacement, les enfants pourront retenir le nom des nombres par cœur, mais ces nombres ne seront porteurs d'aucun sens. Ainsi, on reconnaît une valeur prédictive au subitizing, qui semble atteint en cas de dyscalculie (Lafay et al., 2013). D'après Feigenson et collègues (2004), un déficit au niveau de l'OTS et/ou du SNA entraverait le développement du système symbolique, sous-tendu par ces deux systèmes de base. Benoit et collègues (2004) ajoutent que le subitizing permettrait de développer l'accès à la signification du mot-nombre et à la cardinalité : l'enfant accède simultanément à chacun des éléments et à la magnitude dans son ensemble. Selon Noël et Rousselle (2011), les enfants dyscalculiques présentent un déficit de base dans la construction des représentations exactes des nombres symboliques, occasionnant par la suite des difficultés dans les tâches de traitement des nombres symboliques. Les difficultés des enfants à construire des représentations numériques exactes pourraient donc être expliquées par un défaut au niveau de l'OTS induisant une faiblesse de subitizing (Noël & Rousselle, 2011). Selon Lafay et ses collègues (2017), la dyscalculie occasionnerait un déficit de traitement des nombres symboliques ainsi que du sens du nombre, s'exprimant au niveau du système numérique précis (SNP) et affectant le traitement des petites quantités.

De leur côté, Mejias et ses collaborateurs (2012) mettent en lumière des compétences d'estimation plus variables et moins précises chez les enfants présentant des difficultés mathématiques par rapport à un groupe contrôle. Ceci irait dans le sens d'un déficit du SNA dans la dyscalculie. Cette hypothèse est soutenue par Decarli et collègues (2020), qui soulignent un dysfonctionnement du SNA chez les enfants dyscalculiques, sans déficit de subitizing. Au contraire, l'étude de Lafay (2017) indique que les enfants dyscalculiques parviennent à traiter approximativement les grandes quantités : leur déficit porterait donc uniquement sur le SNP.

De nombreux chercheurs s'accordent sur le fait qu'il existe un lien entre des difficultés mathématiques et un déficit de subitizing. Par exemple, Schleifer et Landerl (2011) ont étudié le mécanisme de subitizing chez 52 enfants dyscalculiques et 52 enfants contrôles scolarisés en CE1, CE2 et CM1. Les temps de réponse étaient significativement plus élevés chez les enfants dyscalculiques, suggérant un déficit de subitizing. Moeller et collaborateurs (2009) concluent également à un dysfonctionnement du subitizing chez deux garçons dyscalculiques âgés de dix ans par rapport à un groupe contrôle de même âge. La mesure des mouvements oculaires des deux garçons suggérait qu'ils utilisaient le comptage plutôt que le subitizing pour énumérer de petites quantités de points. Dans une étude exploratoire menée sur 78 enfants de maternelle, Gray et Reeve (2014) ont voulu déterminer si la compétence de dénombrement de points pouvait prédire de faibles compétences mathématiques. Trois profils d'enfants au fonctionnement différent ont été identifiés. Un des profils présentait un dysfonctionnement au niveau du subitizing en lien avec des compétences altérées en addition. Leurs résultats suggèrent qu'un déficit de subitizing pourrait constituer un marqueur diagnostique de la dyscalculie. Toutefois, d'autres études n'établissent pas ce lien. Par exemple, Ceulemans et collègues (2014) ne trouvent pas de différence au niveau de l'exactitude ou de la vitesse de subitizing chez 18 adolescents dyscalculiques par rapport à 28 adolescents au développement mathématique typique. Decarli et collaborateurs (2020) retrouvent des résultats similaires, pour 32 enfants dyscalculiques âgés de 9 ans par rapport à un groupe contrôle de 32 enfants de même âge. Pour Anobile et collègues (2019), le subitizing ne semble pas être relié aux compétences numériques. Ces auteurs n'ont trouvé aucune corrélation entre les habiletés mathématiques d'un groupe composé de 98 enfants et 38 adultes et leurs performances de subitizing. Ces divergences au sein de la communauté scientifique peuvent être expliquées par des différences méthodologiques telles que la nature de la tâche proposée, les caractéristiques des participants ou les modalités de présentation des stimuli. Ces différences feront l'objet d'une analyse détaillée dans la suite de ce travail.

.4.3. Autres facteurs cognitifs impliqués

Bien qu'un déficit numérique de base puisse être à l'origine de la dyscalculie, elle pourrait aussi être liée à un déficit de facteurs cognitifs plus généraux. Les fonctions exécutives contribueraient au développement des habiletés mathématiques chez les enfants d'âge préscolaire (Espy et al., 2004). D'ailleurs, Rasmussen et Bisanz (2005) exposent le lien entre compétences de mémoire de travail et compétences mathématiques : les enfants d'âge préscolaire s'appuieraient fortement sur des capacités de mémoire de travail visuospatiale pour résoudre des problèmes mathématiques. Une récente revue rapporte toutefois que les déficits liés aux nombres et les déficits non spécifiques aux nombres (i.e. facteurs cognitifs généraux) peuvent être différenciés chez les adultes dyscalculiques, aussi bien au niveau cognitif que cérébral (Kaufmann et al., 2020). Les auteurs ont modélisé les caractéristiques cognitives de la dyscalculie et ses corrélats neuronaux : les compétences spécifiques au nombre seraient traitées par les réseaux cérébraux fronto-pariétaux et temporo-pariétaux. Quant aux compétences cognitives générales telles que l'attention et la mémoire de travail, elles seraient traitées par le cerveau au niveau des aires occipitales, du gyrus cingulaire, de l'insula et du cervelet.

.4.3.1. Composantes attentionnelles

Les compétences attentionnelles semblent jouer un certain rôle dans le traitement des petites numérosités. Railo et ses collègues (2008) suggèrent que le recrutement attentionnel croît à mesure que le nombre d'items à traiter augmente. Pour Trick (1992), des déficits d'attention ou de localisation spatiale entraveraient le comptage, mais pas le subitizing, puisque le subitizing reposerait sur un mécanisme préattentif et le comptage sur un mécanisme d'attention spatiale. Sophian et Crosby (2008) nuancent : quelle que soit la numérosité impliquée dans la tâche d'énumération, un traitement attentionnel des items cibles s'avère nécessaire. Toutefois, le recrutement attentionnel serait plus important pour les collections supérieures à quatre items que pour celles comportant un à trois items. De plus, Moeller et collaborateurs (2009) ont testé les compétences attentionnelles des deux garçons dyscalculiques participant à leur étude à l'aide d'une batterie d'évaluation de l'attention. Les scores des deux garçons étaient dans la norme attendue alors même que les paramètres visuels des subtests étaient plus complexes que ceux de la tâche de subitizing échouée (un, deux ou trois points). Ils concluent donc que le déficit de subitizing des deux garçons n'était pas imputable à des difficultés attentionnelles ou perceptives, mais résultait bien d'un déficit spécifique, concernant l'encodage, la représentation et/ou la dénomination du nombre de points. D'autre part, Ashkenazi et Henik (2012) indiquent qu'un entraînement à l'aide de jeux vidéo peut améliorer les compétences attentionnelles chez les dyscalculiques, sans que cela n'améliore leurs compétences numériques : après dix jours d'entraînement, l'attention des participants dyscalculiques s'est améliorée, mais leur rang de subitizing n'a pas changé. Ainsi, les auteurs postulent que les difficultés mathématiques ne peuvent être expliquées exclusivement par des mécanismes cognitifs généraux tels qu'un déficit d'attention. Gliksman et Henik (2019) exposent des conclusions similaires en manipulant le système d'alerte des participants à leur étude. Enclencher une alerte sonore juste avant la présentation du stimulus a permis de réduire le temps de réponse de manière générale, mais n'a pas amélioré le rang de subitizing ni le taux d'erreurs des sujets dyscalculiques.

.4.3.2. Composantes mnésiques

La tâche de subitizing implique de garder un court instant en mémoire les items perçus avant de pouvoir donner la réponse et ce, quelle que soit la modalité de sortie. La capacité d'un individu à percevoir un certain nombre d'items serait fortement corrélée à la capacité à les stocker en mémoire de travail (Drew & Vogel, 2008 ; Piazza et al., 2011). Melcher et Piazza (2011) suggèrent que les difficultés de subitizing reflèteraient des différences au niveau des compétences de mémoire de travail. Le subitizing serait lié à des compétences de mémoire à court terme visuospatiale (Piazza et al., 2011 ; Revkin et al., 2008). Par exemple, Davidse et collègues ont analysé en 2014 les profils de jumelles présentant d'importantes difficultés mathématiques. Les deux filles présentaient également de faibles compétences visuospatiales. Comparées aux enfants du groupe contrôle, elles présentaient des difficultés de traitement du nombre, dont un déficit de subitizing. Les auteurs supposent que la tâche de subitizing impliquait un recrutement trop important de la mémoire de travail au regard des compétences visuospatiales des jumelles. Les difficultés de traitement du nombre des deux enfants découleraient directement de leurs compétences visuospatiales. De plus, Ashkenazi et collaborateurs (2022) ont constaté une corrélation positive et significative entre le rang de subitizing et l'empan de mémoire de travail visuospatiale (MDTVS) chez des enfants d'âge préscolaire. En effet, leur performance dans la gamme de subitizing (1-4) apparaissait liée à leurs différences individuelles au niveau de l'âge et de l'empan de la MDTVS. Toutefois, l'étude menée par Decarli et collègues (2020) auprès d'enfants dyscalculiques de neuf ans rapporte des compétences de subitizing similaires à celles des enfants contrôles, mais des capacités de MDTVS largement altérées. Par ailleurs, selon Todd et Marois (2004), les traitements visuels tels que la mémoire à court terme visuelle engendrent une activation du SIP. Comme vu dans la section 3 de ce travail, le SIP est une région cérébrale activée durant le traitement des nombres. Ashkenazi et ses collègues (2012) postulent qu'une activité anormale du SIP chez les dyscalculiques serait à la base de la fragilité du traitement numérique et engendrerait par conséquent les difficultés de subitizing.

.4.3.3. Compétences langagières

La tâche de subitizing telle que définie classiquement dans la littérature implique une modalité de sortie verbale (se reporter à la section 1 de ce travail). Un output verbal pourrait mettre en échec les enfants présentant des difficultés de langage oral. D'après Von Aster et Shalev (2007), si les compétences numériques de base (i.e. subitizing et estimation) sont préservées, mais que le langage est perturbé, l'enfant ne pourra associer une quantité à son symbole linguistique de manière appropriée pour son âge. Il apparaît donc légitime, face à l'échec d'un patient à une tâche impliquant le subitizing, de se questionner sur ses compétences verbales. Est-ce parce que l'output est verbal que l'enfant échoue ? Moeller et collègues démontrent en 2009, grâce à des mesures de fixations oculaires, que le déficit de subitizing ne se situe pas au niveau de la production verbale des nombres, mais bien au niveau du processus permettant l'encodage rapide, automatique et simultané de quantités non-symboliques. En effet, si le déficit portait sur l'étape de production verbale, le nombre de fixations oculaires lors de l'étape d'encodage ne serait pas significatif. Or, ce fut le cas dans leur recherche.

Par ailleurs, dans une étude datant de 2017, Raddatz et collègues ont proposé des tâches mathématiques à des enfants présentant des difficultés mathématiques et à des enfants présentant des troubles de lecture. Ces auteurs soulignent que les enfants avec difficultés mathématiques présentent des déficits sur une large gamme de tâches numériques, dont le subitizing. Dans cette recherche, la tâche de subitizing consistait à compter le plus rapidement possible les points s'affichant sur un écran. La réponse était donnée en pressant la touche du clavier correspondant à la numérosité identifiée. Ainsi, les auteurs ont évité l'output verbal oral du subitizing. Les résultats de cette étude montrent que les enfants avec troubles de lecture ne présentent des déficits que sur les tâches numériques verbales, ceci excluant donc la tâche de subitizing. Les difficultés en mathématique et en lecture seraient donc des comorbidités additives. De plus, Moeller et collaborateurs (2009) ont examiné les performances de deux enfants dyscalculiques sur une tâche de subitizing. Bien que dans la norme, les capacités en lecture des deux garçons étaient légèrement inférieures à celles du groupe témoin. Même en prenant en compte ces résultats légèrement inférieurs, les performances de subitizing déficitaires des deux garçons restaient valables. Cela indique que le déficit de subitizing dans la dyscalculie est spécifique, non explicable par des difficultés concomitantes telles que les déficits associés à une performance de lecture légèrement plus faible.

