

MÉMOIRE

En vue de l'obtention du
Certificat de Capacité d'Orthophoniste
présenté par

Erell COUSIN

soutenu publiquement en juin 2021

**Proposition d'évaluation de la comparaison
symbolique dans un projet de création de bilan
orthophonique de la cognition mathématique
Création de l'épreuve de comparaison de nombres arabes**

MÉMOIRE dirigé par

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

Sophie FRAGNON, Orthophoniste, Wingles

Remerciements

Tout d'abord, je voudrais remercier Madame Mejias et Madame Fragnon, mes directrices de mémoire, pour leur grande disponibilité, leur réactivité et leurs précieux conseils tout au long de cette dernière année universitaire.

Je souhaitais également remercier mes maîtres de stages cliniques de troisième, de quatrième et de cinquième années d'orthophonie qui m'ont accueillie et aux côtés desquelles j'ai beaucoup appris sur le métier d'orthophoniste.

Merci également au département d'orthophonie de Lille pour son enseignement théorique et clinique de qualité dispensé ces cinq dernières années.

Enfin, je remercie ma famille et mes amis pour leur indispensable présence, leur soutien et leurs encouragements tout au long de ces cinq années d'études universitaires.

Résumé :

La prise en charge des troubles de la cognition mathématique fait partie du champ de compétences de l'orthophoniste. Avant d'entreprendre cette rééducation, une évaluation des capacités en mathématiques est nécessaire. Pour ce faire, plusieurs outils sont déjà disponibles. Le présent mémoire s'ancre dans le projet de création d'une nouvelle batterie d'évaluation de la cognition mathématique. Après avoir procédé à l'analyse critique des épreuves de protocoles évaluant la comparaison symbolique qui existent, nous proposerons notre nouvelle épreuve qui contient plusieurs grandes catégories de paires de nombres arabes à comparer. Les résultats des performances d'un sujet à cette épreuve donneront la possibilité à l'orthophoniste d'analyser le fonctionnement et la maîtrise des représentations numériques du sujet. Dans les années à venir, une série de mémoires universitaires permettra de procéder à la normalisation et à la validation de l'épreuve, afin d'obtenir des scores seuils pathologiques. Une fois ces étapes réalisées, l'épreuve de comparaison de nombres arabes pourra être utilisée par les orthophonistes pour procéder à l'évaluation et à l'éventuel diagnostic des troubles de la cognition mathématique.

Mots-clés :

Cognition mathématique – Évaluation – Comparaison symbolique

Abstract :

The management of mathematical cognition disorders enters the field of competence of the speech therapist. Before undertaking any re-education, it is necessary to assess the patient's abilities in mathematical cognition. To do this, several tools are already available, but this dissertation is based on the project to create a new battery of assessment of mathematical cognition. After carrying out a critical analysis of the protocol tests serving to assess symbolic comparison which are already used, we will propose our new test which contains several broad categories of pairs of Arabic numbers to compare. The results of a patient's performance in this test will allow the speech therapist to analyze the functioning and mastery of this person's digital representations. In the years to come, a series of academic dissertations will allow the standardization and validation of this new test, in order to obtain pathological cut-off scores. Once these steps are completed, this Arabic number comparison test can be used by speech therapists so as to assess, and possibly diagnose, disorders with mathematical cognition.

Keywords :

Mathematical cognition - Assessment – Symbolic comparison

Table des matières

Introduction	1
Contexte théorique, buts et hypothèses	2
.1. De la théorie piagétienne à la psychologie cognitive	2
.1.1. Remise en question du développement par stades.....	2
.1.2. Autres modèles	3
.2. Modèle du triple code de Dehaene	4
.2.1. Code analogique	5
.2.1.1. Ligne numérique mentale	5
.2.1.2. Effet de distance	6
.2.1.3. Effet de taille	6
.2.2. Code verbal.....	6
.2.3. Code indo-arabe.....	7
.3. Traitement de la numérosité	7
.3.1. Traitement numérique exact	8
.3.2. Traitement numérique approximatif	8
.3.2.1. Définition.....	8
.3.2.2. Système numérique approximatif dans les premières années de vie.....	8
.4. Focus sur la comparaison numérique	9
.4.1. Différentes sortes de comparaisons numériques	9
4.1.1. Selon le symbolisme de la collection	9
4.1.2. Selon le nombre de chiffres	10
4.1.3. Intérêt des épreuves de comparaisons numériques.....	11
Méthode.....	12
1. Contexte de ce mémoire	12
2. Protocoles évaluant les habiletés mathématiques.....	12
3. Épreuves évaluant la comparaison numérique symbolique.....	13
4. Épreuve de comparaison de nombres arabes	16
4.1. Déroulement de la passation.....	16
4.2. Matériel.....	16
4.2.1. Items	16
4.2.2. Modalité de réponse.....	16
4.3. Cotation	17
4.4. Analyse des résultats.....	17
4.4.1. Scores	17
4.4.2. Temps.....	18
Résultats	18

Discussion.....	22
1. Rappels des résultats.....	22
2. Recherches suivantes.....	23
3. Limites et points forts de l'épreuve	24
3.1. Limites	24
3.2. Points forts.....	25
4. Apport pour la pratique orthophonique	26
Conclusion.....	26
Bibliographie	28

Introduction

Avant l'entrée en école élémentaire, les enfants développent une compréhension intuitive des nombres et du sens des opérations grâce aux interactions avec le monde qui les entoure. En effet, les capacités numériques précoces se développent dès les premières semaines de vie (Izard, Sann, Spelke & Streri, 2009). Les très jeunes enfants sont capables de discriminer deux quantités, d'associer des numerosités ayant des modalités différentes (e.g. auditive et visuelle) et sont également sensibles à l'ajout ou au retrait d'éléments dans une quantité initiale (Lépine, Roussel & Fayol, 2003). Ces capacités s'affinent et s'améliorent au cours du développement grâce aux apprentissages symboliques (Von Aster & Shalev, 2007). Pourtant, certains enfants n'arrivent pas à aboutir à un sens du nombre suffisamment efficient, ainsi, ces derniers peuvent rencontrer des difficultés dans les apprentissages mathématiques. Pour ce type de difficultés, ils peuvent bénéficier d'un bilan orthophonique, à la suite duquel une prise en charge peut être proposée si nécessaire.

L'évaluation et la prise en charge des difficultés d'apprentissage en mathématiques est un des nombreux champs de compétences de l'orthophoniste. En avril 2018, la nomenclature des actes orthophoniques pour ce type d'acte a évolué. Elle est passée de « *bilan de la dyscalculie et des troubles du raisonnement logico-mathématique* » à « *bilan de la cognition mathématique (trouble du calcul et troubles du raisonnement logico-mathématique)* » (Nomenclature Générale des Actes en Orthophonie, 2018). Cela ouvre une nouvelle perspective ; en parlant de « cognition mathématique », on intègre des notions qui n'entraient pas dans l'ancienne nomenclature. En effet, cette nouvelle nomenclature, basée sur la neuropsychologie clinique, prend principalement comme référence le modèle du triple code de Dehaene (Dehaene, 1992) que nous expliciterons plus tard. La littérature évoluant, il est important que les outils d'évaluation soient réactualisés en lien avec les modèles théoriques actuels, c'est pourquoi l'objet de ce mémoire est la création d'une batterie d'évaluation de la cognition mathématique essentiellement basée sur le modèle du triple code de Dehaene (Dehaene, 1992).

Cette batterie d'évaluation, qui sera le fruit d'un raisonnement cognitiviste, se voudra la plus exhaustive possible en matière d'épreuves d'évaluation et s'appliquera à une large tranche d'âge. Cela permettra, entre autres, à l'orthophoniste d'évaluer la maîtrise des différents codes et des compétences mathématiques pour aboutir à une représentation précise des difficultés du patient et pour pouvoir ajuster au mieux la future prise en charge. Dans ce mémoire, nous nous intéresserons plus particulièrement à l'analyse et à la proposition de création d'épreuve de comparaison évaluant le système numérique approximatif.

Nous allons, dans un premier temps, exposer le contexte théorique dans lequel s'inscrit ce mémoire, puis, nous détaillerons les différentes étapes qui nous ont permis de construire l'épreuve de comparaison numérique. Nous décrirons ensuite le déroulement et le contenu de cette épreuve. Enfin, nous discuterons les points forts et les points faibles de cette proposition d'épreuve tout en tissant des liens étroits avec la pratique et l'évaluation orthophonique de la cognition mathématique.

Contexte théorique, buts et hypothèses

Dans les parties qui suivent, il s'agira d'exposer le contexte théorique en s'appuyant sur la littérature actuelle. Pour ce faire, il est nécessaire d'explicitier les origines, la genèse et les fondements de la cognition mathématique. Ensuite, nous nous intéresserons aux différentes manières de traiter le nombre et plus particulièrement au traitement numérique approximatif.

.1. De la théorie piagétienne à la psychologie cognitive

Bien que remis en question aujourd'hui, les nombreux travaux de Piaget considérant la logique comme pré-requis aux compétences mathématiques ont servi de point de départ afin d'appréhender et de construire progressivement le concept de la cognition mathématique comme nous le connaissons actuellement.

.1.1. Remise en question du développement par stades

Selon la théorie constructiviste de Piaget, l'enfant se développe par stades et la logique est un pré-requis aux capacités mathématiques. Il stipule que la construction du nombre est possible si l'enfant a acquis les principes de conservation (comparer deux collections composées du même nombre d'éléments mais disposés différemment), de sériation (ordonner une série d'éléments selon leurs différences) et d'inclusion en classes (admettre des ensembles et des sous-ensembles). Par conséquent, cette pensée logico-mathématique indique une incapacité des très jeunes enfants à comprendre l'arithmétique et semble révéler que le concept du nombre n'est pas compris avant l'âge de quatre ans (Piaget & Szeminska, 1941).

Cette théorie a été réfutée quand les chercheurs ont découvert que les bébés possédaient des connaissances physiques, mathématiques, prélogiques et logiques sur le monde.

Par exemple, la permanence de l'objet est présente dès cinq mois de vie (Baillargeon et al. 1985). Les auteurs le vérifient en testant si l'enfant a compris que les objets continuent d'exister même s'ils ne sont plus visibles. Grâce à l'apparition de nouvelles technologies, il a été possible de tester la permanence de l'objet chez le jeune enfant en utilisant la vidéo et la chronométrie, afin de mesurer le temps de fixation du regard de ce dernier. Il s'agit du paradigme d'habituation. En effet, quand on présente plusieurs fois au sujet une même situation, son temps de fixation diminue, cela signifie qu'il s'y est habitué. Puis, quand on lui présente une situation différente, voire impossible et qu'il fixe plus longtemps cette nouvelle situation, cela semble montrer qu'il a perçu la différence par rapport à la situation précédente. Dans l'expérience de Baillargeon (1985), l'enfant a été habitué à la présence d'un objet, qui, soudainement, disparaît. L'enfant détecte alors qu'il s'agit d'une situation impossible et cela est révélé par son temps de fixation qui s'est allongé.

