

MEMOIRE

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

Hélène BERRUT

soutenu publiquement en juin 2021

Proposition d'évaluation de la ligne numérique mentale dans un projet de création de bilan orthophonique de la cognition mathématique

MEMOIRE dirigé par

Sophie FRAGNON, Orthophoniste, Université de Lille, Lille

Sandrine MEJIAS, Maître de conférence, Université de Lille, Lille

Remerciements

Je souhaiterais remercier mesdames Mejias et Fragnon pour leur travail en tant que directrices de mémoire.

Je souhaitais également remercier l'ensemble des mémorants concernés par le projet de création de bilan orthophonique de la cognition mathématique pour leur soutien.

Je souhaitais enfin remercier ma famille et mes amis pour leur soutien et leurs relectures.

Résumé :

Ce mémoire s'inscrit dans un projet de création de bilan orthophonique de la cognition mathématique, basé sur le modèle du triple code de Dehaene (Dehaene, 1992). Il se centre plus particulièrement sur les tâches d'estimation sur ligne numérique.

Nous souhaitons proposer des éléments utiles à la création d'une tâche d'estimation sur ligne numérique. Nous avons cherché quelles épreuves avaient été proposées dans de précédents tests et dans la littérature scientifique. Leurs caractéristiques ont orienté nos choix concernant la présentation de la tâche et les items.

Nous avons finalement proposé un ensemble de lignes numériques horizontales, orientées de gauche à droite, couvrant différentes plages de nombres (0 à 20, 0 à 100, 0 à 1000, -100 à 100, -1000 à 1000) en fonction du niveau scolaire de l'enfant, ainsi que des items à y placer. Nous avons suggéré de mesurer la précision de l'estimation en fonction de l'écart à la position correcte. Nous avons enfin proposé d'utiliser un support informatisé pour permettre une mesure du temps de réponse.

Cette proposition constitue une base de travail en vue de la conception d'une tâche d'estimation sur ligne numérique. Elle pourrait, dans une forme aboutie, être utilisée dans le cadre de l'évaluation des troubles de la cognition mathématique.

Mots-clés :

Cognition mathématique, évaluation, ligne numérique mentale, estimation sur ligne numérique.

Abstract :

This memoire is part of a project to create a speech therapy assessment of mathematical cognition, based on Dehaene's triple-code model (Dehaene, 1992). It focuses more specifically on the number line estimation tasks.

Its goal was to offer useful elements for the creation of a number line estimation task . The choices made for the presentation of the task and the items are based on characteristics of previously given tests as well as the scientific literature.

One suggested a set of horizontal number lines, oriented from left to right, covering several number ranges (0 to 20, 0 to 100, 0 to 1000, -100 to 100, -1000 to 1000) depending on the child's grade level, as well as items to place on the lines. The accuracy of the estimation could be measured with its deviation from the correct position. Finally, a digitalized medium seemed like an efficient mean of measuring the response time.

This proposal is a basis for the design of a number line estimation task. In a developed form, it could be used in the context of evaluation for mathematical cognitive disorders.

Keywords :

Mathematical cognition, evaluation, mental number line, number line estimation.