.5. Buts

La partie théorique du présent travail a amené le lecteur à mieux appréhender la cognition mathématique à travers les modèles neurocognitifs faisant consensus à l'heure actuelle. Le subitizing a été défini et ses mécanismes ont été détaillés. La dyscalculie (ou trouble des apprentissages mathématiques) a été définie. Le rôle du subitizing au sein des difficultés mathématiques a été explicité au lecteur et les facteurs cognitifs en lien avec ces déficits ont été exposés. Par ailleurs, plusieurs études mentionnées dans cette partie théorique présentaient des résultats divergents quant au lien unissant la performance de subitizing et la dyscalculie. La suite de ce travail consistera à analyser diverses études statuant sur le lien potentiel entre la dyscalculie et les difficultés de subitizing afin de mieux comprendre les divergences d'opinions au sein de la communauté scientifique. Ces analyses permettront d'extraire des éléments nécessaires à la création d'une épreuve testant le subitizing de la manière la plus pure possible.

Méthode

Certains chercheurs constatent un lien entre déficit de subitizing et dyscalculie (voir par exemple Gray & Reeve, 2014 ; Lafay et al., 2017 ; Moeller et al., 2009 ; Schleifer & Landerl, 2011), d'autres n'observent aucun lien voire réfutent cette théorie (voir par exemple Anobile et al., 2019 ; Decarli et al., 2020). Pourquoi n'y a-t-il pas de consensus concernant ce lien au sein de la communauté scientifique ? Quels sont les facteurs à l'origine des divergences de constats parmi les spécialistes ? Dans cette partie, il s'agira de sélectionner des études traitant de ce lien et d'analyser les critères méthodologiques et les paradigmes utilisés : ces informations seront mises en regard et permettront de mieux comprendre les contradictions entre les conclusions issues des différentes études sélectionnées.

Sélection des études :

Plusieurs bases de données ont été consultées afin de trouver des études en lien avec la problématique précitée. Les critères de sélection étaient les suivants : les articles pouvaient être rédigés en langue française ou anglaise. Ils devaient traiter du lien entre un déficit de subitizing et la dyscalculie. Ont été exclus les articles traitant de troubles associés ou de comorbidités (e.g. syndromes génétiques, anxiété mathématique, syndromes dysexécutifs…). Eviter les comorbidités chez les populations étudiées permet de contrôler au maximum les facteurs extérieurs pouvant expliquer les difficultés mathématiques. Ainsi nous maximisons les chances d'observer des enfants présentant des difficultés mathématiques spécifiques, non imputables à d'autres troubles. Les études traitant d'autres domaines de la cognition mathématique ont également été exclues (e.g. mesures, faits arithmétiques...). Les revues de littérature ont également été exclues de la sélection. Les articles sélectionnés devaient avoir été publiés après 2002 (i.e. sélection sur une période de 20 ans).

A partir de ces critères, une recherche méthodique d'articles a été effectuée sur la base de données PubMed, à l'aide des mots-clefs suivants : Dyscalculia AND Subitizing, donnant lieu à dix-neuf résultats. Onze articles ont été sélectionnés. Huit ont été exclus : deux étaient des revues de littérature, deux abordaient des comorbidités, deux traitaient de la remédiation de la dyscalculie développementale. Les bases de données de l'Université de Lille et d'autres bases de données ont également servi à sélectionner des études en observant les mêmes critères de sélection, notamment : ScienceDirect, ResearchGate, GoogleScholar. Certains auteurs ont été contactés afin d'obtenir leur article en version intégrale. Les différentes recherches par mots-clefs comportaient les termes suivants : Subitizing AND Dyscalculia, Subitizing AND Developmental Dyscalculia, Subitizing AND Mathematical Learning Disorders. D'autres articles ont été repérés au cours de la rédaction de la partie théorique de ce travail, dans les bibliographies des articles lus. Ainsi, six études ont pu être ajoutées aux onze articles sélectionnés sur PubMed. Au total, dix-sept études ont été analysées dans leur intégralité (cf. Annexe A3).

Différents questionnements ont émergé lors de ce travail, permettant de préciser les caractéristiques à extraire des études sélectionnées. Quel design d'étude l'article présente-t-il ? Les groupes de participants sont-ils homogènes ? Quelles variables ont été contrôlées pour la création des groupes ? Quels critères d'inclusion et d'exclusion des participants ont été retenus ? Combien les groupes comportent-ils d'individus ? Quel est leur âge ? Sur quel(s) critère(s) se base la caractérisation de la performance mathématique ? Quelles normes ont été utilisées et quel seuil permet de qualifier une performance déficitaire ? Un diagnostic de dyscalculie a-t-il été posé chez les participants ? Quelles autres compétences ont été évaluées chez les participants ? Présentent-ils des comorbidités ? Comment le subitizing a-t-il été évalué ? A travers quel paradigme et quelles modalités ? Quelles mesures ont été réalisées ? Quels résultats les auteurs obtiennent-ils et comment les interprètent-ils ?

Les questionnements exposés ci-dessus ont permis la création d'une grille d'extraction des données, adaptée des travaux menés par Anne Lafay et Julie Cattini (2018). La partie « résultats » de ce travail présentera au lecteur les principales caractéristiques des études analysées à l'aide de tableaux synthétiques, rassemblant ces recherches de manière arbitraire par date de publication. Ces résultats seront discutés dans la partie « discussion » de ce travail.

Résultats

Dans cette partie seront exposés les principaux résultats de ce travail, concernant les caractéristiques générales des études, des participants, de la tâche de subitizing proposée ainsi que le type de mesures effectuées.

Caractéristiques générales des études :

Certaines recherches analysées mettent en avant des différences entre les compétences de subitizing de sujets dyscalculiques et de sujets aux habiletés mathématiques préservées. Dans l'étude de Desoete et Grégoire (2006), un déficit en subitizing s'est avéré présent chez 33% des enfants de CE2 présentant un trouble des apprentissages mathématique. Ces enfants montraient des compétences de subitizing et d'estimation semblables à celles du groupe d'enfants de CE1, appariés selon les compétences mathématiques. Si l'atteinte du subitizing était spécifique, les enfants dyscalculiques ne présenteraient pas le même profil que des enfants plus jeunes (suggérant donc un retard d'acquisition). Moeller et collègues (2009) détectent un dysfonctionnement du subitizing chez deux enfants dyscalculiques de dix ans par rapport à dix enfants de même âge présentant un développement typique. Les enfants dyscalculiques réalisaient plus de fixations oculaires que le groupe contrôle, suggérant le recours à une stratégie de comptage pour le rang du subitizing. Schleifer et Landerl (2011) mettent en avant des temps de réponse plus élevés à une tâche de subitizing chez des enfants scolarisés en CE1, CE2 et CM1 identifiés comme dyscalculiques par rapport à leurs pairs contrôles. L'étude longitudinale de Landerl (2013) admet les mêmes conclusions chez 41 enfants dyscalculiques par rapport à 42 enfants au développement arithmétique typique, suivis de la fin du CP jusqu'au CM1. Ashkenazi et collègues (2013) démontrent de moins bonnes performances de subitizing en termes d'exactitude et de temps de réponse chez onze enfants dyscalculiques scolarisés en CE2 ou CM1 comparés à un groupe contrôle de onze enfants issus des mêmes classes. L'étude de Davidse et collègues (2014) met en évidence de moins bonnes compétences de subitizing chez des jumelles de neuf ans présentant un retard mathématique important par rapport à huit enfants de dix ans au développement typique. Gray et Reeve (2014) ont identifié 3 profils avec des compétences de subitizing différentes chez 78 enfants de maternelle. Le profil le moins performant en subitizing était corrélé à de faibles compétences en addition. Les auteurs avancent que de faibles compétences de subitizing pourraient donc constituer un marqueur diagnostique de la dyscalculie. De plus, Olsson et collègues (2016) décrivent un rang de subitizing réduit chez 24 enfants dyscalculiques de 9 ans par rapport à un groupe contrôle de 48 enfants de même âge. Lafay et collaborateurs (2017) observent un déficit dans la production de petites numérosités (1-4) chez 24 enfants dyscalculiques comparés à 37 enfants au développement typique, tous scolarisés en CE2. De leur côté, Cohen et collègues (2019) ont étudié les performances de seize adultes dyscalculiques et seize adultes contrôles sur une tâche de subitizing en modalité visuelle et en modalité tactile. Ils ne relèvent pas de différence entre les groupes pour la modalité visuelle. Le subitizing des adultes dyscalculiques est moins précis en modalité tactile, surtout lorsque les stimuli (i.e. des vibrations délivrées au bout des doigts) sont produits sur des doigts voisins. Estévez-Pérez et collaborateurs (2019) ont analysé les performances de deux-cents participants âgés de sept à quinze ans et ont déterminé des profils de fonctionnement différents au niveau du subitizing. Les enfants au subitizing atypique étaient plus lents que ceux présentant un subitizing typique : selon les auteurs, ils utiliseraient des mécanismes compensatoires comme le comptage. Par ailleurs, Gliksman et Henik (2019) concluent à un rang de subitizing réduit chez les dix-sept adultes dyscalculiques ayant participé à leur étude, par rapport aux dix-sept adultes composant le groupe contrôle. Schindler et collègues (2020) quant à eux, ne trouvent pas de différence significative concernant le taux d'erreur et le nombre de fixations oculaires sur une tâche de subitizing entre le groupe dyscalculique et le groupe contrôle, tous deux constitués de dix enfants de dix ans. Toutefois, ils observent des temps de réponse significativement plus longs chez les enfants dyscalculiques lorsque la présentation des points est canonique, indiquant que ces enfants ne bénéficient pas des patterns familiers comme facteurs facilitateurs du subitizing comparés aux enfants au développement mathématique typique.

En revanche, certains chercheurs soulignent l'absence de lien entre performance de subitizing et dyscalculie. Par exemple, Furman et Rubinsten (2012) n'identifient pas de différence concernant le rang de subitizing de quinze adultes dyscalculiques par rapport à seize adultes contrôles. Pour Ceulemans et collègues (2014), il n'existe pas de différence en termes d'exactitude et de temps de réponse pour le subitizing chez dix-huit adolescents dyscalculiques par rapport à vingt-huit adolescents au développement mathématique typique. Anobile et collègues (2019) avancent que les compétences de subitizing et les compétences en mathématiques ne sont pas corrélées chez les 98 adultes et les 38 enfants inclus dans leur étude. Enfin, Decarli et collaborateurs (2020) mettent en lumière des compétences de subitizing préservées pour leur groupe contrôle comme pour leur groupe dyscalculique, tous deux composés de 32 enfants de 9 ans.

Parmi les dix-sept études analysées dans ce travail, douze étaient des études de cas, une était une étude de cohorte longitudinale, quatre étaient des études exploratoires (cf Annexe A4).

Caractéristiques des participants :

Tableau 1. Nombre et âge des participants pour les 17 études analysées (présentées par date de parution).