Wynn, en 1992, a voulu mettre en lumière les capacités numériques précoces chez le bébé. Le but de son expérience consistait à démontrer que les bébés de quatre mois et demi

étaient capables de détecter une erreur dans une addition simple (ce type d'expérience étant réalisable uniquement si l'enfant a acquis la permanence de l'objet). L'expérience consistait à cacher un objet derrière un écran puis à introduire un deuxième objet identique au premier. Ensuite, l'écran se baissait et faisait d'abord apparaître les deux objets, puis un seul, autrement dit : soit la bonne solution, soit la solution erronée. Le jeune enfant regardait plus longtemps la deuxième situation, c'est-à-dire, l'événement impossible. Les très jeunes enfants sont donc déjà doués de capacités numériques à seulement quelques mois de vie, contrairement à ce qu'affirmait la théorie constructiviste.

La théorie piagétienne a également été remise en question dans les années 1980 suite aux recherches sur l'acalculie (Dehaene, 1992 ; Deloche & Seron, 1982 ; McCloskey et al., 1986) qui ont conduit à l'élaboration de nouveaux modèles théoriques. En effet, les études de cas neuropsychologiques ouvrent une perspective anatomo-fonctionnelle non exploitée précédemment par Piaget et ses collègues car ces derniers ne disposaient pas d'autant de moyens technologiques.

.1.2. Autres modèles

Au fil des années, d'autres modèles sont venus alimenter la littérature quant aux habiletés de traitement numérique et à la représentation du nombre.

Nous pouvons citer le modèle modulaire de McCloskey et al. (1985) qui a été pendant longtemps le modèle de référence dans le domaine de la cognition numérique (figure 1). Ce dernier permet d'expliquer le fonctionnement cognitif normal du traitement des nombres et du calcul. Issu de la neuropsychologie adulte, ce modèle est composé de différents modules : le module de compréhension des nombres, le module de production des nombres, et enfin, le module de calcul. La composante sémantique est au cœur du modèle : toute opération sur un nombre nécessite de passer par ce système avant que ce nombre subisse une transformation.

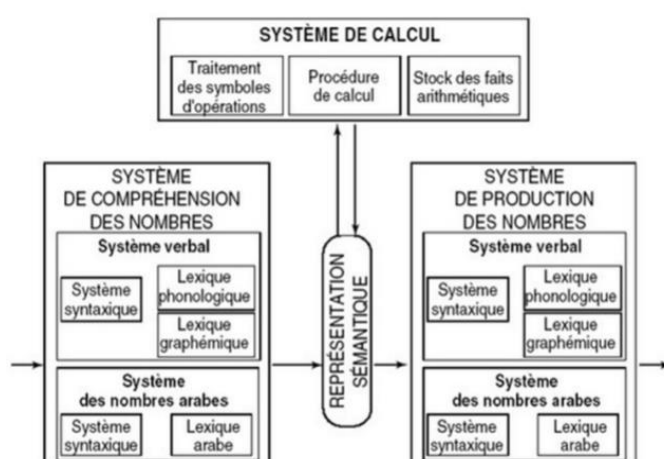


Figure 1 : Modèle modulaire de McCloskey, Caramazza et Basili (1985) adapté de McCloskey, Caramazza et Basili (1985).

Un peu plus récemment, le modèle développemental de Von Aster et Shalev (2007) a été proposé (figure 2). Ce modèle met en lumière quatre grandes étapes importantes dans le développement du traitement numérique, en précisant les liens entre les habiletés en émergence et les structures anatomiques cérébrales impliquées dans des tâches précises.

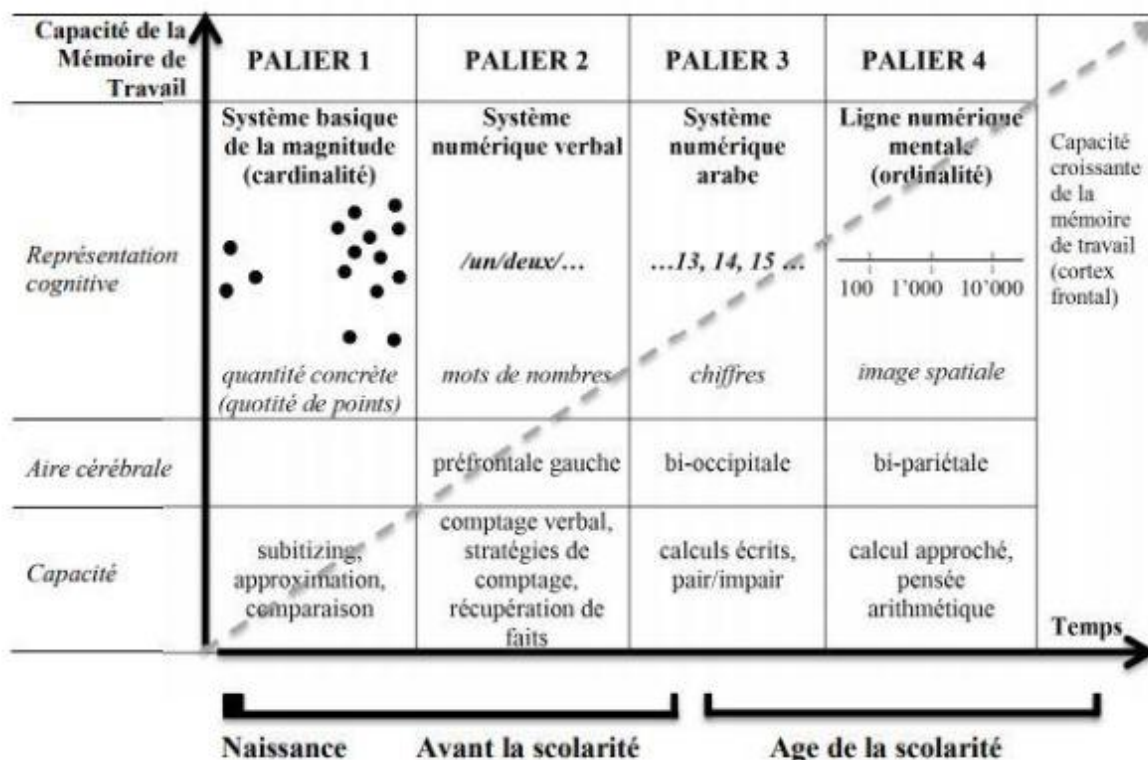


Figure 2 : Modèle développemental de Von Aster et Shalev (2007), adapté de VonAster et Shalev (2007).

Toutefois, le modèle du triple code de Dehaene (Dehaene, 1992), qui sera présenté ci-dessous, reste le plus influent dans le domaine de la cognition mathématique (Fias & Pesenti 2004).

.2. Modèle du triple code de Dehaene

Les études des années 1980 citées précédemment sont à l'origine du modèle théorique du triple code de Dehaene (Dehaene, 1992). Un des principes fondateurs de ce modèle est que l'homme dispose d'une faculté innée pour appréhender la quantité, aussi appelée la magnitude. En effet, pour Dehaene, le passage par la représentation sémantique que modélise McCloskey dans son modèle n'est pas nécessaire (Dehaene, 1992). Le modèle de Dehaene (1992) est un modèle anatomique et fonctionnel qui distingue trois grands systèmes de représentation mentale des nombres, aussi appelés « codes ». Un code est une organisation logique invariante qui respecte les contraintes d'ordre et de classe. Chacun de ces systèmes correspond à une localisation neuronale différente pouvant conduire à des atteintes spécifiques (Dehaene, 2010). Le modèle du triple code de Dehaene (1992) est composé du code analogique des quantités, du code verbal et du code arabe (figure 3). Nous détaillerons ces trois codes ci-dessous.

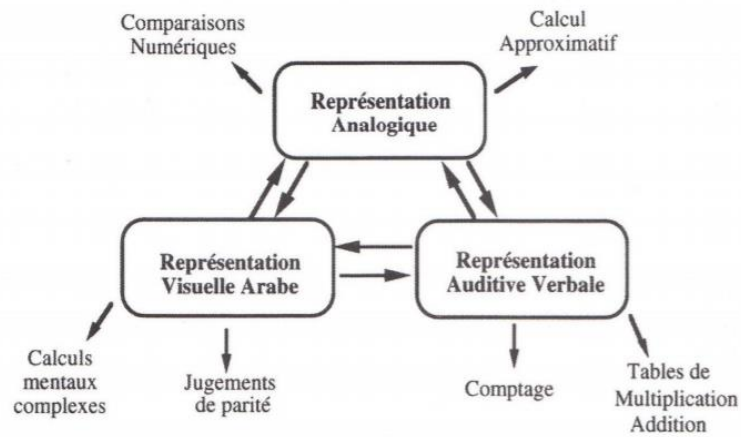


Figure 3 : Modèle du triple code de Dehaene (1992), adapté de Dehaene (1992).

.2.1. Code analogique

Le code analogique permet une représentation abstraite des quantités. Ce système nous permet, par exemple, de traiter la numérosité d'une collection de points disposés aléatoirement (i.e. tels que disposés dans les tâches proposées au sein de la Panamath d'Halberda et al. en 2008), ou canoniquement (i.e. tels que présentés sur des dés). Il s'agit d'un code universel. En effet, il existe chez les humains de tout âge, mais également chez les animaux. Autrement dit, nous partageons tous cette représentation du nombre (Dehaene, 1992). Ce code permet de réaliser des comparaisons et des estimations. Au niveau anatomique, cette représentation des quantités est traitée dans les deux hémisphères du cortex pariétal et plus particulièrement dans le sillon intrapariétal (Dehaene & Cohen, 1995).

Le code analogique est une représentation non-symbolique du nombre car les représentations analogiques de quantités partagent des propriétés avec ce qu'elles représentent. Les représentations sont abstraites, conventionnelles et nécessitent une abstraction (Dehaene, 1992). Les variations de numérosité affectent directement l'objet et cela permet au sujet de se rendre immédiatement compte des retraits ou des ajouts dans la collection. Selon les cultures, diverses stratégies sont utilisées pour matérialiser ces quantités : l'utilisation des doigts, la manipulation des bouliers et des abaques, ou encore, le recours aux différentes positions du corps.

Le code analogique est relié à une ligne numérique intériorisée qui nous permet de mentaliser la quantité et est soumis aux effets de taille et de distance que nous expliciterons plus loin.