Table des matières

Introduction.....	1
Contexte théorique, buts et hypothèses.....	2
1. Contexte théorique.....	2
1.1. Le fonctionnement des compétences mathématiques.....	2
1.1.1. Une remise en question de l'approche piagétienne.....	2
1.1.2. Les modèles de la psychologie cognitive.....	3
1.2. Les troubles de la cognition mathématique.....	4
1.2.1. Les classifications internationales.....	4
1.2.2. Approche piagétienne : troubles du raisonnement logico-mathématique.....	5
1.2.3. Les approches cognitives.....	5
1.3. La ligne numérique mentale.....	6
1.3.1. L'espace et le nombre.....	6
1.3.2. Une part innée et une part acquise.....	7
1.3.3. Facteurs influençant la LNM.....	8
1.3.4. LNM et autres domaines mathématiques.....	11
1.4. Évaluation de la ligne numérique mentale.....	12
1.4.1. L'évaluation des troubles en orthophonie : les tests psychométriques.....	12
1.4.2. Les tâches d'estimation sur ligne numérique.....	13
2. Buts.....	13
Méthode.....	14
1. Recherche des épreuves existantes.....	14
2. Caractéristiques d'une tâche d'estimation sur ligne numérique.....	15
2.1. Caractéristiques générales d'une épreuve pertinente sur le plan psychométrique... 15	
2.2. Caractéristiques pertinentes d'une épreuve centrée sur l'évaluation de la ligne numérique mentale.....	16
2.2.1. Présentation de la ligne numérique.....	16
2.2.2. Choix des items.....	18
3. Analyse des épreuves existantes.....	19
4. Proposition d'une tâche d'estimation sur ligne numérique.....	20
Résultats.....	20
1. Caractéristiques d'une épreuve de ligne numérique pertinente.....	20
1.1. Analyse des épreuves existantes.....	20
1.1.1. Sélection des épreuves à analyser.....	20
1.1.2. Analyse des épreuves sélectionnées.....	21
2. Proposition d'une épreuve de ligne numérique.....	22
Discussion.....	23
1. Justification des choix des différents aspects de la tâche d'estimation sur ligne numérique.....	23
1.1. Ce que nous ont appris les épreuves pré-existantes.....	23
1.2. Choix des lignes.....	24
1.3. Choix des items.....	25
1.4. Choix de la cotation.....	26
1.5. Choix du support.....	27
2. Une proposition de tâche basée sur des aspects purement théoriques.....	27
3. Une utilisation possible de la tâche dans un but de dépistage.....	28
Conclusion.....	29
Bibliographie.....	30
Liste des annexes.....	35
Annexe n°1 : Triple code (Dehaene, 1992).....	35

<u>Annexe n°2 : Modèle développemental de Von Aster et Shalev (Von Aster & Shalev, 2007)</u>	<u>35</u>
<u>Annexe n°3 : Exemples de lignes numériques.....</u>	<u>35</u>
<u>Annexe n°4 : Tableau des tests concernant les mathématiques.....</u>	<u>35</u>
<u>Annexe n°5 : Tableau des épreuves d'estimation sur ligne numérique.....</u>	<u>35</u>
<u>Annexe n°6 : Propositions d'items pour chaque ligne numérique.....</u>	<u>35</u>

Introduction

Le champ de compétence de l'orthophonie comprend le bilan de la dyscalculie et des troubles de la cognition mathématique. Ce dernier est obligatoire avant toute prise en soin et sert de base à celle-ci (Union Nationale des Caisses d'Assurance Maladie et Fédération Nationale des Orthophonistes, 2017). Le fonctionnement de la cognition mathématique a été décrit au sein des approches cognitives, à travers plusieurs modèles, notamment le modèle du triple code de Dehaene (1992) et le modèle développemental de Von Aster et Shalev (2007). Ceux-ci permettent notamment d'expliquer les troubles de la cognition mathématique par le dysfonctionnement de mécanismes précis. Cet aspect est particulièrement utile dans le cadre de l'évaluation orthophonique.

Actuellement, il existe plusieurs outils qui s'intéressent à l'évaluation des difficultés en mathématiques. Certains d'entre eux ne s'adressent pas spécifiquement à l'orthophonie, comme les échelles d'intelligence et les batteries de tests pédagogiques, et n'ont pas pour but de poser un diagnostic de troubles de la cognition mathématique. Parmi les outils dédiés à l'évaluation de ces troubles, on constate des inégalités concernant l'étendue des domaines évalués ou leurs étalonnages.