Etude	Tranche d'âge des participants en années	Nombre de participants
Desoete et Grégoire (2006)	8-9	90
Moeller et al. (2009)	10-11	10
Schleifer et Landerl (2011)	7-10	104
Furman et Rubinsten (2012)	20-30	31
Landerl (2013)	6-10*	83
Ashkenazi et al. (2013)	8-10	22
Ceulemans et al. (2014)	13-16	46
Davidse et al. (2014)	9-10	10
Gray et Reeve (2014)	<6	78
Olsson et al. (2016)	9-10	72
Lafay et al. (2017)	8-9	61
Anobile et al. (2019)	9-10 + 20-30	98 + 38
Cohen et al. (2019)	20-30	32
Estevez-Perez et al. (2019)	7-15	200
Gliksman et Henik (2019)	20-30	34
Decarli et al. (2020)	9-10	64
Schindler et al. (2020)	10-11	20

***Note.* * : étude longitudinale.**

Le tableau 1 rassemble le nombre et l'âge des participants pour les dix-sept études analysées, présentées par date de parution. Le nombre de sujets ayant participé aux études analysées variait de dix à deux-cents. L'âge des participants de toutes les études analysées variait de moins de six ans à environ vingt-six ans.

Tableau 2. Langue parlée par les participants des 17 études analysées (présentées en deux colonnes par date de parution).

Etude	Langue	Etude	Langue
Desoete et Grégoire (2006)	Néerlandais	Olsson et al. (2016)	Suédois
Moeller et al. (2009)	Allemand	Lafay et al. (2017)	Français Québécois
Schleifer et Landerl (2011)	Allemand	Anobile et al. (2019)	Italien
Furman et Rubinsten (2012)	Hébreu	Cohen et al. (2019)	Hébreu
Landerl (2013)	Allemand	Estevez-Perez et al. (2019)	Espagnol
Ashkenazi et al. (2013)	Hébreu	Gliksman et Henik (2019)	Hébreu
Ceulemans et al. (2014)	Néerlandais	Decarli et al. (2020)	Italien
Davidse et al. (2014)	Néerlandais	Schindler et al. (2020)	Allemand
Gray et Reeve (2014)	Anglais		

Le tableau 2 présente la langue parlée par les participants de chaque étude analysée. Quatre des études analysées étaient de langue allemande. Le néerlandais était parlé par les sujets de trois études, l'italien par les participants de deux études. L'hébreu était pratiqué par les sujets de quatre recherches. Une étude était de langue anglaise, une de langue suédoise, une de langue franco-québécoise et une de langue espagnole.

Tableau 3. Répartition des participants selon le genre et le groupe pour les 17 études analysées (présentées par date de parution).

Etude	Groupe DM		Groupe DT		Total	
	Garçons	Filles	Garçons	Filles	Garçons	Filles
Desoete et Grégoire (2006)	20	10	20+20	10+10	60	30
Moeller et al. (2009)	2	0	6	2	8	2
Schleifer et Landerl (2011)	6+5+10	6+14+11	6+10+12	6+5+9	49	55
Furman et Rubinsten (2012)	2	13	4	12	6	25
Landerl (2013)	16	25	24	18	40	43
Ashkenazi et al. (2013)	2	9	2	9	4	18
Ceulemans et al. (2014)	8	20	5	13	13	33
Davidse et al. (2014)	0	2	0	8	0	10
Gray et Reeve (2014)	N/A	N/A	N/A	N/A	35	43
Olsson et al. (2016)	7	17	14	34	21	51
Lafay et al. (2017)	4	20	16	21	20	41
Anobile et al. (2019)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Cohen et al. (2019)	4	12	3	13	7	25
Estevez-Perez et al. (2019)	13+9	15+14	65	74	94	106
Gliksman et Henik (2019)	3	14	3	14	6	28
Decarli et al. (2020)	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Schindler et al. (2020)	4	6	6	4	10	10

Note. DM **: difficultés mathématiques.** ***DT*** **: développement typique.** ***N/A*** **: non applicable.**

Le tableau 3 présente la répartition en genre selon le groupe expérimental des participants des études. La répartition des participants selon leur genre varie d'une étude à l'autre. Deux études comportaient plus de garçons que de filles au total, une étude comportait autant de garçons que de filles au total et une étude incluait uniquement des filles. Pour deux des études analysées, aucune information n'est donnée concernant le genre des participants. Certaines études comportent la même répartition de genre : le groupe contrôle et le groupe dyscalculique comportent tous deux le même nombre de garçons et le même nombre de filles. Desoete et Grégoire (2006) proposent également la même répartition quant au nombre de filles et de garçons dans chaque groupe (i.e. vingt garçons et dix filles dans le groupe dyscalculique, dans le groupe contrôle avec appariement au niveau de l'âge et dans le groupe contrôle avec appariement au niveau des compétences mathématiques). Schleifer et Landerl (2011) répartissent équitablement les filles et les garçons des groupes contrôle et dyscalculique pour chaque niveau scolaire étudié. Estévez-Pérez et collègues (2019) comparent un groupe à faible niveau arithmétique et un groupe dyscalculique à un groupe contrôle plus large.

D'autre part, le niveau socio-économique (NSE) des participants n'est détaillé que dans l'étude de Lafay et collègues (2017) qui retrouvent une différence significative entre le groupe contrôle et le groupe dyscalculique. Le groupe contrôle était constitué de vingt-trois enfants de NSE élevé (62%), huit de NSE moyen (22%) et six de NSE pauvre (16%). Le groupe dyscalculique était composé de sept enfants de NSE élevé (29%), quinze de NSE moyen (63%) et deux de NSE pauvre (8%). Desoete et Grégoire (2006) évoquent un appariement des différents groupes selon leur niveau socio-économique, sans donner de détails. Gray et Reeve (2014), Olsson et collègues (2016) et Schindler et collaborateurs (2020) mentionnent que les enfants prenant part à leur recherche sont issus de niveaux socio-économiques moyens, sans donner de détails.

Tableau 4. Evaluation des compétences mathématiques des participants des 17 études analysées (présentées par date de parution).

Etude	TTR	KRT-R	HRT	Système national	Zareki-R	MATAL	BDE2 AC-MT	Autre
Desoete et Grégoire (2006)	X	X						
Moeller et al. (2009)			X					
Schleifer et Landerl (2011)			X					
Furman et Rubinsten (2012)				X				
Landerl (2013)			X					
Ashkenazi et al. (2013)				X				
Ceulemans et al. (2014)	X	X						
Davidse et al. (2014)	X							
Gray et Reeve (2014)								X
Olsson et al. (2016)								X
Lafay et al. (2017)					X			
Anobile et al. (2019)								X
Cohen et al. (2019)						X		
Estevez-Perez et al. (2019)				X				
Gliksman et Henik (2019)						X		X
Decarli et al. (2020)							X	
Schindler et al. (2020)			X					X

Le tableau 4 présente les tests utilisés pour évaluer les habiletés mathématiques des participants, pour chaque étude analysée. L'évaluation des compétences mathématiques des sujets diffère selon les recherches. Dans l'étude de Desoete et Grégoire (2006), les enfants du groupe dyscalculique devaient présenter un score inférieur au seuil critique de -2ET au test standardisé TTR (Tempo Test Rekenen ; De Vos, 1992) et/ou au test KRT-R (Kortrijkse Rekentest-Revisie ; Baudonck et al., 2010). Ils devaient également obtenir un score mathématique d'un de la part de leur enseignant sur une échelle de sept points. D'autre part, Moeller et collègues (2009) et Schleifer et Landerl (2011) ont proposé à leurs sujets dyscalculiques le test HRT 1-4 (Heidelberger RechenTest ; Haffner et al., 2005). Les 2 garçons dyscalculiques de l'étude de Moeller et collègues (2009) ont obtenu un score inférieur à -1ET et les 52 enfants dyscalculiques ayant participé à l'étude de Schleifer et Landerl présentaient des scores inférieurs à -1.5ET. Pour être associé au groupe dyscalculique, les enfants ayant pris part à la recherche menée par Landerl (2013) devaient obtenir un score inférieur à -1ET au HRT 1-4 lors des trois temps d'évaluation de l'étude. Les adolescents de l'étude de Ceulemans et collaborateurs (2014) présentaient des scores inférieurs au percentile 25 aux tests TTR et KRT-R. Dans l'étude de Davidse et collègues (2014), les jumelles ayant un retard mathématique important obtenaient des scores parmi les 10% les plus faibles au TTR par rapport au groupe contrôle. Les enfants identifiés comme ayant des difficultés mathématiques dans l'étude de Schindler et collègues (2020) obtenaient un score inférieur au percentile 10 au HRT 1-4. De plus, un entretien diagnostique qualitatif était proposé à tous les élèves ayant obtenu des scores inférieurs au percentile 25 (N=11). Les 24 enfants composant le groupe dyscalculique de l'étude de Lafay et collaborateurs (2017) ont obtenu un score inférieur à -1.5ET au ZAREKI-R (Dellatolas & Von Aster, 2006). D'autre part, Cohen et collègues (2019) ainsi que Gliksman et Henik (2019) ont utilisé une batterie informatisée de tests et questionnaires standardisés, la MATAL (Ben-Simon et al., 2012) et ont choisi un seuil critique de -2.5ET pour constituer leurs groupes d'adultes dyscalculiques. Le groupe dyscalculique de l'étude de Decarli et collègues (2020) était composé d'enfants ayant obtenu des scores inférieurs au percentile 5 à la BDE-2 (Battery for the assessment of Developmental Dyscalculia ; Biancardi et al., 2016) ou au AC-MT (Test for Evaluating Calculation Abilities ; Cornoldi et al., 2002). De leur côté, Gray et Reeve (2014) ont proposé des tâches arithmétiques non verbales évaluant les habiletés d'addition et de soustraction, leur permettant de classer les enfants par profils de performance. Anobile et collègues (2019) ont proposé un test d'addition informatisé aux 98 enfants et 38 adultes de leur étude et un test « papier crayon » uniquement pour les enfants. Aucun seuil de performance n'est précisé. Olsson et collaborateurs (2016) ont créé un test de dépistage mathématique comportant trois tests arithmétiques. Les enfants dont le score combiné était inférieur ou égal au dixième percentile ont constitué le groupe à risque de dyscalculie.

D'autre part, Furman et Rubinsten (2012) ont proposé à leurs participants des tests issus du « système israélien de diagnostic des troubles d'apprentissage » destinés aux étudiants du secondaire et de l'enseignement supérieur. Les adultes dyscalculiques de cette étude devaient obtenir un score inférieur à -1.5 ET aux tests de calcul simple et de connaissances procédurales, soit pour la vitesse de traitement soit pour l'exactitude des réponses. Dans l'étude d'Ashkenazi et collègues (2013), une batterie basée sur le programme du ministère de l'éducation israélienne a été proposée aux participants. Les enfants dyscalculiques réussissaient moins de 50% des tests correspondant à leur niveau scolaire actuel et au niveau scolaire inférieur. Estévez-Pérez et collègues (2019) ont proposé un test non standardisé utilisé par le ministère de l'éducation cubain (MAT, Mathematical Attainment Test) et une batterie numérique informatisée (BNB, Basic Numerical Battery ; Reigosa-Crespo et al., 2012) pour classer les enfants selon trois groupes : dyscalculique, faible performance arithmétique, contrôle.

Tableau 5. Autres compétences cognitives évaluées chez les participants des 17 études analysées (présentées par date de parution).

Etude	Lecture	Orthographe	Efficience intellectuelle	Attention	Mémoire	Langage oral	Inhibition
Desoete et Grégoire (2006)							
Moeller et al. (2009)	X		X	X*			
Schleifer et Landerl (2011)	X						
Furman et Rubinsten (2012)	X			X		X	
Landerl (2013)	X		X	X	X		
Ashkenazi et al. (2013)	X		X				
Ceulemans et al. (2014)	X	X	X				
Davidse et al. (2014)	X	X	X		X		
Gray et Reeve (2014)					X		X
Olsson et al. (2016)	X		X		X	X	
Lafay et al. (2017)	X	X	X		X	X	
Anobile et al. (2019)			X				
Cohen et al. (2019)			X				
Estevez-Perez et al. (2019)			X				
Gliksman et Henik (2019)	X		X	X			
Decarli et al. (2020)			X				
Schindler et al. (2020)					X		

Notes. X* **: l'attention n'a été évaluée qu'auprès des enfants du groupe dyscalculique.**

L'évaluation des compétences cognitives des participants diffère selon les études. Le tableau 5 rassemble les habiletés cognitives évaluées chez les sujets ayant participé à chaque étude. La plupart des chercheurs ont évalué la lecture et l'efficience intellectuelle de leurs participants. Une seule étude teste les capacités d'inhibition. Desoete et Grégoire (2006) précisent que les enseignants et/ou le psychologue scolaire avaient identifié huit des enfants inclus dans le groupe dyscalculique comme présentant des symptômes concomitants de trouble de l'attention avec ou sans hyperactivité (TDAH) et quinze présentant des résultats faibles en lecture ou en orthographe. Les auteurs ne semblent pas avoir effectué d'autres mesures spécifiques dans le cadre de leur recherche. Moeller et collègues (2009) ont proposé des mesures attentionnelles seulement aux sujets composant le groupe dyscalculique.