.2.1.1. Ligne numérique mentale

L'humain se représente les chiffres sur une ligne mentale orientée de gauche à droite. Cette représentation interne n'est pas graduée de manière régulière. En effet, les petits nombres sont sur-représentés par rapport aux grands nombres. Par exemple, il y a autant d'espace attribué à l'intervalle allant de 1 à 2 qu'à l'intervalle allant de 2 à 4 ou de 4 à 8, etc. (Dehaene, 1992).

La ligne numérique mentale, étant graduée de manière irrégulière, suit donc une échelle logarithmique. En revanche, au cours du développement, les représentations de cette ligne numérique se précisent et deviennent de plus en plus linéaires (Siegler & Booth, 2004 ; Laski & Siegler, 2007).

Cette représentation mentale permettrait la réalisation d'estimations rapides et automatiques de quantités. Nous savons également que le placement des nombres sur une ligne numérique peut être un indicateur fiable des représentations mentales des quantités (Booth & Siegler, 2006).

.2.1.2. Effet de distance

Notre appréhension des quantités est soumise à l'effet de distance et ce phénomène est directement lié à la ligne numérique mentale. Cet effet révèle qu'il est plus facile de distinguer deux nombres éloignés que deux nombres proches. Autrement dit, il y a donc moins d'erreurs et le traitement se fait plus rapidement quand on compare quarante-cinq et soixante-cinq points que quand on compare quarante-cinq et quarante-sept points. Cet effet se retrouve dans les comparaisons symboliques et non-symboliques mais semble avoir plus d'influence dans les comparaisons non-symboliques (Verguts, Fias & Steven, 2005).

De plus, dans les grandes collections numériques, quand la numérosité de référence est multipliée par deux, la distance numérique que l'on parvient à distinguer avec précision double également. Par exemple, si un sujet est capable de distinguer, sans erreur, une collection de treize points d'un ensemble de référence de dix points (cela revient à avoir trois points de différence numérique entre les deux collections), lorsque l'ensemble de référence est doublé, il faudra également multiplier l'écart numérique par deux (donc présenter six points en plus) pour que ce même sujet parvienne à distinguer ces deux nouvelles collections sans erreur. Ce phénomène est appelé « loi scalaire » ou « loi de Weber » (Dehaene, Izard, Spelke & Picard, 2008) et sera explicité un peu plus loin dans ce mémoire.

.2.1.3. Effet de taille

L'effet de taille se caractérise par une comparaison plus aisée des éléments entre deux petites collections qu'entre deux grandes collections. Ainsi, il y a moins d'erreurs quand on compare de petites numérosités entre elles que lors de la comparaison entre deux grandes numérosités (Groen & Parkman, 1972 ; Siegler, 1988).

Le code analogique ainsi que les différents effets qui le régissent ayant été décrits, nous allons maintenant nous intéresser aux numérosités symboliques. Contrairement aux numérosités non-symboliques, les numérosités symboliques sont arbitraires et sans ressemblance avec ce qu'elles représentent. Cela concerne le code verbal et le code indo-arabe.

.2.2. Code verbal

Le code verbal fait référence aux formes auditives et verbales des nombres (e.g. [katʁ] ou [sɛ̃k]), à la compréhension et à l'écriture en lettres des noms de ces derniers (e.g. « quatre » ou « cinq »). Ce système comprend également la formulation et la mémorisation symbolique

verbale des quantités, le calcul mental des opérations simples, ainsi que le stockage mnésique des faits arithmétiques (e.g. les tables de multiplication). Son substrat anatomique se situe dans l'hémisphère dominant pour le langage (l'hémisphère gauche le plus souvent) (Dehaene & Cohen, 1995). Le code verbal est un code symbolique car il fait référence à une chaîne verbale non conventionnelle. Il consiste à attribuer un mot à une cardinalité. Cela nécessite l'apprentissage d'un lexique et d'une syntaxe combinatoire précis. En effet, en français, le choix et l'ordre des mots ont un effet sur la cardinalité qu'ils représentent. Ce code est difficile à acquérir en raison des nombreuses exceptions qu'il faut apprendre par cœur (e.g. « treize », « soixante-dix ») afin de pouvoir le maîtriser.

.2.3. Code indo-arabe

Enfin, le code indo-arabe comprend le système logographique visuo-spatial, ce dernier nous permet de lire et d'écrire des chiffres tels que « 7 » ou « 345 » et de résoudre des opérations complexes. Ce système est localisé dans les aires occipito-temporales des deux hémisphères (Dehaene & Cohen, 1995). Le code indo-arabe est un système décimal qui ne contient que dix éléments (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 et 9). Ce système s'utilise avec une notation positionnelle, c'est-à-dire que la valeur du chiffre change selon la position qu'il occupe dans le nombre (e.g. 12 vs 21). Ce code symbolique nécessite également un enseignement et il apparaît après la forme verbale dans le développement.

Chacun des différents systèmes du triple code décrit ci-dessus est relié aux deux autres de façon indépendante. Toutefois, chez les adultes compétents ces trois systèmes sont interconnectés et cela permet de réaliser des activités de transcoding numérique, autrement dit de passer d'un code à l'autre. Par exemple, ces adultes experts ne peuvent pas inhiber l'activation de la représentation analogique lorsqu'ils voient un nombre arabe (Dehaene, 1992 ; Dehaene & Cohen, 2007).

Pour arriver à une utilisation efficiente des différents codes expliqués ci-dessus, une automatisation et un transfert des procédures de codages sont requis. En outre, l'efficacité des codes dépend des liens entre les représentations externes perceptibles et les représentations internes stockées en mémoire.

Les différents systèmes de représentation des nombres ayant été détaillés, nous allons maintenant porter notre attention sur la manière dont les numérosités sont traitées par l'homme.

.3. Traitement de la numérosité

Les nombres sont omniprésents dans notre vie quotidienne et nous les traitons depuis le plus jeune âge sans même y prêter attention. Deux grands processus de traitement des nombres existent selon la taille de la collection à dénombrer. Il s'agit du traitement numérique exact et du traitement numérique approximatif. Cette partie consistera donc à définir ces deux processus, en prenant plus particulièrement en compte le traitement numérique approximatif, ce dernier faisant l'objet particulier de ce mémoire.

.3.1. Traitement numérique exact

Le traitement exact des nombres est réalisable grâce au système numérique exact qui permet d'appréhender précisément une numérosité. Pour déterminer une petite quantité, nous pouvons avoir recours au *subitizing* ou au comptage.

Le *subitizing* est un processus qui permet d'avoir accès immédiatement au nombre d'éléments d'une collection sans les compter un à un. Ce processus est efficace pour des collections comprenant entre un et trois éléments (Kaufman, Lord, Reese & Volkmann, 1949). En effet, il faut moins d'une demi-seconde au cerveau pour traiter la présence d'un, de deux ou de trois éléments. Au-delà de quatre éléments, le temps de traitement requis augmente, et c'est généralement à cette limite qu'apparaissent les premières erreurs de dénombrement (Mandler & Shebo, 1982).

Pour appréhender la numérosité de collections plus grandes, nous pouvons utiliser le comptage. Ce dernier processus nécessite l'utilisation du langage, l'apprentissage de la chaîne verbale et la mise en correspondance terme à terme de mots et d'entités dénombrées (Gelman & Gallistel, 1978).

.3.2. Traitement numérique approximatif

L'objet de cette partie sera le traitement numérique approximatif. Nous le définirons et détaillerons son développement, son fonctionnement et ses particularités.

.3.2.1. Définition

Le traitement numérique approximatif permet l'appréhension rapide de grandeurs dans un format analogique grâce au système numérique approximatif, ce dernier étant universel. En effet, on le retrouve chez les animaux et chez les humains quels que soient leur culture et leur âge (Dehaene, 1990).

Ce système numérique peut être évalué par le biais de deux grands processus de traitement : l'estimation et la comparaison. L'estimation est un processus de quantification permettant d'appréhender la numérosité de grandes collections rapidement et approximativement. L'être humain est doué de capacités d'estimation fiables qui ne demandent à être calibrées qu'un petit nombre de fois avant d'être efficaces (Izard & Dehaene, 2008). Par exemple, nous pouvons déterminer assez rapidement si une assemblée d'individus contient cinquante, cent ou cinq cents personnes. En revanche, notre estimation peut être biaisée en raison de l'agencement de la collection d'objets. Ainsi, nous avons tendance à surestimer le nombre quand les objets d'une collection sont disposés de manière régulière et à sous-estimer le nombre quand les objets sont disposés de manière aléatoire (Dehaene, 1990). La comparaison, quant à elle, est un processus de quantification permettant de discriminer de manière approximative une différence de numérosité entre plusieurs grandes collections. Nous détaillerons le processus de comparaison un peu plus loin au cours de cette partie théorique.

.3.2.2. Système numérique approximatif dans les premières années de vie

Le système numérique approximatif est inné chez l'être humain, donc ce dernier est déjà présent chez les très jeunes enfants. En effet, des habiletés préverbaux de traitement du nombre ont été démontrées chez les nourrissons qui peuvent différencier deux collections numériques selon un certain rapport entre les deux quantités. Cela a été mis en lumière dans les expériences grâce au paradigme d'habituation (Libertus & Brannon, 2010 ; Lipton & Spelke, 2004 ; Schlegel et al., 2014).

Les enfants de six mois peuvent différencier des collections présentées visuellement (Xu & Spelke, 2000) ou auditivement (Lipton & Spelke, 2003) quand elles ont un rapport de un sur deux, c'est-à-dire lorsqu'ils remarquent la différence entre huit *versus* seize éléments, mais pas entre huit *versus* douze éléments, car la différence d'éléments entre les deux collections n'est pas suffisante.

Ce rapport entre le nombre d'items de deux collections, aussi appelé la fraction de Weber (w), est le plus petit rapport entre deux numérosités qu'une personne peut percevoir comme étant différent. On sait que plus la différence entre deux collections est grande, plus la décision est rapide et facile à prendre. Cela est dû à un chevauchement interne plus faible entre les représentations des deux grandeurs (Halberda, Mazocco, & Feigenson, 2008). Ce phénomène suggère encore une fois l'existence d'une ligne numérique mentalisée.

La fraction de Weber (w) diminue au cours du développement, ce qui permet d'accéder à une discrimination de plus en plus fine et rapide. En effet, les enfants de neuf mois sont capables de comparer des collections correspondant à un rapport de un sur deux ($w = 1$), comme les enfants de six mois, mais ils parviennent également à comparer des collections ayant un rapport de deux sur trois ($w = 0.5$) (Lipton & Spelke, 2003 ; Wood & Spelke, 2005 ; Xu & Arriga, 2007).