D'autre part, certains participants présentaient des comorbidités. Comme vu précédemment, c'est le cas pour l'étude de Desoete et collaborateurs (2006). Dans l'étude de Moeller et collègues (2009), un des garçons dyscalculiques présentait un TDAH, traité par méthylphénidate. Les jumelles avec difficultés mathématiques incluses dans l'étude de Davidse et collègues (2014) étaient grandes prématurées. Decarli et collègues (2020) n'ont pas exclu de leur recherche les enfants dyscalculiques présentant des comorbidités. Le groupe dyscalculique composé de 32 enfants comptait 20 sujets ayant des troubles : d'expression écrite (N=3), de lecture (N=3), d'expression écrite et de lecture (N=7), de langage oral (N=5), de coordination motrice (N=1) et d'attention (N=1). Par ailleurs, parmi les dix-sept études analysées, seules quatre précisent l'acuité visuelle correcte des participants (Cohen et al., 2019 ; Gliksman et Henik, 2019 ; Gray et Reeve, 2014 ; Olsson et al., 2016). Une seule précise l'efficience auditive des participants (Olsson et al., 2016). Enfin, Desoete et Grégoire (2006) ont exclu les enfants présentant des antécédents de déficience sensorielle, tout comme Lafay et ses collègues (2017).

Caractéristiques des paradigmes proposés :

Desoete et Grégoire (2006) ont proposé trois subtests de la batterie TEDI-MATH (Van Nieuwenhoven et al., 2001) aux trois groupes d'enfants de CE1 et CE2 prenant part à leur étude. Ils ont évalué le subitizing à travers les tâches de comparaison de patterns de points dispersés et de grandeur relative issues du subtest « estimation de la grandeur ».

Les enfants ayant participé à l'étude de Moeller et collègues (2009) devaient énumérer des points noirs (1-8) présentés aléatoirement à l'intérieur d'un carré blanc sur un écran d'ordinateur. Huit affichages de points différents étaient proposés pour chacune des huit numérosités, donnant lieu à soixante-quatre essais. Le stimulus était présenté jusqu'à ce que l'enfant presse une touche et donne sa réponse oralement. Un repose-front a été utilisé pour maintenir une distance de 50 cm entre l'enfant et l'écran.

Dans l'étude de Schleifer et Landerl (2011), les enfants devaient compter le plus rapidement possible et sans faire d'erreur des points noirs (1-8) disposés aléatoirement sur un écran d'ordinateur avec un fond blanc, à une distance d'environ 70 cm. Les points disparaissaient lorsque l'enfant pressait une touche et donnait sa réponse oralement. Pour chaque numérosité, quatre essais étaient proposés, donnant lieu à trente-deux essais au total.

Furman et Rubinsten (2012) ont proposé une tâche d'énumération-Stroop : les adultes devaient énumérer des chiffres arabes dans deux modalités. Dans la condition symbolique, ils devaient ignorer la quantité (i.e. dire le nom du nombre). Dans la condition non-symbolique, ils devaient ignorer le nombre lui-même (i.e. dire combien de fois le nombre apparaît). Les stimuli (1-9) apparaissaient au centre d'un écran pendant 400 ms après présentation d'un point de fixation pendant 500 ms. Au total, 24 essais ont été proposés aux participants.

Dans l'étude de Landerl (2013), les enfants devaient énumérer des points blancs (1-8) sur fond noir, présentés aléatoirement au centre d'un écran. Chaque stimulus restait à l'écran jusqu'à ce que l'enfant presse une touche et prononce le nombre perçu. Au total, 48 essais ont été proposés à chaque participant.

Ashkenazi et ses collaborateurs (2013) ont présenté des points vert clair (1-9) sur fond noir au centre d'un écran. Au total, 288 essais ont été proposés, répartis en deux blocs de 144 essais comprenant 2 dispositions de points possibles (i.e. canonique ou aléatoire) et 8 essais par numérosité. Une croix de fixation apparaissait pendant 300 ms, puis un écran blanc s'affichait pendant 500 ms, puis le stimulus était présenté pendant 200 ms. Les enfants devaient dire à voix haute le nombre de points affichés, le plus vite possible et sans faire d'erreur.

La tâche d'énumération de Ceulemans et collègues (2014) consistait pour les participants à dire à haute voix le nombre de carrés noirs (1-9) présents au centre d'un écran. Chaque stimulus était affiché sur un fond blanc pendant 120 ms, après présentation d'une croix de fixation pendant 500 ms. Au total, 72 essais ont été proposés.

Davidse et collègues (2014) ont soumis une version numérique de la tâche de subitizing de Wynn (1992) : l'enfant devait juger si le résultat d'une opération comprenant de petites numérosités (1-3) était correct ou incorrect. Un maximum de trois ours apparaissait à l'écran (1.5s) puis était caché (1.5s). Des ours étaient ajoutés ou soustraits (1s) puis l'écran était retiré (1s). Enfin, le résultat était affiché pour une durée illimitée et l'enfant devait dire si la réponse était correcte ou non sans donner le résultat exact. Au total, 37 problèmes d'addition et de soustraction ont été proposés sur un écran d'ordinateur.

Dans la tâche de dénombrement proposée par Gray et Reeve (2014), les enfants devaient dire le plus vite et précisément possible combien de points apparaissaient sur un écran. Les points (1-5) étaient violets, présentés sur fond blanc à environ 30 cm de l'enfant, jusqu'à ce que celui-ci donne une réponse orale. Chaque numérosité a été présentée six fois. Au total, trente essais ont été proposés aux enfants dans un ordre aléatoire.

Olsson et ses collaborateurs (2016) ont demandé à leurs participants de compter des points noirs (1-8) sur un écran d'ordinateur et de répondre aussi rapidement que possible, sans faire d'erreur. Avant chaque essai, l'écran était vide pendant 1000 ms. Le stimulus disparaissait lorsque l'enfant donnait une réponse orale. Au total, 24 affichages de points étaient proposés aux enfants. Chaque numérosité a été présentée trois fois.

Lafay et collègues (2017) ont imaginé une tâche de production analogique : l'enfant voyait un ensemble de points à l'écran et devait entourer le plus vite possible sur une feuille et sans compter, la même quantité de points que celle perçue à l'écran. Au total, trente ensembles de points (1-99) ont été proposés, dix pour le rang 1-4, dix pour le rang 5-9 et dix pour le rang 10-99. Chaque ensemble de points restait à l'écran jusqu'à ce qu'une réponse soit donnée.

Dans l'étude d'Anobile et collègues (2019), trois conditions d'énumération ont été proposées, pour lesquelles les participants devaient dire à haute voix le nombre de stimuli perçus (2-18). En modalité visuelle, des stimuli étaient affichés au centre d'un écran avec un fond gris : soit des points noirs et des points blancs (250 ms) soit des flashs (40 ms). En modalité auditive, des sons purs de 500 Hz à 80 dB étaient présentés. Au total, 204 essais ont été proposés à chaque participant, avec 3 répétitions par numérosité.

Cohen et ses collaborateurs (2019) ont mis au point deux tâches d'énumération : visuelle et tactile. Les adultes devaient dire à voix haute le plus vite et précisément possible le nombre de points ou de vibrations détectés. Les stimuli étaient présentés pendant 800 ms. En modalité visuelle, des points blancs (1-10) étaient affichés sur un écran à fond noir, de manière aléatoire ou canonique. En modalité auditive, des vibrations (1-10) étaient produites simultanément au bout des doigts des deux mains, sur des doigts voisins ou non. Au total, 320 essais ont été proposés à chaque participant, pour chacune des 2 modalités.

La tâche proposée par Estévez-Pérez et collègues (2019) consistait à énumérer les quantités et répondre le plus vite possible sans faire d'erreur. Des points (1-9) étaient présentés aléatoirement sur un écran d'ordinateur. Au total, chaque enfant bénéficiait de dix-huit essais, comprenant deux occurrences pour chaque numérosité.

Gliksman et Henik (2019) ont proposé une tâche d'énumération de points blancs (1-9) sur fond noir, présentés sur un écran. Les participants devaient dire à haute voix le nombre de points présentés à l'écran, le plus vite et précisément possible. Pour la moitié des essais, un son (2000 Hz, 50 ms) était entendu, 500 ms avant l'apparition de la cible. Chaque stimulus restait affiché pendant 200 ms après présentation d'une croix de fixation. Au total, 486 essais ont été proposés à chaque adulte, répartis en 9 blocs.

Les enfants ayant pris part à l'étude de Decarli et collègues (2020) devaient dire à haute voix le nombre de points (1-8) affichés pendant 500 ms à l'écran, le plus vite et précisément possible. Chaque point avait une couleur spécifique parmi huit couleurs hautement discriminables (rouge, rose, jaune, orange, bleu, blanc, vert, cyan et noir). Deux points ne pouvaient pas avoir la même couleur dans la même image. Au total, 128 essais ont été proposés à chaque enfant, répartis en 4 blocs.

Schindler et ses collaborateurs (2020) ont proposé à leurs participants une tâche d'énumération dans laquelle ils devaient dire le nombre de points présentés (1-9), correctement et le plus vite possible. Les stimuli correspondaient à des points rouges sur fond blanc. Quatre dispositions différentes étaient proposées pour chaque numérosité : un arrangement canonique et trois aléatoires. Une étoile de fixation apparaissait entre chaque essai et il était demandé aux enfants de la fixer. Au total, 36 essais ont été proposés à chaque enfant.

Au total, sur les dix-sept études analysées, quatorze comportaient une tâche d'énumération d'éléments, parmi lesquelles douze présentaient un paradigme avec une entrée visuelle et une sortie verbale orale. Seules trois études comportaient un paradigme avec d'autres modalités d'entrée ou de sortie. Dans la moitié des études environ, le stimulus était présenté jusqu'à ce que le participant donne une réponse. Pour l'autre moitié des recherches, le temps de présentation était limité, allant de 120 ms à 800 ms. La majorité des paradigmes proposés impliquait les numérosités 1-8 ou 1-9.