Le traitement numérique approximatif, que nous partageons par ailleurs avec les animaux (Dehaene, 1990), est inné et ce dernier nous permet de réaliser des estimations et des comparaisons de quantités. Nous allons maintenant nous focaliser plus précisément sur les tâches de comparaisons numériques.

.4. Focus sur la comparaison numérique

Les tâches de comparaisons numériques sont des épreuves qui peuvent être influencées par de nombreux facteurs. Nous verrons qu'il existe différentes formes de comparaisons numériques, puis, nous évoquerons les intérêts de ces tâches dans l'évaluation de la cognition mathématique.

.4.1. Différentes sortes de comparaisons numériques

Plusieurs sortes de comparaisons numériques sont décrites dans la littérature mais ces différentes tâches ne sollicitent pas toujours les mêmes processus cognitifs.

.4.1.1. Selon le symbolisme de la collection

Nous pouvons réaliser des comparaisons numériques de stimuli symboliques (e.g. des chiffres arabes) ou de collections de stimuli non-symboliques (e.g. des patterns de points). Ces deux types de comparaisons ne conduisent pas aux mêmes représentations numériques mentales.

D'après Roggeman et al., (2007), lorsqu'on présente à une personne une quantité symbolique (e.g. « 7 »), cela activerait la représentation de la position qui correspond à cette quantité sur la ligne numérique mentale, mais aussi celles des positions voisines, qu'elles soient inférieures ou supérieures (donc 5, 6, 8 et 9), comme l'illustre la figure 4. Cette activation reflète à nouveau l'effet de distance qui rend difficile le fait de distinguer un nombre de ses voisins. En d'autres termes, plus deux nombres sont éloignés, plus il sera aisé de déterminer lequel est le plus grand (Roggeman, Verguts & Fias, 2007 ; Reynvoet, De Smedt & Van den Bussche, 2009).

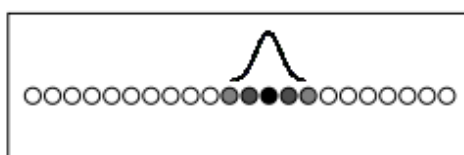


Figure 4 : « place coding », issu de Roggeman, Verguts & Fias (2007).

En revanche, quand on présente à un sujet une quantité non-symbolique (e.g. dix-huit points), le sujet activerait toutes les représentations des quantités inférieures ou égales à cette quantité à la manière d'un accumulateur (Zorzi & Butterworth, 1999 ; Zorzi, Stoianov, & Umiltà, 2005), comme l'illustre la figure 5. Ce deuxième type de traitement est soumis à l'effet de distance car il est difficile de différencier une collection de dix-huit points d'une collection de dix-neuf points. De plus, l'effet de taille est également présent car, pour un intervalle donné entre deux quantités de nombres, une paire de grands nombres a plus d'unités en commun qu'une paire de petits nombres ; c'est d'ailleurs la raison pour laquelle il est plus facile de comparer deux petits nombres entre eux que deux grands nombres entre eux.

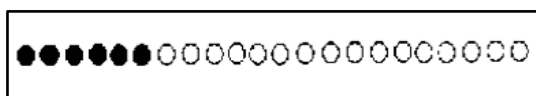


Figure 5 : « summation coding » issu de Roggeman, Verguts & Fias (2007).

Nous notons cependant que les effets de taille et de distance sont moins prononcés quand il s'agit de traiter une quantité symbolique que pour le traitement d'une quantité non-symbolique, car les codes inventés par l'homme permettent d'accéder à une représentation du nombre très précise (Buckley & Gillman, 1974).

.4.1.2. Selon le nombre de chiffres

Les comparaisons symboliques de nombres arabes peuvent être différentes selon qu'il s'agit d'un nombre à un chiffre ou d'un nombre à deux chiffres. En ce qui concerne le traitement des nombres à plusieurs chiffres, deux modèles ont été proposés.

Le modèle holistique (Dehaene, Dupoux & Mehler, 1990 ; Reynvoet & Brysbaert, 1999) suggère que les nombres à plusieurs chiffres sont traités de manière globale, comme une seule entité. Cela semble montrer que quand le cerveau est confronté à des chiffres, il en traite le sens, c'est-à-dire qu'il analyse les quantités auxquelles le chiffre renvoie. Les nombres sont donc représentés sous forme de quantités continues (Dehaene, 1990).

Cependant, le modèle de composition (Nuerk, Weger, & Willmes, 2001) indique que le chiffre décimal et le chiffre correspondant aux unités d'un nombre sont traités séparément. Ce dernier modèle a été mis en lumière par le fait que les enfants sont plus rapides lors de la comparaison de paires de nombres congruents (c'est-à-dire quand la comparaison du chiffre des dizaines et du chiffre des unités conduit à la même décision, par exemple lorsqu'ils comparent 41 à 58), que lors de la comparaison des paires de nombres incongruents (i.e. lorsque la comparaison du chiffre des dizaines et du chiffre des unités conduit à une décision différente, par exemple lorsqu'ils comparent 36 à 42).

.4.1.3. Intérêt des épreuves de comparaisons numériques

Nous avons vu précédemment que le système numérique approximatif ne dépendait pas des apprentissages. Néanmoins, l'efficacité de ce système peut prédire les compétences numériques ultérieures (Durand, Hulme, Larkin & Snowling, 2005 ; Gilmore, McCarthy & Spelke, 2010 ; Inglis, Attridge, Batchelor & Gilmore, 2011 ; Libertus, Feigenson & Halberda, 2013 ; Mazzocco, Feigenson & Halberda, 2011). Les tâches de comparaison nécessitent de mettre en rapport chaque grandeur numérique avec la quantité associée, c'est la raison pour laquelle de telles tâches sont utilisées pour explorer le fonctionnement du système numérique approximatif.

De nombreuses études ont mis en avant que la capacité des enfants à comprendre la magnitude numérique est un élément essentiel des premières compétences mathématiques. En outre, Halberda et ses collègues (2008) ont démontré que les résultats à une tâche de comparaison non-symbolique sont en lien avec les performances mathématiques tout au long de la scolarité. Dans cette étude, les enfants qui comparent plus rapidement et plus précisément deux collections de points sont aussi ceux qui obtiennent des meilleurs résultats aux mesures standardisées des épreuves en mathématiques, comme celles des tests d'arithmétique (Halberda & al, 2008).

Les résultats à certaines épreuves nous permettant de nous projeter sur les futures performances en mathématiques ; nous pouvons nous demander si ces résultats permettent également de mettre en lumière un éventuel trouble de la cognition mathématique ou une dyscalculie.

Le trouble des apprentissages en mathématiques (T.A.M.) ou dyscalculie développementale, est un trouble spécifique des apprentissages qui touche trois à six pourcents de la population (Butterworth, 2005). Selon les critères actuels du Diagnostic and Statistical Manual of Mental Disorders Fifth Edition (D.S.M.-5), cela se manifeste par des difficultés à maîtriser le sens du nombre, les données chiffrées ou le calcul et par des difficultés avec le raisonnement mathématique. Le T.A.M. implique des difficultés à comparer, à identifier, ainsi

qu'à estimer des quantités et engendre des lacunes persistantes, ayant des répercussions sur la vie quotidienne.

Il a largement été rapporté dans la littérature que les enfants présentant une dyscalculie développementale rencontrent des difficultés lors des épreuves de comparaison de grandeurs numériques symboliques (De Smedt & Gilmore, 2011 ; Landerl, Bevan & Butterworth, 2004 ; Noël & Rousselle, 2011 ; Vanbinst, Ghesquière & De Smedt, 2014). Par conséquent, selon ces auteurs, une évaluation des capacités de comparaison pourrait, dans certains cas, permettre de déceler d'éventuels troubles de la cognition mathématique. En effet, quand on se base sur le modèle du triple code de Dehaene (1992), les tâches de comparaison sont régies par le système numérique approximatif, qui est censé être inné. Un dysfonctionnement de ce système pourrait donc être à l'origine des difficultés des enfants.

Pourtant, dans la littérature, les études se contredisent. Certaines études révèlent que les performances en comparaison de collections non-symboliques peuvent être associées aux capacités ultérieures en mathématiques, comme vu ci-dessus (Halberda & al, 2008). Toutefois, d'autres auteurs revendiquent que les performances en comparaison symbolique seraient de meilleurs prédicteurs des résultats ultérieurs en mathématiques que celles en comparaison non-symbolique (Rubinsten & Henick, 2005). En effet, pour ces auteurs, les sujets dyscalculiques seraient moins performants que les sujets sains pour réaliser des tâches de comparaison de collections avec des éléments symboliques, notamment avec des nombres arabes (De Smedt & Gilmore, 2011 ; Rousselle & Noël, 2007). L'étude de Rubinsten et Henick (2005) démontre que chez les sujets atteints de dyscalculie développementale, les chiffres arabes n'activent pas automatiquement les représentations des quantités. Ces derniers doivent réaliser un effort cognitif pour associer des représentations internes de la magnitude avec les chiffres arabes. Cela amène les auteurs à penser que le déficit central de la dyscalculie ne concernerait pas le système numérique approximatif à proprement parler, mais résulterait plutôt d'un trouble de l'accès à la représentation de la magnitude numérique à partir des codes symboliques (Rubinsten & Henick, 2005).

Ces dernières études suggèrent que les sujets présentant des troubles d'apprentissage en mathématiques sont moins performants dans les tâches de comparaison symbolique et, réciproquement, les résultats obtenus à ces tâches permettent de prédire les capacités ultérieures en mathématiques. Ainsi, ces arguments sont en faveur du développement de tâches de comparaison symbolique dans une batterie évaluant les habiletés mathématiques.

Méthode

1. Contexte de ce mémoire

Ce mémoire s'inscrit dans une série de mémoires d'orthophonie qui seront poursuivis dans les années à venir. L'objectif de cette suite de mémoires est d'aboutir à la construction et à la validation d'une batterie évaluant des capacités de cognition mathématique chez les enfants d'âge scolaire. Cet outil pourra ensuite être utilisé par les orthophonistes pour l'évaluation des troubles de la cognition mathématique.

Le présent mémoire porte sur la première partie du travail : la réflexion et la proposition de création d'épreuves, et plus particulièrement, de l'épreuve de comparaison symbolique, autrement dit, la comparaison de nombres arabes.

2. Protocoles évaluant les habiletés mathématiques

Les prémices du travail consistent à recenser le plus exhaustivement possible les épreuves testant les habiletés mathématiques dans les différents protocoles qui existent, quels que soient les courants théoriques à partir desquels ils sont fondés.

Un travail de recensement et d'analyse des épreuves est nécessaire pour prendre connaissance de l'exhaustivité des tests déjà en usage et pour connaître les modèles théoriques sur lesquels se sont appuyés les auteurs. Il est également intéressant de pouvoir apprécier les conditions de passation, les consignes des épreuves, ainsi que les modalités d'entrée et de sortie des items. Par exemple, l'item peut être présenté visuellement en code arabe (e.g « 7 »), cela correspond à l'entrée du stimulus, puis exiger une réponse en code verbal (e.g « [set] »), correspondant à la sortie du stimulus. En effet, il est primordial d'appréhender le caractère judicieux de ces éléments dans l'évaluation des habiletés mathématiques pour pouvoir s'en inspirer, ou non, lors de la création des épreuves de la batterie de cognition mathématique.

Ce travail de recherche préalable nous a permis de trouver les conditions de passation qui semblent optimales et de faire en sorte que les épreuves soient les plus standardisées possible pour limiter les biais de passation. En outre, il est important de contrôler les modalités d'entrée et de sortie des épreuves pour pouvoir analyser les résultats en tenant compte de ces dernières. Par exemple, si un sujet échoue à une épreuve pour laquelle la consigne et les items sont présentés auditivement, sans support visuel, il faut rester prudent dans l'interprétation des résultats, car l'échec peut certes résulter de difficultés en mathématiques, mais aussi d'un trouble attentionnel ou d'un déficit de la boucle audio-phonologique.

3. Épreuves évaluant la comparaison numérique symbolique

Pour ce mémoire, nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux épreuves de protocoles qui évaluent la comparaison numérique symbolique dans le but d'en créer une pour la nouvelle batterie évaluant la cognition mathématique. Le travail consistait à consulter des protocoles évaluant les comparaisons de nombres arabes et à en recenser des critères (cf., Tableau 1) afin de pouvoir construire au mieux les épreuves d'évaluation.

Les dix épreuves évaluant la comparaison numérique symbolique que nous avons recensées sont issues des protocoles suivants : Numerical (Gaillard, 2000), Zareki-R (Von Aster & Dellatolas, 2006), MathEval (Heremans, 2011), Numeracy Screener (Ansari & Nosworthy, 2014), Tedi-math grands (Noël & Grégoire, 2015), Examath (Lafay & Helloin, 2016), SYMP test (Brankaer, Ghesquière & Desmedt, 2016), les tests nationaux scolaires proposés en CP (Eduscol, 2018), la version française de Numeracy Screener (Lafay, Archambault, Vigneron & Nosworthy, 2018) et Assessing Mathematical School Readiness (Mejias, Muller & Schiltz,

2019). Tous ces protocoles ont été publiés dans la période s'étendant de 2000 à 2019 et proposent une comparaison de nombres arabes.

Parmi ces dix épreuves, deux seulement sont informatisées (Tedi-math grands et Examath) et cinq sont chronométrées (Numeracy Screener en anglais et en français, Tedi-math grands, Examath, SYMP test, ainsi que les tests nationaux proposés en CP). Le fait d'objectiver le nombre d'items réussis en un temps donné est important car cela peut être un indice utile pour analyser les performances et le fonctionnement d'un sujet. En effet, une lenteur à cette épreuve peut évoquer une difficulté d'accès à la ligne numérique ou un sens du nombre déficient.

Dans chacun des dix protocoles étudiés, des items d'exemple sont présentés avant de commencer l'épreuve afin de mettre le sujet en confiance, à l'exception de Zareki.

Le nombre d'items proposés dans ces épreuves de comparaison de nombres arabes varie de dix (pour Numérical et Zareki) à soixante (pour SYMP test). Un nombre d'items suffisant est nécessaire pour que les résultats à l'épreuve soient corrélés aux compétences du sujet : cela renvoie à la validité de contenu de l'épreuve.

En outre, l'étendue des nombres arabes proposés dans les items, autrement dit la différence entre le plus petit nombre arabe à comparer et le plus grand nombre arabe à comparer, est importante pour donner une idée de l'intégrité de la ligne numérique du sujet, non seulement pour les nombres à un chiffre, mais également pour les nombres plus grands, contenant deux chiffres ou plus. L'épreuve avec la plus grande étendue est celle de Numerical (le plus petit nombre arabe est 79 et le plus grand est 300 313) et les protocoles avec les plus petites étendues sont Numeracy Screener et les tests nationaux scolaires du CP, dont les nombres arabes varient seulement entre 1 et 9.

On remarque qu'aucune des dix épreuves ne proposent de critère d'arrêt quand le sujet est en échec à plusieurs items consécutifs, ni qu'aucune de ces épreuves n'évalue la comparaison de nombres décimaux et de fractions alors qu'il pourrait également être intéressant d'évaluer les nombres arabes sous cette forme.

Tableau 1. Quelques épreuves de protocoles évaluant la comparaison de nombres arabes.

Nom du test	Auteur	Date	Age	Effectif de l'étalonnage	Nombre d'items	Items d'exemple	Min-Max	Critère d'arrêt	Chronométrée	Informatisée
NUMERICAL	Gaillard	2000	7 à 10 ans	293	10	1	79 - 300313	non	non	non
ZAREKI-R	Von Aster Dellatolas	2006	6 à 11,5 ans	250	10	non	13 - 35201	non	non	non
NUMERACY SCREENER	Ansari Nosworthy	2014	GSM à CE2	658	56	12	1 - 9	non	oui (1 minute)	non
TEDI MATH GRANDS	Noël Grégoire	2015	CE2 à 5ème	Pas indiqué pour la partie informatisée	48	6	6 - 18	non	oui	oui
EXAMATH	Lafay Helloin	2016	8 à 15 ans	443	Petits nombres : 12 Moyens nombres : 12 Grands nombres : 12	1 1 1	1 - 4 5 - 13 10 - 81	non	oui	oui
SYMP TEST	Brankaer Ghesquière Desmedt	2016	GSM-6ème	355	Nombres à 1 chiffre : 60 Nombres à 2 chiffres : 60	4 4	1 - 9 12 - 81	non	non	non
TESTS NATIONAUX SCOLAIRES CP	Eduscol	2018	Début CP milieu CP début CE1	Plus de 5500 élèves de CP	40	4	1 - 9	non	oui (1 minute)	non
NUMERACY SCREENER Français	Lafay Archambault Vigneron Nosworthy	2018	GSM à CE2	658	56	12	1 - 9	non	oui (1 minute)	non
ASSESSING MATHEMATICAL SCHOOL READINESS	Mejias Muller Schiltz	2019	6-7 ans	346	12	1	2 - 420	non	non	non

4. Épreuve de comparaison de nombres arabes

Grâce au travail théorique et expérimental cité plus haut, le subtest de comparaison de nombres arabes de la nouvelle batterie d'évaluation de la cognition mathématique sera informatisé et chronométré pour limiter les biais de passation et pour permettre une standardisation maximale.

4.1. Déroulement de la passation

On présentera à l'enfant un item qui contiendra une paire de nombres arabes à comparer. La consigne de l'épreuve sera la suivante « *Sur l'écran, tu vas voir apparaître deux nombres, tu devras appuyer sur le nombre le plus grand, le plus rapidement possible.* » ou « *Sur l'écran, tu vas voir apparaître deux nombres, tu devras appuyer sur la touche « Q » du clavier si le nombre le plus grand se trouve à gauche et sur la touche « M » du clavier si le nombre le plus grand se trouve à droite, le plus rapidement possible.* ». L'examineur n'indiquera pas si les réponses données par le sujet sont correctes ou incorrectes.

4.2. Matériel

4.2.1. Items

Les items de la présente épreuve seront classés en cinq catégories. Au début il s'agira de comparer des petits nombres (de 1 à 4), puis des nombres moyens (de 4 à 14), des grands nombres (de 15 à 99), des très grands nombres (de 100 à 45 700) et enfin des fractions et des nombres décimaux. Les nombres arabes seront présentés écrits en noir sur un fond blanc.

Chacune de ces cinq catégories sera composée de douze items et ces derniers seront présentés dans un ordre d'affichage précis.

Pour les quatre premières catégories, les items ont été créés et contrôlés de manière à ce que le sujet compare des paires de nombres congruentes et non congruentes. Par exemple, 15 vs 99 est une paire congruente car la comparaison du chiffre des dizaines et du chiffre des unités conduit à la même décision, en revanche 37 vs 52 est une paire non congruente car la comparaison du chiffre des dizaines et du chiffre des unités conduit à une décision différente.

En outre, dans chaque catégorie, il y a des paires de nombres suivant l'ordre de la ligne numérique, c'est-à-dire que le plus grand des nombres sera présenté à droite (par exemple, 27 vs 48) et des paires dans le sens inverse de la ligne numérique, autrement dit, le plus grand des deux nombres sera à gauche (par exemple, 91 vs 78).

La fraction de Weber (w) entre deux nombres arabes d'une même paire a également été contrôlée pour que le sujet soit contraint de comparer des nombres dont le rapport varie. Par exemple, 6 vs 5 a un rapport de 0,83 et 4 vs 14 a un rapport de 0,28.

4.2.2. Modalité de réponse

Deux modalités de réponse sont possibles selon le matériel que le sujet a à sa disposition. Si l'orthophoniste est équipé d'une tablette tactile, le sujet doit appuyer avec son doigt sur le plus grand des deux nombres ; et si l'orthophoniste dispose uniquement d'un ordinateur, le sujet pourra, au choix, soit cliquer avec la souris sur la bonne réponse le plus vite possible, soit appuyer sur la touche « Q » du clavier si la bonne réponse est située sur le côté gauche de l'écran et sur la touche « M » si la bonne réponse est située sur le côté droit de l'écran.

4.3. Cotation

La cotation des items de l'épreuve de comparaison de nombres sera binaire ; l'enfant obtiendra 1 point à l'item s'il choisit la réponse correcte et 0 s'il choisit la réponse erronée. Si l'enfant ne parvient pas à répondre, l'orthophoniste pourra appuyer sur la touche « N » du clavier pour passer l'item et faire apparaître l'item suivant. Dans ce cas de figure, l'enfant n'obtiendra pas de point pour l'item.

Chaque sujet débutera l'épreuve à la catégorie qui correspond à ses capacités de comparaison, en fonction de son niveau scolaire et de son âge développemental. Autrement dit, tous les sujets ne seront pas contraints de comparer les items de la catégorie « petits nombres » si leur niveau leur permet de débiter l'épreuve en comparant des catégories de nombres arabes plus grands. Cependant, si le sujet rencontre des difficultés pour comparer les items de la catégorie censée être adaptée à son niveau, un retour en arrière sera possible pour déterminer les comparaisons de nombres qu'il est capable de réaliser, aussi petits soient-ils.