Mesures effectuées :

Desoete et Grégoire (2006) ont relevé les scores de leurs participants aux subtests « connaissance du système numérique", "opérations" et "estimation de la grandeur » du TEDI-MATH (Van Nieuwenhoven et al., 2001). Moeller et collègues (2009) ont mesuré les temps de réponse (TR) des participants ainsi que le nombre de fixations oculaires et leur durée moyenne. Davidse et collaborateurs (2014) ont comparé le pourcentage de réponses correctes obtenues à la tâche de subitizing par les jumelles dyscalculiques et les enfants du groupe contrôle. Schleifer et Landerl (2011), Olsson et collègues (2016) et Estévez-Pérez et collègues (2019) ont mesuré le temps de réponse des participants à la tâche d'énumération de points. Furman et Rubinsten (2012) ont relevé le temps de réponse et l'exactitude des réponses, tout comme Ashkenazi et collaborateurs (2013) et Landerl (2013). La principale variable dépendante utilisée dans l'analyse statistique de l'étude de Landerl (2013) était l'efficacité inverse (EI), qui combine la précision et la vitesse de réponse en une seule mesure. Ceulemans et collègues (2014) ont évalué la différence entre les temps de réponse dans leurs deux groupes expérimentaux à l'aide d'un modèle mixte linéaire. D'autre part, ils ont évalué la différence de précision à l'aide d'un modèle de régression logistique mixte. Gray et Reeve (2014) ont calculé l'EI et les effets spécifiques de la tâche. Ils ont utilisé la LPA (analyse des profils latents) pour identifier des profils d'individus présentant des schémas de réponse similaires. Lafay et collègues (2017) ont calculé le rapport entre la réponse de l'enfant et le nombre cible puis le rapport de distance absolue (RDA) entre le rapport de l'enfant et le rapport parfait un. Anobile et collaborateurs (2019) ont mesuré le taux d'erreur dans chaque modalité testée chez leurs participants (i.e. groupes de points, séquences de flashs, événements auditifs). Les auteurs ont exploré la corrélation entre les compétences mathématiques et le rang de subitizing et ont comparé les performances de subitizing des enfants ayant un score inférieur au percentile 5 aux tâches mathématiques (faible niveau mathématique), à ceux ayant obtenu un score supérieur au percentile 95 (bon niveau mathématique). Gliksman et collaborateurs (2019) ont enregistré le taux d'exactitude des réponses et le temps de réponse de leurs participants, tout comme Cohen et collègues (2019) et Decarli et collègues. (2020). Enfin, Schindler et collaborateurs (2020) ont mesuré le temps de réponse, le taux d'erreur et le nombre de fixations oculaires des participants. Ils ont analysé les vidéos des mouvements oculaires des participants pour identifier le processus d'énumération utilisé par chaque sujet.

La quasi-totalité des chercheurs a effectué le même type de mesure. Parmi les dix-sept études analysées, quinze comportaient des mesures des temps de réponse des participants. Dix d'entre elles présentaient également des mesures concernant l'exactitude des réponses. Deux groupes de chercheurs ont reporté le nombre de fixation oculaire des participants.

Discussion

Dans cette partie, les résultats des analyses effectuées sur les dix-sept études sélectionnées seront discutés.

Design des études :

Nombreuses sont les études comparant un groupe dyscalculique à un groupe contrôle. Cependant, ce modèle de recherche peut mener à la dilution des différences inter-individuelles au sein de chaque groupe. En effectuant des moyennes, les profils spécifiques des participants ne peuvent être mis en évidence. Les études de cas, bien que présentant un niveau de preuve plus faible, permettent d'effectuer une analyse plus poussée des profils de réponse de chaque participant. Ainsi, des profils cognitifs spécifiques peuvent être dégagés, permettant une compréhension plus fine des mécanismes en jeu dans les processus mathématiques. De surcroît, les études cas-témoins (voir par exemple Davidse et al., 2014 ; Furman et Rubinsten, 2012) ne comportent qu'un seul temps d'évaluation. Il paraît idéal de mener des études longitudinales (voir par exemple Landerl, 2013), qui peuvent comporter plusieurs temps de mesures des compétences et ainsi renforcer la fiabilité des résultats. A l'heure actuelle, aucun consensus n'est établi concernant les critères méthodologiques à observer lorsque l'on souhaite évaluer le processus de subitizing dans une étude cas-témoins, ayant pour conséquence de grandes divergences au niveau des conclusions des recherches.

Caractéristiques des participants :

Comme vu dans la partie théorique de ce travail, les compétences mathématiques font l'objet d'une maturation. Von Aster et Shalev (2007) détaillent le développement de ces compétences à travers un modèle en quatre étapes. Le subitizing fait partie de la première étape, située pendant la petite-enfance. La deuxième étape comprend le développement du système numérique verbal (i.e. les mots-nombres) et permet le comptage verbal, la mise en place de stratégies de comptage et la récupération de faits arithmétiques. Il pourrait être intéressant d'évaluer le subitizing chez des enfants très jeunes. En effet, certains auteurs mettent en exergue le déploiement de stratégies et mécanismes compensatoires des enfants dyscalculiques (Cohen et al., 2019 ; Estévez-Pérez et al., 2019). Ces enfants utiliseraient des stratégies telles que le comptage plutôt que le subitizing. C'est pourquoi Davidse et collègues (2014) soulignent l'intérêt d'évaluer le subitizing chez les enfants le plus tôt possible, de préférence avant l'expansion des apprentissages scolaires, afin de pouvoir distinguer les compétences de subitizing innées de celles influencées par des mécanismes compensatoires tels que le comptage.

D'autre part, Torbeyns et collaborateurs (2004) expliquent que la plupart des études en cognition mathématique sont menées chez des participants appariés en âge, présentant des compétences mathématiques de niveaux différents. Or, « une compréhension approfondie du développement des stratégies chez les enfants atteints de difficultés mathématiques nécessite des comparaisons liées aux capacités » (p.180). En effet, les enfants dyscalculiques utilisant des stratégies immatures comparés à leurs pairs de même âge pourraient présenter un simple retard mathématique. Le modèle d'appariement par niveaux d'aptitude (Bradley & Bryant, 1978) semblerait plus pertinent. Il s'agirait de sélectionner également des participants ayant le même niveau de compétences mathématiques mais dont l'âge diffère. Si les performances des enfants présentant des difficultés mathématiques diffèrent à la fois de celles d'enfants plus jeunes présentant le même niveau de compétences mathématiques et d'enfants de même âge ayant un développement mathématique typique, alors les stratégies des enfants avec difficultés mathématiques pourraient être associées à un déficit et non à une simple immaturité des compétences. Ce modèle d'appariement a notamment été choisi par Desoete et Grégoire (2006). Dans leur étude, trois groupes d'enfants ont été comparés : un groupe d'enfants dyscalculiques de CE2, un groupe d'enfants de CE1 appariés au groupe dyscalculique selon les compétences mathématiques et un groupe d'enfants de CE2, appariés au groupe dyscalculique selon l'âge.

Par ailleurs, la langue parlée par les participants des études ne semble pas expliquer les divergences de résultats concernant le subitizing au sein de la communauté scientifique.

A propos du genre des participants, Devine et collègues (2013) ont étudié les performances mathématiques d'une population de 1 004 enfants britanniques, âgés de 7 à 11 ans et n'ont trouvé aucune différence de genre concernant la prévalence de la dyscalculie. Ils appuient le fait que les garçons, bien que représentés de façon plus importante dans d'autres troubles d'apprentissage, ne le sont pas en ce qui concerne la dyscalculie. Autant d'attention devrait être portée aux filles et aux garçons dans ce domaine. Gross-Tsur et collègues rapportaient des résultats similaires en 1996, ils avaient alors étudié les caractéristiques de 142 enfants dyscalculiques âgés de 11 ans. En conséquence, afin de comparer les performances de subitizing de participants, du moins lorsqu'il s'agit d'enfants, il semble pertinent de constituer des groupes homogènes en ce qui concerne le genre. Parmi les études analysées dans ce travail, plusieurs groupes d'auteurs précisent avoir contrôlé la répartition inter-groupe des participants au niveau du genre en les appariant (voir par exemple Cohen et al., 2019 ; Desoete et Grégoire, 2006 ; Gliksman et Henik, 2019). Ces auteurs n'ont décelé aucune différence significative entre les groupes pour le facteur genre. Toutefois, il convient de considérer que la répartition intra-groupe est tout aussi importante. Puisque l'on compare un groupe entier à un autre, il s'agit dans l'idéal d'équilibrer le nombre de filles et de garçons au sein de chaque groupe. Les chercheurs devraient conduire des analyses concernant la répartition en genre des participants entre chaque groupe et à l'intérieur de chaque groupe. Cela permettrait d'écarter de potentiels facteurs pouvant expliquer, du moins en partie, les divergences au sein des résultats retrouvés dans la littérature. Par exemple, Lafay et ses collaborateurs (2017) identifient une différence significative entre la répartition en genre de leur groupe contrôle et de leur groupe dyscalculique. Ainsi, le lecteur est averti du biais que cette information peut constituer.

D'autre part, parmi les dix-sept études analysées, une seule détaille les caractéristiques socio-économiques des participants (Lafay et al., 2017). Gross-Tsur et ses collègues (1996) ont examiné le niveau socio-économique (NSE) de 142 enfants dyscalculiques issus d'une cohorte de plus de 3 000 élèves dans le cadre d'une recherche démographique. Il s'avère que le NSE des enfants dyscalculiques était significativement plus faible que celui du reste de la cohorte. Ce résultat met en relief la nécessité de prendre connaissance du NSE des sujets prenant part aux recherches dans le domaine de la cognition mathématique. L'idéal serait de contrôler la répartition des NSE parmi les sujets constituant les groupes expérimentaux des études.

En ce qui concerne les habiletés mathématiques des participants, peu d'études en évaluent l'intégralité. Par exemple, Schleifer et Landerl (2011), Moeller et collègues (2009) ainsi que

Landerl (2013), ont utilisé uniquement le test HRT 1-4 (Heidelberger RechenTest, Haffner et al., 2005) pour attester de la performance mathématique de leurs participants. Les auteurs ont administré la première partie du test, consistant pour l'enfant à réaliser le plus de calculs corrects possible en deux minutes pour chaque type d'opération (i.e. addition, soustraction, multiplication, division). Les calculs augmentaient progressivement en difficulté. Ce test bénéficie d'un étalonnage solide, réalisé sur plus de trois-mille enfants allemands. Cependant, il faut noter que ce type de test permet d'évaluer les compétences des enfants en calcul pour chaque type d'opération et non la globalité de leurs compétences mathématiques. De la même manière, l'article écrit par Anobile et ses collaborateurs (2019), intitulé « Simultaneous and sequential subitizing are separate systems, and neither predicts math abilities » (« le subitizing simultané et séquentiel sont des systèmes distincts, et aucun ne prédit les compétences mathématiques ») invite le lecteur à penser que les compétences des participants aux épreuves de subitizing échouent à prédire l'intégralité des habiletés mathématiques. Or, dans cette recherche, les habiletés mathématiques des participants ont été évaluées uniquement à travers des tâches axées sur les faits arithmétiques. La cognition mathématique englobe bien d'autres domaines de compétences : d'autres tâches mathématiques auraient peut-être mis en évidence des corrélations avec la performance de subitizing.

D'autre part, les compétences cognitives générales évaluées dans le cadre des recherches analysées dépendent de leur objectif. Par exemple, Decarli et ses collègues (2020) ont fait le choix de ne contrôler que l'efficience intellectuelle chez leurs participants, considérant que leur but était de comparer les performances mathématiques d'enfants dyscalculiques sans prêter attention à d'éventuelles fragilités concomitantes, plutôt que d'établir des profils de dyscalculie pure. L'évaluation de l'efficience intellectuelle semble toutefois indispensable pour répondre aux critères diagnostiques de la dyscalculie répertoriés dans le DSM-5 (APA, 2013). En effet, les difficultés mathématiques inhérentes à un Trouble spécifique des Apprentissages Mathématiques ne doivent pas pouvoir être expliquées par une efficience cognitive altérée.

Concernant les comorbidités, Gross-Tsur et collaborateurs (1996) désignent un taux de prévalence de comorbidité entre la dyscalculie et la dyslexie s'élevant à 17%. Pour Barbaresi et collègues (2005), cette prévalence serait comprise entre 43 et 65%. De plus, Von Aster et Shalev (2007) soulignent le risque de développer une dyscalculie chez les enfants présentant un trouble développemental du langage ou une dyslexie. Il convient de rappeler qu'une tâche de subitizing avec un output verbal oral implique des habiletés langagières. Des difficultés de langage pourraient alors expliquer un échec sur une tâche explorant classiquement le mécanisme de subitizing (i.e. entrée visuelle, sortie verbale orale). Les compétences langagières telles que la lecture, l'orthographe ou les performances de langage oral devraient donc également être prises en considération et mesurées spécifiquement. Lafay et ses collègues (2017) proposent une évaluation des habiletés langagières solide, basée sur des tests francophones standardisés : compréhension et production de mots avec l'ELO (Evaluation du Langage Oral ; Khomsi, 2001), lecture et écriture de mots écrits à partir de la BALE (Batterie Analytique du Langage Ecrit ; Cognisciences, 2010). D'autres auteurs évaluent moins solidement les compétences langagières. Par exemple, Schleifer et Landerl (2011) mesurent seulement la capacité de lecture, à l'aide d'un test de lecture de mots d'une minute.