Si l'enfant répond correctement à six items consécutifs, un saut de catégorie sera effectué automatiquement par l'ordinateur. Par exemple, si les items 1, 2, 3, 4, 5 et 6 sont réussis dans la catégorie « petits nombres », l'ordinateur passera à la catégorie « nombres moyens » sans avoir présenté la totalité des items de la partie « petits nombres ».

En revanche, si l'enfant échoue à six items consécutifs de la même catégorie, un critère d'arrêt sera appliqué et l'épreuve de comparaison de nombres arabes prendra fin.

4.4. Analyse des résultats

4.4.1. Scores

Les résultats de l'épreuve de comparaison nous permettront d'obtenir le score brut du nombre d'items réussis sur le nombre d'items total présentés au sujet. Nous obtiendrons alors un score correspondant à la somme de toutes les réussites aux items des cinq catégories mélangées, mais également un score détaillé pour chaque catégorie d'items. Ainsi, nous pourrons juger de la capacité globale du sujet à comparer deux nombres arabes, mais nous pourrons également analyser et cibler les difficultés de l'enfant selon les comparaisons erronées.

Les scores du sujet seront ensuite comparés aux scores des autres enfants de son âge (une normalisation et une validation de l'épreuve seront donc nécessaires) : on obtiendra alors un écart type et un percentile en regard du seuil pathologique correspondant à la performance de l'enfant.

D'un point de vue qualitatif, le fait de pouvoir analyser finement les réussites en fonction des catégories de nombres à comparer nous permet, d'une part, d'obtenir une représentation de l'intégrité de la ligne numérique mentale du sujet, et d'autre part, d'appréhender la précision numérique de ce dernier.

Grâce à des critères que nous avons pris soin de faire varier, comme la congruence des paires, l'ordre de la ligne numérique ou encore le ratio, nous pourrons objectiver ce qui pose le plus de difficultés à l'enfant.

Il peut être intéressant de noter si le sujet réalise plus d'erreurs quand on lui présente des paires non congruentes par rapport aux paires congruentes pour analyser la façon dont il traite le nombre. L'étude de Nuerk et al. (2014) montre que les enfants qui obtiennent de moins bons scores aux tâches de comparaison n'ont pas de stratégies suffisamment efficaces. En effet, ils ne traitent pas le nombre de manière holistique, autrement dit dans son intégralité, mais ils se focalisent sur les unités avant de traiter les dizaines, auquel cas la comparaison des paires non congruentes est ratée.

Il est également possible de constater l'influence du ratio des nombres sur les réussites. On peut en effet observer à quel point l'enfant est sensible au ratio, autrement dit, s'il est plus facile pour lui de comparer deux nombres ayant une fraction de Weber proche de 0, par rapport à deux nombres ayant une fraction de Weber proche de 1.

4.4.2. Temps

Il est important d'obtenir des résultats pouvant être comparés à une norme, tant pour les scores que pour les temps de réponse car ces derniers peuvent donner des indications quant à l'automatisation ou, au contraire, au déficit du processus de traitement des nombres ou au défaut d'accès à la ligne numérique mentale.

Les temps de réponse seront donc également analysés. Nous aurons à notre disposition le temps de réponse total, autrement dit le temps écoulé entre le début et la fin de la passation de l'épreuve. Nous aurons aussi des informations plus détaillées : en effet, l'orthophoniste aura accès au temps de réponse pour chaque item et au temps moyen de réponse par item.

Ici encore, nous pourrons analyser les temps de réponses en fonction des critères cités ci-dessus afin de pouvoir cerner au mieux les difficultés du sujet.

Résultats

Les items de l'épreuve de comparaison de nombres arabes de la batterie d'évaluation de cognition mathématique sont répartis en cinq catégories.

Avant de commencer à temporaliser l'épreuve, deux items d'exemple, considérés comme simples, seront proposés au sujet pour le familiariser avec la tâche à accomplir et le mettre en confiance (cf. Tableau 2).

Tableau 2. Items d'exemple.

Numéro de l'item	Item	Ordre selon la ligne numérique mentale	Ratio	Congruence
Exemples				
Ex 1	1 vs 2	Ordre ligne numérique	$1/2=0.5$	/
Ex 2	2 vs 4	Ordre ligne numérique	$2/4=0.5$	/

La première catégorie de nombres à comparer présentée au sujet sera celle des « petits nombres », comprenant des nombres arabes s'étendant de 1 à 4 (cf. Tableau 3).

Tableau 3. Items de la catégorie « petits nombres ».

Numéro de l'item	Item	Ordre selon la ligne numérique mentale	Ratio	Congruence
Petits nombres				
1	1 vs 3	Ordre ligne numérique	$1/3=0.33$	/
2	4 vs 2	Ordre inverse ligne numérique	$1/2=0.5$	/
3	2 vs 1	Ordre inverse ligne numérique	$1/2=0.5$	/
4	2 vs 3	Ordre ligne numérique	$2/3=0.67$	/
5	1 vs 2	Ordre ligne numérique	$1/2=0.5$	/
6	4 vs 3	Ordre inverse ligne numérique	$3/4=0.75$	/
7	1 vs 4	Ordre ligne numérique	$1/4=0.25$	/
8	2 vs 4	Ordre ligne numérique	$2/4=0.5$	/
9	3 vs 1	Ordre inverse ligne numérique	$1/3=0.33$	/
10	4 vs 1	Ordre inverse ligne numérique	$1/4=0.25$	/
11	3 vs 2	Ordre inverse ligne numérique	$2/3=0.67$	/
12	3 vs 4	Ordre inverse ligne numérique	$3/4=0.75$	/

La seconde catégorie présentée, intitulée « nombres moyens », contiendra des items allant de 4 à 14 (cf. Tableau 4).

Tableau 4. Items de la catégorie « nombres moyens ».

Numéro de l'item	Item	Ordre selon la ligne numérique mentale	Ratio	Congruence
Nombres moyens				
1	4 vs 12	Ordre ligne numérique	$4/12=0.33$	/
2	6 vs 5	Ordre inverse ligne numérique	$5/6=0.83$	/
3	11 vs 10	Ordre inverse ligne numérique	$10/11=0.91$	Congruent
4	7 vs 10	Ordre ligne numérique	$7/10=0.7$	/
5	6 vs 8	Ordre ligne numérique	$6/8=0.75$	/
6	10 vs 9	Ordre inverse ligne numérique	$9/10=0.9$	/
7	6 vs 12	Ordre ligne numérique	$1/2=0.5$	/
8	4 vs 14	Ordre ligne numérique	$4/14=0.28$	/
9	14 vs 9	Ordre inverse ligne numérique	$9/14=0.64$	/
10	7 vs 11	Ordre ligne numérique	$7/11=0.63$	/
11	13 vs 8	Ordre inverse ligne numérique	$8/13=0.61$	/
12	8 vs 5	Ordre inverse ligne numérique	$5/8=0.62$	/

Les items de la troisième catégorie « grands nombres » s'entendront de 15 à 99 (cf. Tableau 5).

Tableau 5. Items de la catégorie « grands nombres ».

Numéro de l'item	Item	Ordre selon la ligne numérique mentale	Ratio	Congruence
Grands nombres				
1	15 vs 99	Ordre inverse ligne numérique	$15/99=0.15$	Congruent
2	41 vs 32	Ordre inverse ligne numérique	$32/41=0.78$	Non congruent
3	57 vs 89	Ordre ligne numérique	$57/89=0.64$	Congruent
4	75 vs 28	Ordre inverse ligne numérique	$28/75=0.37$	Non congruent
5	37 vs 52	Ordre ligne numérique	$37/52=0.71$	Non congruent
6	87 vs 63	Ordre inverse ligne numérique	$63/87=0.72$	Congruent
7	47 vs 29	Ordre inverse ligne numérique	$29/47=0.62$	Non congruent
8	64 vs 86	Ordre ligne numérique	$64/86=0.74$	Congruent
9	27 vs 48	Ordre ligne numérique	$27/48=0.56$	Non congruent

Numéro de l'item	Item	Ordre selon la ligne numérique mentale	Ratio	Congruence
10	91 vs 78	Ordre inverse ligne numérique	$78/91=0.86$	Non congruent
11	70 vs 35	Ordre inverse ligne numérique	$1/2=0.5$	Non congruent
12	67 vs 76	Ordre ligne numérique	$67/76=0.88$	Non congruent

La quatrième catégorie « très grands nombres » contiendra des items allant de 100 à 45 700 (cf. Tableau 6).

Tableau 6. Items de la catégorie « très grands nombres ».

Numéro de l'item	Item	Ordre selon la ligne numérique mentale	Ratio	Congruence
Très grands nombres				
1	145 vs 232	Ordre ligne numérique	$145/232 = 0.62$	Non congruent
2	740 vs 705	Ordre inverse ligne numérique	$705/740=0.95$	Non congruent
3	100 vs 1000	Ordre ligne numérique	$100/1000=0.1$	/
4	45658 vs 45700	Ordre ligne numérique	$45658/45700=0.99$	Non congruent
5	476 vs 365	Ordre inverse ligne numérique	$365/476=0.77$	Non congruent
6	114 vs 104	Ordre inverse ligne numérique	$104/114=0.91$	Congruent
7	1045 vs 1344	Ordre ligne numérique	$1045/1344=0.77$	Non congruent
8	657 vs 644	Ordre inverse ligne numérique	$644/652=0.98$	Congruent
9	585 vs 943	Ordre ligne numérique	$585/943=0.62$	Non congruent
10	313 vs 131	Ordre inverse ligne numérique	$131/313=0.42$	Non congruent
11	886 vs 799	Ordre inverse ligne numérique	$799/889=0.89$	Non congruent
12	1675 vs 1756	Ordre ligne numérique	$1675/1756=0.95$	Non congruent

Enfin, la dernière catégorie proposera des comparaisons de nombres arabes sous forme de fractions et de nombres décimaux (cf. Tableau 7).

Tableau 7. Items de la catégorie « très grands nombres ».

Numéro de l'item	Item	Ordre selon la ligne numérique mentale	Ratio	Congruence
Fractions et nombres décimaux				
1	1/4 vs 1/7	Ordre inverse ligne numérique	$0.14/0.25=0.56$	/
2	0.3 vs 0.6	Ordre ligne numérique	$0.3/0.6=0.5$	/
3	35.4 vs 34.5	Ordre inverse ligne numérique	$34.5/35.4=0.97$	Non congruent

Numéro de l'item	Item	Ordre selon la ligne numérique mentale	Ratio	Congruence
4	8/4 vs 0.5	Ordre inverse ligne numérique	$0.5/2=0.25$	/
5	1/4 vs 2/3	Ordre ligne numérique	$0.25/0.66=0.39$	/
6	1.75 vs 6/3	Ordre ligne numérique	$1.75/2=0.87$	/
7	3.20 vs 3.05	Ordre inverse ligne numérique	$3.05/3.20=0.95$	Non congruent
8	0.15 vs 0.10	Ordre inverse ligne numérique	$0.10/0.15=0.66$	Congruent
9	2/3 vs 3/2	Ordre ligne numérique	$0.66/1.5=0.44$	/
10	1000/10 vs 100/10	Ordre inverse ligne numérique	$10/100=0.1$	/
11	2.62 vs 2.61	Ordre inverse ligne numérique	$2.61/2.62=0.99$	/
12	0.5 vs 3/3	Ordre ligne numérique	$0.5/1=0.5$	/

Discussion

L'élaboration de la nouvelle batterie de cognition mathématique s'inscrit dans une approche cognitive prenant pour référence le modèle du triple code de Dehaene (Dehaene, 1992). Cette batterie permettra d'évaluer les capacités de cognition mathématique des enfants d'âge scolaire. Différents domaines de la cognition mathématique seront donc testés grâce à différentes tâches : comparaison, estimation, pose d'opérations, lecture de nombres, etc., afin de tester les différents codes et les accès à ces derniers.

Les comparaisons numériques consistent à associer un nombre avec sa grandeur numérique dans le but de pouvoir déterminer lequel des nombres est le plus grand. Cette capacité se met en place au cours du cycle 2 (Girelli et al., 2000). Les comparaisons symboliques sont réalisables, en partie, grâce au système numérique approximatif qui nous permet de convertir des symboles, en l'occurrence, des nombres arabes, en la quantité à laquelle ils renvoient, dans le but de déterminer quel nombre est le plus grand. Une évaluation des aptitudes de comparaison de nombres arabes d'un sujet permet donc de vérifier le fonctionnement et l'accès au système numérique approximatif, mais permet aussi de tester la représentation et la maîtrise des nombres dans ce format. Il est primordial de procéder à une évaluation grâce à une telle tâche car un dysfonctionnement ou un défaut d'accès au système numérique approximatif pourrait être à l'origine des difficultés mathématiques des enfants (De Smedt & Gilmore, 2011 ; Landerl, Bevan & Butterworth, 2004 ; Noël & Rousselle, 2011 ; Vanbinst, Ghesquière & De Smedt, 2014).

1. Rappels des résultats

Le présent mémoire a permis l'élaboration d'une proposition d'épreuve de comparaison de nombres arabes. L'épreuve, dans sa version finale, propose cinq grandes catégories d'items à comparer. Chacune de ces catégories contient douze items, ces derniers ayant été contrôlés au niveau du ratio des nombres à comparer, de leur ordre sur la ligne numérique, ainsi qu'au niveau de la congruence de ces paires de nombres : autrement dit, dans certaines paires, la comparaison du chiffre des dizaines et des unités conduit à la même décision (e.g. 23 vs 46), mais parfois, ce n'est pas le cas (e.g. 26 vs 43). De plus, nous avons veillé à proposer des paires de nombres proches (e.g. 41 vs 32) et des paires de nombres plus éloignés (e.g. 75 vs 28) pour contrôler et faire varier l'effet de distance.

Dans la première catégorie, il convient de comparer des « petits nombres » allant de 1 à 4. Cette catégorie, contenant uniquement quatre chiffres arabes différents (1, 2, 3 et 4), permet de proposer une comparaison de ces nombres dans toutes les configurations possibles. L'analyse des résultats de cette catégorie nous permettra, entre autres, de juger si le sujet possède une bonne représentation des petits nombres et si la disposition de présentation des nombres a une influence sur sa décision. Nous pourrions, par exemple, comparer son temps de réponse et sa performance à l'item « 1 vs 3 » avec ceux de l'item « 3 vs 1 ». Le parti a été pris de construire une catégorie avec seulement les quatre premiers nombres arabes car ces comparaisons sont censées être les mieux réussies : ce sont en effet celles qui sont les plus vite maîtrisées dans le développement de la cognition mathématique. D'ailleurs, nous pouvons faire le lien avec les travaux de Wynn en 1992, dans lesquels nous constatons que les jeunes enfants âgés de seulement quatre mois et demi sont capables de distinguer des petites quantités quand ces dernières sont inférieures à 4. De plus, d'après le bulletin officiel de l'éducation nationale (Eduscol, 2020), à la fin du cycle 1, correspondant à toutes les classes de maternelle, les enfants doivent savoir lire et écrire les nombres en chiffres jusqu'à 10. Cela est donc en faveur du développement d'une catégorie d'items de paires de nombres allant de 1 à 4.

Ensuite, la deuxième catégorie contient des items comprenant des « nombres moyens » allant de 4 à 14. Cette catégorie est donc la première qui contient des nombres à un chiffre et des nombres à deux chiffres. Dans les programmes scolaires, les nombres arabes à deux chiffres doivent être maîtrisés au début du cycle 2, en d'autres termes en classe de CP (Eduscol, 2020).

La troisième catégorie propose des « grands nombres » à comparer, ces derniers s'étendant de 15 à 99.

Les « très grands nombres », allant de 100 à 45 700, font l'objet de la quatrième catégorie, cela permet d'apprécier comment le sujet appréhende les centaines et les milliers. Tous les nombres arabes inférieurs à 1000 doivent en effet être maîtrisés à la fin du cycle 2, en fin de CE1. Les nombres plus grands encore sont étudiés au cours du cycle 3 (Eduscol, 2020).

Enfin, dans la cinquième catégorie, il s'agit de comparaisons de fractions et de nombres décimaux. Ces nombres font également l'objet d'un apprentissage au cours du cycle 3, autrement dit dans les classes de CE2, de CM1 et de CM2 (Eduscol, 2020). Pour cette dernière

catégorie, certains items consistent, bien sûr, en la comparaison de deux fractions entre elles et de deux nombres décimaux entre eux, mais certains items proposent aussi de comparer une fraction avec un nombre décimal. Il nous a semblé important de créer une catégorie dédiée aux comparaisons de fractions et aux nombres décimaux car ces nombres font partie intégrante de notre quotidien. Les fractions et les nombres décimaux permettent en effet de compenser l'insuffisance des nombres entiers, en précisant les représentations numériques sur la ligne numérique mentalisée. Ce format de nombre n'est pas évident à maîtriser, d'ailleurs, la littérature révèle que les meilleurs prédicteurs des performances ultérieures des sujets de quinze à dix-sept ans en mathématiques sont les connaissances sur les fractions ainsi que les performances aux divisions (Siegler et al., 2002).

Ces cinq catégories d'items de nombres arabes à comparer sont donc construites en lien direct avec les étapes du développement des enfants, ainsi qu'avec les acquisitions scolaires de la maternelle (cycle 1) jusqu'au collège (cycle 3). De plus, en regard du modèle du triple code de Dehaene (1992), les comparaisons de ces cinq catégories de nombres permettent de mesurer l'accès au code arabe et au code analogique, ainsi que le transcodage entre ses deux codes. Il est également intéressant d'évaluer la comparaison de nombres de plus en plus grands et de plus en plus complexes car cela peut rendre compte de la finesse de l'organisation des nombres arabes sur la ligne numérique mentale d'un individu par rapport aux sujets de sa classe d'âge.

2. Recherches suivantes

Avant que la batterie soit éditée et commercialisée, il est indispensable de procéder à la normalisation des épreuves afin de connaître le niveau réel des enfants dans une telle tâche. En effet, la normalisation de l'épreuve de comparaison de nombres arabes permettra d'établir des seuils pathologiques et des seuils d'alerte en effectuant la passation sur un grand échantillon de sujets. L'échantillon devra comporter au minimum cent individus pour chaque classe d'âge pour pouvoir être représentatif de la population (McCauley & Schwiser, 1984 ; Hutchison, 1994). Ce seuil pathologique permettra de générer des écarts-types ou des percentiles correspondant à la performance du sujet pour cette épreuve.

Avant de procéder à la normalisation de la batterie, il faudra réaliser la phase de « pré-test » qui consistera à administrer l'épreuve à plusieurs enfants de différents âges pour vérifier que les consignes sont bien comprises et pour s'assurer que l'examineur parvient à s'approprier facilement l'outil d'évaluation.

3. Limites et points forts de l'épreuve

3.1. Limites

Plusieurs biais pourraient être recensés dans l'épreuve de comparaison de nombres arabes telle qu'elle a été décrite dans la partie « méthode » de ce mémoire.

Un biais de passation peut être présent vis-à-vis de la modalité de réponse du sujet. En effet, il est préférable que l'enfant puisse toucher le plus grand nombre directement sur la tablette, car le fait d'appuyer sur la touche « Q » du clavier si le plus grand nombre se trouve à gauche et sur la touche « M » du clavier si le plus grand nombre se trouve à droite requiert d'avoir correctement associé la lettre et le côté de l'écran auquel elle correspond. Cette démarche indirecte peut mettre en difficulté le sujet qui utilise un ordinateur et donc biaiser les résultats à cette épreuve. Pour pallier cette éventuelle difficulté, nous pourrions envisager de coller des gommettes de couleur sur les touches « M » et « Q » du clavier pour qu'elles se distinguent davantage des autres ; ou alors, nous pourrions installer un cache sur le clavier qui permettrait de laisser apparaître uniquement ces deux dernières touches.

De plus, l'effet S.N.A.R.C. (Spatial Numerical Association of Response Code), décrit par Dehaene et ses collègues en 1993, semble prouver que nous visualisons les plus grands nombres à droite ; il peut donc être contre-intuitif de toucher une touche à gauche du clavier pour signifier que le plus grand nombre est à gauche. C'est la raison pour laquelle nous avons pris soin de créer certains items de paires de nombres arabes qui suivent l'ordre de la ligne numérique et d'autres dans le sens inverse de la ligne numérique.

Aussi, certains enfants peuvent être impulsifs ; il est donc parfois difficile de les faire manipuler et appuyer sur les touches du clavier pour donner leur réponse. Dans ces situations, il convient de préciser à l'enfant de bien regarder les deux nombres avant de déterminer lequel est le plus grand et d'éloigner ses doigts des touches du clavier entre chaque paire de nombres à comparer pour éviter d'appuyer avant d'avoir pris la décision numérique.

La fatigabilité du sujet peut également influencer les résultats de l'épreuve de comparaison de nombres arabes. En effet, c'est une épreuve qui sollicite une grande charge cognitive car le sujet doit, bien sûr, traiter les nombres et réaliser une action pour répondre à l'item, mais il doit également faire preuve de flexibilité mentale pour mettre à jour ce qu'il voit apparaître sur l'écran au vu du grand nombre d'items qui lui seront présentés successivement. Pour objectiver cette fatigue due à la charge cognitive que nécessite l'épreuve, il pourrait être intéressant de pouvoir générer un indice de dégradation, qui indiquerait si les performances du sujet se dégradent au cours du temps au sein d'une même catégorie de nombres.