D'autre part, comme vu dans la partie théorique de ce travail, la mémoire de travail visuo-spatiale (MDTVS) apparaît étroitement liée au subitizing (Piazza et al., 2011). Il apparaît donc primordial de pouvoir contrôler ce facteur parmi les populations prenant part aux études comportant une tâche de subitizing. Parmi les dix-sept études sélectionnées et analysées dans ce travail, seules cinq incluaient des mesures des compétences mnésiques. Par ailleurs, Gross-Tsur et collaborateurs (1996) relatent que 26% des enfants dyscalculiques ayant participé à leur étude démographique présentaient des symptômes de trouble de l'attention avec ou sans hyperactivité. Il semblerait intéressant de tester l'attention chez les sujets participant aux recherches explorant le mécanisme de subitizing. Toutefois, comme vu précédemment, manipuler les compétences attentionnelles des participants améliorerait leur niveau d'attention globale mais pas leur rang de subitizing (Ashkenazi et Henik, 2012 ; Gliksman et Henik, 2019). Enfin, le subitizing visuel étant un processus de traitement de bas niveau ou précoce, il est essentiel de s'assurer de l'intégrité de la vision des individus. Parmi les dix-sept études analysées, seules six précisent l'acuité visuelle des participants ou l'exclusion des enfants présentant des antécédents de déficience sensorielle. Une seule pointe l'efficience auditive des participants (Olsson et al., 2016).

La généralisation des résultats des différentes études semble compromise en raison de la grande variabilité des critères utilisés pour catégoriser les groupes expérimentaux. Il serait pertinent d'utiliser des batteries de tests complètes afin d'évaluer le plus précisément possible les performances mathématiques et les compétences cognitives générales des sujets prenant part aux études scientifiques. Ces batteries devraient être informatisées et standardisées à grande échelle. Dans l'idéal, des traductions et des étalonnages à l'international devraient être proposés afin d'unifier les données de la recherche. Utiliser les mêmes tests dans les recherches scientifiques permettrait également de définir un même score seuil pour constituer les groupes expérimentaux.

Caractéristiques des paradigmes proposés :

La partie résultats de ce travail a mis en évidence une récurrence dans le type de paradigmes employés par les chercheurs souhaitant évaluer le subitizing. La tâche communément employée consiste à énumérer des éléments perçus. Elle implique, pour la quasi-totalité des études analysées, une entrée visuelle et une sortie verbale orale. Dans certaines études, les stimuli étaient présentés pendant une durée illimitée. Dans d'autres, les chercheurs limitaient le temps de présentation des stimuli. Dans la majorité des études, le rang de numérosités choisi correspondait à 1-8 ou 1-9.

Certaines études analysées dans ce travail présentaient des paradigmes qui ne correspondaient pas toujours à une tâche de dénombrement rapide et exact de petites numérosités, ne mobilisant pas de manière spécifique le subitizing. Par exemple, dans l'étude de Davidse et collègues (2014), le paradigme utilisé correspondait à un jugement d'addition et de soustraction. De même, Desoete et Grégoire (2006) ont utilisé un subtest « estimation de la grandeur » issu d'une batterie mathématique, qui n'évaluait pas spécifiquement le subitizing. Afin d'évaluer le plus purement possible le subitizing dans une batterie de cognition mathématique, il serait pertinent de veiller à proposer des tâches ciblant précisément le système de traitement des petites quantités. Il pourrait s'agir de tâches d'énumération mais aussi de comparaison ou de production analogique.

Concernant le temps de présentation de la tâche, plusieurs études proposent des paradigmes où le temps de présentation du stimulus est illimité (voir par exemple Moeller et al., 2009). L'affichage disparaît seulement lorsque le participant donne sa réponse. Un temps de présentation illimité permet aux participants d'utiliser d'autres stratégies que le subitizing. Ils peuvent par exemple utiliser une stratégie de comptage. Les études de Decarli et collaborateurs (2020) et de Gliksman et Henik (2019), proposaient des paradigmes dans lesquels le temps de présentation du stimulus était limité (500 ms et 200 ms respectivement), ce qui excluait selon eux une stratégie d'énumération par comptage. D'après Decarli et ses collègues (2020), les conclusions des recherches incluant des tâches de subitizing avec un temps de présentation illimité pourraient être biaisées. En effet, les différences retrouvées entre les groupes dyscalculique et contrôle seraient attribuées au rang de subitizing alors qu'elles seraient en réalité reliées à un mécanisme de comptage. Anobile et collègues (2019) partagent ce constat : en réduisant le temps de présentation des stimuli, le participant n'a pas le temps de compter, seul le mécanisme de subitizing est alors évalué. Ces auteurs évoquent une hypothèse : le lien entre compétences mathématiques et subitizing ne se produirait que lorsque le mécanisme de comptage est utilisé. Autrement dit, les études mettant en évidence un déficit de subitizing chez les dyscalculiques montreraient en fait une activation du mécanisme de comptage dans le rang du subitizing. Au contraire, Cohen et ses collaborateurs (2019) ont présenté des stimuli tactiles et visuels pendant 800 ms à des adultes. Ils soulignent l'avantage de proposer une durée de présentation du stimulus plus longue, permettant d'alléger la charge attentionnelle et de mémoire de travail visuelle. Ceci permet alors d'étudier l'effet de la configuration de points (i.e. aléatoire ou canonique) en modalité visuelle. En réduisant la charge cognitive allouée aux mécanismes plus généraux (i.e. mémoire de travail et attention visuelle), la performance des sujets dyscalculiques ne différait pas de celle des sujets contrôles. Selon les auteurs, ce résultat met en évidence le rôle des mécanismes cognitifs généraux dans la tâche d'énumération. Cette hypothèse va dans le sens de la définition du subitizing donnée par Katzin et ses collègues (2019), qui suggèrent que ce processus se produirait en présence de facteurs facilitateurs tels que des ressources attentionnelles ou des configurations d'objets familières. Les paradigmes avec temps de présentation illimité (voir par exemple Landerl, 2013) pourraient comporter des mesures de mouvements oculaires comme dans l'étude réalisée par Schindler et collaborateurs (2020), afin de distinguer la stratégie utilisée par chaque sujet, à savoir le comptage ou le subitizing. Ainsi, il serait possible de définir des profils de fonctionnement chez les participants. De cette manière, les stratégies utilisées gagneraient en transparence et les deux mécanismes (i.e. subitizing et comptage) pourraient être différenciés.

D'autre part, le rang de numérosités sélectionné pour la tâche d'énumération peut dépendre de l'objectif de l'étude. Selon Decarli et collègues (2020), choisir le rang de subitizing a priori peut mener à l'inclusion de données appartenant au rang du comptage plutôt qu'au rang du subitizing. Il s'agirait de le définir après avoir enregistré des temps de réponse, permettant d'obtenir le rang du comptage et le rang du subitizing pour chaque participant. De plus, le comptage ne mobilise pas les mêmes compétences que le subitizing et confondre les données inhérentes aux deux mécanismes mènerait à des biais importants. A nouveau, certains chercheurs pourraient conclure à un déficit de subitizing chez les personnes dyscalculiques alors qu'elles présenteraient en fait un recrutement du mécanisme de comptage. Enfin, le subitizing concernerait des numérosités allant jusque trois ou quatre (Mandler et Shebo, 1982). Afin de tester ce mécanisme il semblerait pertinent d'élaborer une tâche d'énumération comprenant les numérosités un à quatre. Toutefois, certaines recherches ont pour objectif de comparer le traitement des quantités dans le rang de subitizing et dans le rang du comptage, voire de l'estimation (Lafay et al., 2017). Dans ce cas, il serait convenable de sélectionner un rang de numérosités plus étendu (1-9 ou 1-10).

Par ailleurs, ce travail a amené le lecteur à considérer que les modalités de la tâche de subitizing peuvent constituer des freins à l'évaluation pure du subitizing. La majorité des études analysées proposait des modalités d'entrée visuelle et de sortie verbale orale. Il serait certainement pertinent de proposer un paradigme comportant des inputs et des outputs de natures différentes. Pour la modalité de présentation du stimulus (entrée), il paraît difficilement envisageable de proposer un input tactile tel que l'ont fait Cohen et ses collègues (2019). En effet, cela exigerait du matériel spécifique et coûteux pour dispenser les vibrations sur les doigts des personnes testées, difficilement conciliable avec le développement d'une batterie d'évaluation de la cognition mathématique accessible au plus grand nombre. Toutefois, un input auditif pourrait être envisagé, ne nécessitant que des haut-parleurs. En ce qui concerne la modalité de réponse (sortie), il serait également pertinent de faire varier la nature de l'output. Par exemple, pour écarter l'hypothèse d'un échec à la tâche de subitizing en raison de difficultés de langage oral, il s'agirait de demander une réponse écrite, soit en utilisant le pavé numérique d'un clavier d'ordinateur, soit en écrivant la réponse manuellement. Ce type d'output impliquerait cependant le recours à des représentations verbales écrites et visuelles arabes. Les scores à la tâche évaluant le subitizing devraient donc être mis en lien avec les compétences de transcodage de l'individu. De plus, il serait intéressant de considérer une tâche de production analogique de petites quantités, telle que celle proposée par Lafay et ses collègues (2017). La personne évaluée pourrait entourer sur une feuille le nombre de points correspondant à la numérosité perçue. D'autre part, un output moteur pourrait également être envisagé, en tapant sur une table ou en montrant le nombre de doigts correspondant à la numérosité perçue. Le sujet pourrait presser une touche lorsqu'il connaît la réponse puis la donner au testeur dans une des modalités de sortie évoquées précédemment.

Comparer les scores d'un participant échouant à une épreuve de subitizing selon différentes modalités d'entrée et de sortie permettrait d'émettre des hypothèses quant aux déficits sous-jacents pouvant expliquer cet échec. Des algorithmes ainsi qu'un arbre décisionnel pourraient éventuellement être mis en place dans le cadre de la création d'une batterie de cognition mathématique informatisée.

Mesures effectuées :

Parmi les études analysées dans ce travail, beaucoup de chercheurs ont mesuré le temps de réponse et le taux d'erreur de leurs participants dans une tâche de subitizing. Schleifer et Landerl (2011) relèvent des temps de réponse plus importants pour le groupe dyscalculique, reflétant un dysfonctionnement du subitizing. Toutefois, un temps de réponse élevé pourrait suggérer un déficit d'accès au pôle analogique et non un déficit du pôle en lui-même. D'autre part, selon Gray et Reeve (2014), établir des profils de temps de réponse pour chaque participant permet d'analyser de manière distincte la stratégie des participants pour le rang du subitizing et celui du comptage. Dans leur étude, les auteurs ont obtenu ces profils grâce aux mesures de quatre paramètres en lien avec les temps de réponses : le rang du subitizing, le coefficient de régression des temps de réponse pour le rang du subitizing, l'ordonnée à l'origine pour ce coefficient, le coefficient de régression des temps de réponse pour le rang du comptage. Selon ces chercheurs, cette analyse pourrait apporter des informations pertinentes pour diagnostiquer les déficits sous-jacents du traitement numérique. Pour comprendre comment les personnes dyscalculiques traitent les petites quantités et en déduire de manière fiable les déficits numériques sous-jacents, il apparaît judicieux d'identifier des profils de fonctionnement distincts. Une analyse fine des profils observés chez des sujets au développement mathématique typique ou atypique amènerait des éléments de réponse indispensables concernant le lien existant entre un déficit de subitizing et la dyscalculie. A nouveau, il serait intéressant de mener des études de cas unique dans cet objectif. Par ailleurs, il serait pertinent d'intégrer des mesures des mouvements oculaires dans les études explorant le subitizing. Moeller et collègues (2009) ont observé un nombre de fixations oculaires plus élevé chez les deux enfants dyscalculiques de dix ans ayant participé à leur étude, comparé au groupe contrôle. Les auteurs soulignent le fait que la mesure des mouvements oculaires permet de mettre en évidence différents profils de fonctionnement chez les participants. Schindler et ses collaborateurs (2020) ont également mesuré les mouvements oculaires des sujets ayant pris part à leur étude. Ils ont utilisé des lunettes permettant d'enregistrer et de retracer les mouvements des yeux. Ainsi, différentes stratégies d'énumération ont pu être identifiées : la stratégie de comptage intégral, l'énumération simultanée ou quasi-simultanée et l'énumération partielle par groupe de points. Ce type de mesure pourrait garantir aux chercheurs une analyse fine du processus de subitizing de chaque participant et l'identification de catégories de fonctionnement chez les personnes dyscalculiques.