Enfin, l'épreuve consistant uniquement à comparer deux nombres arabes est loin d'être ludique. Le sujet qui rencontre des difficultés scolaires dans le domaine des mathématiques ou encore le sujet ayant développé une anxiété mathématique peut vite se décourager, se démotiver ou encore ressentir de la peur quand il se retrouve confronté à des nombres présentés de façon brute. Pour éviter cela, il est important que l'orthophoniste encourage et rassure le sujet tout au long de l'épreuve, surtout si ce dernier n'affectionne pas beaucoup les chiffres, afin de réduire l'effet du stress sur ses performances.

Il est donc important que l'examineur ait tous ces éléments en tête car ces derniers peuvent avoir de l'influence et des répercussions sur les performances de l'enfant à l'épreuve de comparaison de nombres arabes.

3.2. Points forts

Tout d'abord, l'épreuve de comparaison de nombres arabes se veut, d'une part, rapide et facile à prendre en main pour l'examineur, et d'autre part, accessible à la compréhension du sujet évalué.

De plus, l'informatisation de cette épreuve permet une standardisation ainsi qu'une temporalisation optimales, ce qui participe à une bonne fidélité inter-juge. Autrement dit, les résultats d'un sujet à cette épreuve ne doivent pas varier en fonction de l'examineur car la manière d'administrer et de coter l'épreuve restera inchangée. En effet, la consigne de l'épreuve qui est la suivante : « *Sur l'écran, tu vas voir apparaître deux nombres, tu devras appuyer sur le nombre le plus grand, le plus rapidement possible.* » ou, selon le matériel dont dispose l'orthophoniste : « *Sur l'écran, tu vas voir apparaître deux nombres, tu devras appuyer sur la touche « Q » du clavier si le nombre le plus grand se trouve à gauche et sur la touche « M » du clavier si le nombre le plus grand se trouve à droite, le plus rapidement possible.* » sera prononcée par l'ordinateur dans le but de soulager l'administrateur, mais surtout pour n'avoir qu'une seule façon d'expliquer l'épreuve qui, ainsi, ne variera pas d'un orthophoniste à l'autre. En outre, les items d'exemple ainsi que les items d'évaluation seront tout le temps similaires et seront, pour chaque passation, présentés dans le même ordre.

Suivant son niveau développemental ou scolaire, l'enfant pourra débiter l'épreuve à un certain palier qui ne correspondra pas nécessairement à la première catégorie d'items. Autrement dit, il ne commencera pas à la catégorie contenant des « petits nombres » si la comparaison de ces derniers est censée être acquise en regard de son niveau scolaire. En revanche, si le sujet rencontre des difficultés pour comparer les items de la catégorie adaptée à son niveau, un retour en arrière sera possible pour déterminer les comparaisons de nombres qu'il est capable de réaliser, aussi petits soient-ils.

De plus, cette épreuve sera régie par un critère d'arrêt si le sujet échoue à six items consécutifs au sein d'une même catégorie. Cet arrêt de l'épreuve permet d'éviter de mettre l'enfant en trop grande difficulté et cela est important pour que ce dernier reste motivé pour la suite de la passation des épreuves de la batterie.

Cet ajustement aux difficultés et au niveau de l'enfant permet d'optimiser le temps de passation de l'épreuve, tout en situant l'enfant en regard du niveau scolaire attendu pour son âge développemental.

En outre, la comparaison de fractions et de nombres décimaux, que l'on retrouve dans la cinquième catégorie d'items, n'existe dans aucun protocole d'évaluation orthophonique de la cognition mathématique à ce jour. Cela est inédit et les résultats à cette catégorie vont permettre d'objectiver la maîtrise des habiletés de division du sujet.

4. Apport pour la pratique orthophonique

Il est important d'administrer une épreuve de comparaison symbolique dans l'évaluation des capacités de cognition mathématique car la littérature suggère que les sujets présentant des troubles d'apprentissage en mathématiques sont moins performants que les sujets sains dans les tâches de comparaison de nombres arabes ; et, réciproquement, les résultats obtenus à ces tâches permettent de prédire les capacités ultérieures en mathématiques (Rubinsten & Henick, 2005). Cette épreuve permettra ainsi d'appréhender le fonctionnement du système approximatif du sujet en rendant compte de sa précision du sens du nombre sur la ligne numérique mentale.

Cette épreuve de comparaison sera donc la première épreuve disponible pour l'évaluation en orthophonie à être informatisée, chronométrée et qui contiendra autant d'items de paires de nombres arabes à comparer. Les résultats des performances à cette épreuve vont ainsi être finement analysables afin de pouvoir se faire une idée précise des points forts et des difficultés des sujets dans une tâche de comparaison symbolique à un moment précis.

Conclusion

Dans notre vie quotidienne, les nombres nous entourent et la compréhension de ces derniers est une compétence importante pour parvenir à être autonome dans la société actuelle (Fayol, 2013). En effet, un défaut de maîtrise du nombre peut induire un handicap au niveau scolaire mais également au niveau personnel (Lafay, 2016). Face à l'importance de la place des mathématiques dans notre quotidien, le diagnostic orthophonique des troubles des apprentissages en mathématiques est nécessaire afin de pouvoir bénéficier, par la suite, d'une prise en charge adaptée et d'éventuels aménagements (Lafay, 2014).

L'évaluation orthophonique des habiletés de cognition mathématique nécessite des outils diagnostiques pointus et précis. Ce travail s'inscrit dans un projet global ayant pour but de construire une batterie d'évaluation de la cognition mathématique fondée à partir du modèle théorique du triple code de Dehaene (1992). Ce mémoire consiste en l'analyse des épreuves de protocoles évaluant la comparaison symbolique qui existent déjà afin de pouvoir proposer une nouvelle épreuve évaluant ce domaine.

Les analyses critiques ont permis de créer une épreuve construite en cinq grandes catégories. Chaque catégorie contient douze items de paires de nombres arabes à comparer dans un ordre précis. Les quatre premières catégories contiennent des nombres arabes allant de 1 à 45 700 et la dernière catégorie contient des nombres arabes sous forme de fractions et de nombres décimaux. Les résultats des performances d'un sujet à cette épreuve permettront à l'orthophoniste d'analyser le fonctionnement du système numérique approximatif, d'avoir une représentation de l'intégrité de la ligne numérique mentale du sujet et d'appréhender la précision numérique de ce dernier.

Cette épreuve est, d'une part, fondée à partir du courant théorique actuel, mais elle est également innovante dans son contenu. En effet, il s'agit de la seule épreuve de comparaison

de nombre arabes informatisée, chronométrée, et comportant soixante items à comparer, dont des fractions et des nombres décimaux. De plus, des critères de début et de fin de passation sont appliqués selon le niveau du sujet.

Avant d'être validée, cette épreuve nécessitera d'être normalisée auprès de sujets afin d'obtenir des scores-seuils pathologiques. Cette partie sera la prochaine étape du travail qui fera l'objet d'une autre série de mémoires universitaires.

Bibliographie

- American Psychiatric Association, & American Psychiatric Association (Éds.). (2013). Diagnostic and statistical manual of mental disorders : DSM-5 (5th ed). *American Psychiatric Association*.
- Baillargeon, R., Spelke, E., & Wasserman, S. (1985). Object permanence in five-month-old infants. *Cognition*, 20, 191-208.
- Brankaer, C., Ghesquière, P., & De Smedt, B. (2016). *Symbolic magnitude processing in elementary school children : A group administered paper-and-pencil measure (SYMP Test)*.
- Butterworth, B. (2005). The development of arithmetical abilities. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 46(1), 3-18.
- Butterworth, B. (2005). Developmental dyscalculia. Dans *Child Neuropsychology: Concepts, Therapy, and Practice*, p. n455-n467.
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1-42.
- Dehaene, S. (2018). *La bosse des maths*.
- De Smedt, B., Gilmore, C.K. (2011). Defective number module or impaired access? Numerical magnitude processing in first graders with mathematical difficulties. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(2), 278–292.
- De Smedt, B., Noël, M. P., Gilmore, C., & Ansari, D. (2013). How do symbolic and non-symbolic numerical magnitude processing skills relate to individual differences in children's mathematical skills? A review of evidence from brain and behavior. *Trends in Neuroscience and Education*, 2(2), 48–55.
- Fayol, M. (2013). *L'acquisition du nombre*. Paris : Presses universitaires de France.
- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307-314.
- Gaul Bouchard, M., & Fitzpatrick, E., & Janet, O. (2009). *Analyse psychométrique d'outils d'évaluation utilisés auprès des enfants francophones*. 33(3).
- Landerl, K. (2019). Neurocognitive Perspective on Numerical Development. In A. Fritz, V. G. Haase, & P. Räsänen (Éds.), *International Handbook of Mathematical Learning Difficulties* (p. 9-24). Springer International Publishing.
- Lafay, A., St-Pierre, M.-C. et Macoir, J. (2014). L'évaluation des habiletés mathématiques de l'enfant : inventaire critique des outils disponibles. *Glossa*, 116, 33–58.
- Lafay, A. (2016). *Déficits cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.12106.11202>
- Lépine, R., Roussel, J.-P., & Fayol, M. (2003). Résolution procédurale ou récupération en mémoire des additions et multiplications élémentaires chez les enfants ? *L'année psychologique*, 103(1), 51-80.
- McCloskey, M., Caramazza, A., Basili, AG. (1985). Cognitive mechanisms in number processing and calculation : Evidence from dyscalculia. *Brain Cogn* ; 4 : 171-96.
- Noël, M., Rousselle, L. & De Visscher, A. (2013). La dyscalculie développementale : à la croisée de facteurs numériques spécifiques et de facteurs cognitifs généraux. *Développements*, 15(2), 24-31.
- Piaget, J. (1952). *Essai sur les transformations des opérations logiques*. Paris : PUF.

- Roggeman, C., Verguts, T., & Fias, W. (2007). Priming reveals differential coding of symbolic and non-symbolic quantities. *Cognition*, 105(2), 380-394.
- Rousselle, L., Noël, M.P. (2007). Basic numerical skills in children with mathematics learning disabilities: a comparison of symbolic vs non-symbolic number magnitude processing. *Cognition*, 102(3), 361–395.
- Rubinsten, O., & Henik, A. (2005). Automatic Activation of Internal Magnitudes : A Study of Developmental Dyscalculia. *Neuropsychology*, 19(5), 641-648.
- Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, 358(6389), 749-750

Site internet consulté :

https://cache.media.eduscol.education.fr/file/A-Scolarite_obligatoire/24/3/Programme2020_cycle_1_comparatif_1313243.pdf