Ce travail a permis de questionner les divergences de résultats des chercheurs concernant le lien subitizing/dyscalculie. Les parties « résultats » et « discussion » de ce mémoire apportent plusieurs éléments de réponse. Le type d'étude réalisé et l'appariement des sujets peuvent participer à expliquer les différences de conclusion retrouvées dans la littérature. Les caractéristiques des participants devraient être minutieusement contrôlées, notamment en ce qui concerne leur âge, nombre, sexe, niveau socio-économique, ainsi que leurs performances mathématiques dans leur intégralité et les compétences cognitives associées (i.e. langage écrit, langage oral, efficience intellectuelle, composantes mnésiques). La nature de la tâche et ses caractéristiques (i.e. rang d'énumération, durée de présentation du stimulus) ont également toute leur importance. Enfin, l'analyse des études a révélé des différences concernant les mesures réalisées par les auteurs (e.g. temps de réponse, score à une épreuve mathématique, taux d'erreur, nombre de fixations oculaires).

Il convient de noter que ce travail comporte des limites. La nature des tests statistiques employés par les différents auteurs n'a pas été explorée, par manque d'expertise. La liste d'études sélectionnées ne se veut pas exhaustive et les éléments mis en évidence par les analyses ne suffisent certainement pas à identifier l'intégralité des variables permettant d'expliquer le débat retrouvé dans la littérature concernant le lien subitizing/dyscalculie. Toutefois, ces éléments de réponse pourraient servir de fondements à la création d'une épreuve testant le subitizing dans le futur Bilan de Cognition Mathématique (BCM).

Conclusion

Le présent travail a explicité le processus du subitizing, mécanisme de traitement rapide et exact des petites quantités participant au développement du sens du nombre dès le plus jeune âge. Le lien entre compétences de subitizing et dyscalculie a été investigué et les compétences cognitives globales impliquées dans ce mécanisme d'énumération quasi-instantané ont été explorées. Des études scientifiques ont analysé la performance de subitizing d'enfants, d'adolescents et d'adultes, retrouvant des résultats divergents. Les conclusions des auteurs varient d'une étude à l'autre quant à l'altération ou la préservation du subitizing chez les sujets dyscalculiques. Pourquoi retrouve-t-on de telles divergences au sein de la littérature scientifique ? Au cours de ce travail, dix-sept études traitant du lien subitizing/dyscalculie ont été sélectionnées. Les analyses menées sur ces études ont amené le lecteur à se questionner sur la méthodologie employée pour évaluer le processus de subitizing. Les divergences de résultats retrouvées au sein de la communauté scientifique peuvent être expliquées par de grandes différences au niveau des paradigmes mis en place, notamment en termes de modalités de présentation du stimulus, de durée de présentation du stimulus, des critères de sélection des participants ou encore des mesures effectuées. La question de la généralisation des résultats peut être posée. Les résultats de chaque étude doivent être nuancés, mis en regard des critères utilisés pour sélectionner la population et déterminer les groupes expérimentaux, des caractéristiques des participants, de la nature de la tâche. Les conclusions valables pour un échantillon spécifique apparaissent difficilement généralisables à une population différente, n'ayant pas bénéficié des mêmes évaluations ou n'ayant pas été recrutée selon les mêmes critères.

Une conclusion majeure de ce travail consiste à mettre en lumière la nécessité d'uniformiser les méthodes de recherche dans le champ de la cognition mathématique. Afin de pouvoir comparer de manière fiable les résultats d'études scientifiques, il apparaît primordial de pouvoir s'appuyer sur des bases méthodologiques similaires, stables et universelles. Dans l'idéal une tâche évaluant le subitizing devrait correspondre à une tâche de dénombrement rapide et exact de petites numérosités, en envisageant des modalités d'entrée et de sortie variées (input visuel ou auditif, output verbal ou moteur) permettant de déduire les éventuels processus sous-jacents dysfonctionnels, pouvant expliquer un échec à la tâche. Afin d'évaluer le subitizing de manière pure, il conviendra de choisir un rang de numérosités restreint (1-3 ou 1-4) associé à un temps de présentation court (200 ms) ne permettant pas l'utilisation de stratégies compensatoires. Une autre option pourrait être de proposer un éventail de numérosités plus large (1-8) avec mesure des temps de réponse. La tâche devrait être informatisée afin que le temps de réponse puisse être enregistré en pressant une touche. Le logiciel catégoriserait alors pour chaque item le temps de réponse du sujet et y attribuerait un mécanisme d'énumération (i.e. temps de réponse très courts pour le subitizing et plus longs pour le comptage). Un marqueur diagnostique de la dyscalculie correspondrait à un recrutement du mécanisme de comptage même pour les plus petites numérosités (1-3 ou 1-4). Les éléments mis en lumière par le présent travail pourraient servir de base à de futurs travaux de recherche, consacrés à la création d'une tâche évaluant le subitizing et destinée à intégrer le Bilan de Cognition Mathématique.

Bibliographie

Anobile, G., Arrighi, R., & Burr, D. C. (2019). Simultaneous and sequential subitizing are separate systems, and neither predicts math abilities. *Journal of Experimental Child Psychology*, *178*, 86103. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2018.09.017

APA. (2013). Diagnostic and statistical manual of mental disorders: DSM-5™, 5th ed (p. xliv, 947). American Psychiatric Publishing, Inc. https://doi.org/10.1176/appi.books.9780890425596

Ashkenazi, S., Haber, H., Shemesh, V., & Silverman, S. (2022). Early Subitizing Development: The Role of Visuospatial Working Memory. *European Journal of Education and Pedagogy*, *3*(2), 79-85. https://doi.org/10.24018/ejedu.2022.3.2.274

Ashkenazi, S., & Henik, A. (2012). Does attentional training improve numerical processing in developmental dyscalculia? *Neuropsychology*, *26*(1), 45-56. https://doi.org/10.1037/a0026209

Ashkenazi, S., Mark-Zigdon, N., & Henik, A. (2013). Do subitizing deficits in developmental dyscalculia involve pattern recognition weakness? *Developmental Science*, *16*(1), 3546. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2012.01190.x

Aster, M. G. V., & Shalev, R. S. (2007). Number development and developmental dyscalculia. *Developmental Medicine & Child Neurology*, *49*(11), 868873. https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2007.00868.x

Barbaresi, W.J., Katusic, S. K., Colligan, R. C., Weaver, A. L., & Jacobsen, S. J. (2005). Math Learning Disorder: Incidence in a Population-Based Birth Cohort, 1976–82, Rochester, Minn. *Ambulatory Pediatrics: the Official Journal of the Ambulatory Pediatric Association*, *5*(5), 281–289. https://doi.org/10.1367/A04-209R.1

Baudonck, M., Debusschere, A., Dewulf, B., Samyn, F., Vercaemst, V., & Desoete, A. (2006). *De Kortrijkse Rekentest Revision KRT-R [Kortrijk Arithmetics Test Revision]*. Kortrijk: CAR Overleie.

Benoit, L., Lehalle, H., & Jouen, F. (2004). Do young children acquire number words through subitizing or counting? *Cognitive Development*, *19*(3), 291–307. https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2004.03.005

Ben-Simon, A., Beyth-Marom, R., Inbar-Weiss, N. & Cohen, Y. (2012). *Regulating the Diagnosis of Learning Disability and the Provision of Test Accommodations in Institutions of Higher Education* (383). NITE Research Report.

Biancardi A., Bachmann C., & Nicoletti C. (2016). *BDE 2. Batteria per la Discalculia Evolutiva [Battery for the assessment of Developmental Dyscalculia]*. Trento, Italy: Erickson.

Bradley, L., & Bryant, P. E. (1978). Difficulties in auditory organisation as a possible cause of reading backwardness. *Nature, 271*, 746–747. https://doi.org/10.1038/271746a0

Ceulemans, A., Titeca, D., Loeys, T., Hoppenbrouwers, K., Rousseau, S., & Desoete, A. (2014). Enumeration of small and large numerosities in adolescents with mathematical learning disorders. *Research in Developmental Disabilities, 35*(1), 27-35. https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.10.018

Clements, D. H. (1999). Subitizing: What Is It? Why Teach It?, *Teaching Children Mathematics, 5*(7), 400-405. https://doi.org/10.5951/TCM.5.7.0400

Cogni-sciences (2010). *BALE : Batterie Analytique du Langage Ecrit*. Grenoble.

Cohen, Z. Z., Gliksman, Y., & Henik, A. (2019). Modal-independent Pattern Recognition Deficit in Developmental Dyscalculia Adults: Evidence from Tactile and Visual

Enumeration. *Neuroscience*, *423*, 109-121. https://doi.org/10.1016/j.neuroscience.2019.10.023

Cornoldi C., Lucangeli D., & Bellina M. (2002). *AC-MT: test di valutazione delle abilità di calcolo-gruppo MT*. Trento: Centro Studi Erickson.

Davidse, N. J., de Jong, M. T., Shaul, S., & Bus, A. G. (2014). A twin-case study of developmental number sense impairment. *Cognitive Neuropsychology, 31*(3), 221-236. https://doi.org/10.1080/02643294.2013.876980

Decarli, G., Paris, E., Tencati, C., Nardelli, C., Vescovi, M., Surian, L., & Piazza, M. (2020). Impaired large numerosity estimation and intact subitizing in developmental dyscalculia. *PLOS ONE*, *15*. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0244578

Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, *44*(1), 142. https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90049-N

Dehaene, S. (2001). Précis of The Number Sense. *Mind & Language*, *16*, 1636. https://doi.org/10.1111/1468-0017.00154

Dehaene, S., & Changeux, J.-P. (1993). Development of Elementary Numerical Abilities : A Neuronal Model. *Journal of cognitive neuroscience, 5*, 390407. https://doi.org/10.1162/jocn.1993.5.4.390

Dehaene, S., & Cohen, L. (1998). Chapter 22—Levels of Representation in Number Processing. In B. Stemmer et H. A. Whitaker (Eds), *Handbook of Neurolinguistics* (p. 331341). Academic Press. https://doi.org/10.1016/B978-012666055-5/50026-5

Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three Parietal Circuits for Number Processing. *Cognitive Neuropsychology, 20,* 487506. https://doi.org/10.1080/02643290244000239

Dellatolas, G. et Von Aster, V. (2006). *Zareki-R, Batterie pour l'évaluation du traitement des nombres et du calcul chez l'enfant.* Paris : ECPA.

Desoete, A., & Grégoire, J. (2006). Numerical competence in young children and in children with mathematics learning disabilities. *Learning and Individual Differences, 16*(4), 351–367. https://doi.org/10.1016/j.lindif.2006.12.006

Devine, A., Soltész, F., Nobes, A., Goswami, U., & Szűcs, D. (2013). Gender differences in developmental dyscalculia depend on diagnostic criteria. *Learning and Instruction, 27*, 31–39. https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2013.02.004

De Vos, T. (1992). *Tempo-Test-Rekenen [Number Facts Retrieval Test]*. Nijmegen: Berkhout.

Drew, T., & Vogel, E. (2008). Neural Measures of Individual Differences in Selecting and Tracking Multiple Moving Objects. *The Journal of neuroscience : the official journal of the Society for Neuroscience, 28*, 41834191. https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0556-08.2008

Espy, K. A., McDiarmid, M. M., Cwik, M. F., Stalets, M. M., Hamby, A., & Senn, T. E. (2004). The Contribution of Executive Functions to Emergent Mathematic Skills in Preschool children. *Developmental Neuropsychology, 26*(1), 465–486. https://doi.org/10.1207/s15326942dn2601_6

Estévez-Pérez, N., Castro-Cañizares, D., Martínez-Montes, E., & Reigosa-Crespo, V. (2019). Numerical processing profiles in children with varying degrees of arithmetical achievement. Acta Psychologica, 198. https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2019.05.001

Fayol, M., Perros, H. & Seron, X. (2004). Les représentations numériques : caractéristiques, troubles, développement. In M-N. Metz-Lutz, E. Demont, C. Seegmuller, M. de Agostini et N. Bruneau (Eds.), *Développement cognitif et troubles des apprentissages.* Marseille : Solal.

Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, *8*(7), 307314. https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.05.002

Furman, T., & Rubinsten, O. (2012). Symbolic and non symbolic numerical representation in adults with and without developmental dyscalculia. *Behavioral and Brain Functions, 8*(55). https://doi.org/10.1186/1744-9081-8-55

Gallistel, C. R., & Gelman, R. (1992). Preverbal and verbal counting and computation. *Cognition, 44*(1-2), 43–74. https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90050-R

Gliksman, Y., & Henik, A. (2019). Enumeration and Alertness in Developmental Dyscalculia. *Journal of Cognition*, *2*. https://doi.org/10.5334/joc.55

Gray, S. A., & Reeve, R. A. (2014). Preschoolers' Dot Enumeration Abilities Are Markers of Their Arithmetic Competence. *PLoS ONE*, *9*(4). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0094428

Gross-Tsur, V., Manor, O., & Shalev, R. S. (1996). Developmental Dyscalculia : Prevalence and Demographic Features. *Developmental Medicine and Child Neurology, 38*(1), 25–33. https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.1996.tb15029.x

Haffner, J., Baro, K., Parzer, P., & Resch, F. (2005). *Heidelberger Rechentest (HRT 1-4)*. Göttingen: Hogrefe.

Heremans, M. (2011). *MathEval*. Repéré à https://sites.google.com/site/testmatheval/

Hyde, D. C., & Spelke, E. S. (2011). Neural signatures of number processing in human infants : Evidence for two core systems underlying numerical cognition. *Developmental science*, *14*(2), 360371. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.00987.x

Izard, V., Dehaene-Lambertz, G., & Dehaene, S. (2008). Distinct cerebral pathways for object identity and number in human infants. *PLoS Biology*, *6*(2). https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060011

Katzin, N., Cohen, Z. Z., & Henik, A. (2019). If it looks, sounds, or feels like subitizing, is it subitizing? A modulated definition of subitizing. *Psychonomic Bulletin & Review*, *26*(3), 790797. https://doi.org/10.3758/s13423-018-1556-0

Kaufman, E. L., Lord, M. W., Reese, T. W., & Volkmann, J. (1949). The discrimination of visual number. *The American Journal of Psychology*, *62*, 498525. https://doi.org/10.2307/1418556

Kaufmann, L., Aster, M., Göbel, S., Marksteiner, J., & Klein, E. (2020). Developmental dyscalculia in adults. *Lernen und Lernstörungen*, *9*, 112. https://doi.org/10.1024/2235-0977/a000294

Kaufmann, L., Kucian, K., & Aster, M. (2014). Development of the Numerical Brain. *The Oxford Handbook of Numerical Cognition*, 485-501. https://doi.org/10.1093/oxfordhb/9780199642342.013.008

Khomsi, A. (2001). *Evaluation du Langage Oral.* Paris : ECPA.

Lafay, A., & Cattini, J. (2018). Analyse psychométrique des outils d'évaluation mathématique utilisés auprès des enfants francophones. *Canadian Journal of Speech-Language Pathology and Audiology*, *42*, 127144. https://www.researchgate.net/publication/338717654_Grille_d'analyse_des_caracteristiques_psychometriques_des_outils_normes

Lafay, A., & Helloin, M.-C. (2016). *Examath 8-15 : Batterie informatisée d'examen des habiletés mathématiques*. Happy Neuron.

Lafay, A., St-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (2013). Développement des systèmes numériques non symboliques et prédicteurs de réussite mathématique. *Glossa*, *112*, 117.

Lafay, A., St-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (2017). Déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie dévelopementale. *Rééducation orthophonique*, *269*, 7996.

Landerl, K. (2013). Development of numerical processing in children with typical and dyscalculic arithmetic skills—a longitudinal study. *Frontiers in Psychology, 4*(459). https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00459

Libertus, M. E. (2015). The role of intuitive approximation skills for school math abilities. *Mind, Brain, and Education*, *9*(2), 112120. https://doi.org/10.1111/mbe.12072

Mandler, G., & Shebo, B. J. (1982). Subitizing: An analysis of its component processes. *Journal of Experimental Psychology: General, 111*(1), 1–22. https://doi.org/10.1037/0096-3445.111.1.1

McCloskey, M. (1992). Cognitive mechanisms in numerical processing : Evidence from acquired dyscalculia. *Cognition*, *44*(12), 107157. https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90052-J

McCloskey, M., Caramazza, A., & Basili, A. (1985). Cognitive mechanisms in number processing and calculation : Evidence from dyscalculia. *Brain and Cognition*, *4*(2), 171196. https://doi.org/10.1016/0278-2626(85)90069-7

Mejias, S., Mussolin, C., Rousselle, L., Grégoire, J., & Noël, M.-P. (2012). Numerical and nonnumerical estimation in children with and without mathematical learning disabilities. *Child Neuropsychology, 18*(6), 550-575. https://doi.org/10.1080/09297049.2011.625355

Melcher, D., & Piazza, M. (2011). The role of attentional priority and saliency in determining capacity limits in enumeration and visual working memory. *PloS One*, *6*(12). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0029296

Moeller, K., Neuburger, S., Kaufmann, L., Landerl, K., & Nuerk, H.-C. (2009). Basic number processing deficits in developmental dyscalculia : Evidence from eye tracking. *Cognitive Development*, *24*(4), 371386. https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2009.09.007

Noël, M.-P., & Rousselle, L. (2011). Developmental Changes in the Profiles of Dyscalculia: An Explanation Based on a Double Exact-and-Approximate Number Representation Model. *Frontiers in Human Neuroscience*, *5*(165), 1-4. https://doi.org/10.3389/fnhum.2011.00165

Noël, M.-P., Rousselle, L., & Visscher, A. D. (2013). La dyscalculie développementale : À la croisée de facteurs numériques spécifiques et de facteurs cognitifs généraux. *Developpements*, *15*(2), 2431. https://doi.org/10.3917/devel.015.0024

Olsson, L., Östergren, R., & Träff, U. (2016). Developmental dyscalculia : A deficit in the approximate number system or an access deficit? *Cognitive Development*, *39*, 154167. https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2016.04.006

Piazza, M., Fumarola, A., Chinello, A., & Melcher, D. (2011). Subitizing reflects visuo-spatial object individuation capacity. *Cognition*, *121*(1), 147153. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2011.05.007

Raddatz J., Kuhn J. T., Holling H., Moll K., & Dobel C. (2017). Comorbidity of arithmetic and reading disorder: Basic number processing and calculation in children with learning impairments. *Journal of Learning Disabilities, 50*(3), 298–308. https://doi.org/10.1177/0022219415620899

Railo, H., Koivisto, M., Revonsuo, A., & Hannula, M. M. (2008). The role of attention in subitizing. *Cognition*, *107*(1), 82104. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2007.08.004

Rasmussen C., & Bisanz, J. (2005). Representation and working memory in early arithmetic. *Journal of Expirmental Child Psychology*, *91*(2), 137-157. https://doi:10.1016/j.jecp.2005.01.004

Reigosa-Crespo, V., Valdés-Sosa, M., Butterworth, B., Estévez, N., Rodríguez, M., Santos, E., Torres, P., Suarez, R. & Lage, A. (2012). Basic numerical capacities and prevalence of developmental dyscalculia: The Havana Survey. *Developmental Psychology, 48*(1), 123. https://doi.org/10.1037/a0025356.

Revkin, S. K., Piazza, M., Izard, V., Cohen, L., & Dehaene, S. (2008). Does Subitizing Reflect Numerical Estimation? *Psychological Science, 19*(6), 607614. https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.2008.02130.x

Rotzer, S., Kucian, K., Martin, E., Aster, M. von, Klaver, P., & Loenneker, T. (2008). Optimized voxel-based morphometry in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage*, *39*(1), 417-422. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.08.045

Schleifer, P., & Landerl, K. (2011). Subitizing and counting in typical and atypical development. *Developmental Science*, *14*(2), 280291. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.00976.x

Schindler, M., Schovenberg, V., & Schabmann, A. (2020). Enumeration Processes of Children With Mathematical Difficulties: An Explorative Eye-Tracking Study on Subitizing, Groupitizing, Counting, and Pattern Recognition. *Learning Disabilities : A Contemporary Journal, 18*(2), 193–211.

Shalev, R. S., & Gross-Tsur, V. (2001). Developmental Dyscalculia. *Pediatric Neurology*, *24*(5), 337-342. https://doi.org/10.1016/s0887-8994(00)00258-7

Siegler, R., & Booth, J. (2005). Development of Numerical Estimation : A Review. In J. I. D. Campbell (Ed.), *Handbook of mathematical cognition* (pp. 197–212). Psychology Press.

Sophian, C., & Crosby, M. E. (2008). What Eye Fixation Patterns Tell Us About Subitizing. *Developmental Neuropsychology*, *33*(3), 394409. https://doi.org/10.1080/87565640801982460

Starkey, P., & Cooper, R. G. (1995). The development of subitizing in young children. *British Journal of Developmental Psychology*, *13*(4), 399–420. https://doi.org/10.1111/j.2044-835X.1995.tb00688.x

Todd, J. J., & Marois, R. (2004). Capacity limit of visual short-term memory in human posterior parietal cortex. *Nature, 428*, 751-754. https://doi.org/10.1038/nature02466

Torbeyns, J., Verschaffel, L., & Ghesquière, P. (2004). Strategic aspects of simple addition and subtraction: the influence of mathematical ability. *Learning and Instruction, 14*(2), 177–195. https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2004.01.003

Trick, L. M. (1992). Chapter 7 A Theory Of Enumeration That Grows Out Of A General Theory Of Vision : Subitizing, Counting, And Finsts. In J. I. D. Campbell (Éd.), *Advances in Psychology*, *91*, 257299. https://doi.org/10.1016/S0166-4115(08)60889-4

Trick, L., & Pylyshyn, Z. (1994). Why are small and large numbers enumerated differently? A limited-capacity preattentive stage in vision. *Psychological review*, *101*, 80102. https://doi.org/10.1037/0033-295X.101.1.80

Van Nieuwenhoven, C., Grégoire, J., & Noël, M. P. (2001). *Le TEDI-MATH. Test diagnostique des compétences de base en mathématiques.* Paris : ECPA.

Von Aster, M. (2000). Developmental cognitive neuropsychology of number processing and calculation : Varieties of developmental dyscalculia. *European Child & Adolescent Psychiatry*, *9*(2), 4157. https://doi.org/10.1007/s007870070008

Von Aster, M., & Shalev, R. (2007). Number development and developmental dyscalculia. *Developmental Medicine and Child Neurology, 49*(11), 868-873. https://doi.org/10.1111/j.1469-8749.2007.00868.x

Vuokko, E., Niemivirta, M., & Helenius, P. (2013). Cortical activation patterns during subitizing and counting. *Brain Research*, *1497*, 4052. https://doi.org/10.1016/j.brainres.2012.12.019

Wender, K. F., & Rothkegel, R. (2000). Subitizing and its subprocesses. *Psychological Research*, *64*(2), 8192. https://doi.org/10.1007/s004260000021

Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature, 358*, 749–750. https://doi.org/10.1038/358749a0

Liste des annexes