Ce mémoire s'inscrit dans un projet de création de bilan orthophonique de la cognition mathématique, élaboré à partir de modèles cognitivistes, en particulier le modèle du triple code de Dehaene (1992). Celui-ci comprend le code verbal (nombres énoncés à l'oral), le code arabe (nombres écrits en chiffres indo-arabes) et le code analogique (représentation des quantités). Ce dernier code est impliqué dans plusieurs théories concernant l'origine des troubles de la cognition mathématique : le déficit du sens du nombre (Wilson & Dehaene, 2007) et le déficit d'accès au sens du nombre (pour revue, voir Lafay et al., 2015). Nous nous sommes par conséquent intéressée à l'évaluation de ce code, et plus particulièrement de sa représentation sous forme de ligne numérique mentale (LNM ; Dehaene, 1992).

Nous avons commencé par décrire le contexte théorique dans lequel s'inscrit notre mémoire. Nous avons cherché des informations concernant le fonctionnement des compétences mathématiques et les troubles pouvant les affecter, puis nous avons détaillé les caractéristiques propres à la LNM. Pour finir, nous avons effectué des recherches concernant l'évaluation de la LNM, et plus particulièrement concernant les tâches d'estimation sur ligne numérique. Notre but était à la fois de justifier la pertinence de ces tâches d'estimation et de proposer des éléments utiles à leur conception. Pour ce faire, nous avons examiné les données de la littérature les concernant ainsi que les tâches pré-existantes au sein de précédents tests. Nous avons cherché à en extraire les caractéristiques pertinentes à la création d'une épreuve d'estimation sur ligne numérique. Enfin, nous avons proposé des éléments de présentation, concernant les lignes, les items, la cotation et le support à proposer en vue de la conception d'une future tâche. Nous avons également argumenté en faveur d'une utilisation de ce type de tâche dans un but de dépistage des troubles de la cognition mathématique.

Contexte théorique, buts et hypothèses

En premier lieu, nous avons décrit le contexte théorique dans lequel s'inscrit ce mémoire. Nous nous sommes intéressée au fonctionnement et aux dysfonctionnements des compétences mathématiques, puis nous avons détaillé le fonctionnement de la LNM avant de nous concentrer sur les tâches d'estimation sur ligne numérique. Nous avons ensuite détaillé les buts poursuivis dans ce mémoire.

1. Contexte théorique

Différents courants théoriques ont abordé le développement des compétences mathématiques. De ce fait, plusieurs définitions des troubles concernant les mathématiques ont été formulées. Parmi les hypothèses avancées dans les approches cognitives pour expliquer l'origine de ces troubles, deux s'attardent sur le sens du nombre. Ce dernier pourrait être mentalement représenté sous forme d'une LNM. Des tâches d'estimation sur ligne numérique, reprenant les caractéristiques de la LNM, ont par conséquent été utilisées dans plusieurs études.

1.1. Le fonctionnement des compétences mathématiques

Deux courants théoriques ont été représentés successivement dans les libellés de la nomenclature générale des actes professionnels. L'approche piagétienne était mentionnée jusqu'en 2017, avec le libellé du "bilan de la dyscalculie et des troubles du raisonnement logico-mathématique" (UNCAM & FNO, 2017, p. 22). L'approche cognitive lui a ensuite succédé avec le libellé du "bilan de la dyscalculie et des troubles de la cognition mathématique (UNCAM & FNO, 2017, p.22).

1.1.1. Une remise en question de l'approche piagétienne

Dans la conception piagétienne, la construction du nombre est fondée sur les compétences logiques de l'enfant, en particulier sur la classification et la sériation (pour revue, voir Fayol, 2018). Piaget évoque la notion de "raisonnement logico-mathématique". Cette conception de l'acquisition du nombre est remise en question de nos jours. En effet, elle ne parvient pas à expliquer la diversité des troubles en mathématiques, ni les compétences mathématiques précoces des enfants (pour une revue, voir Fayol, 2018). Selon l'approche piagétienne, entraîner les compétences logiques permettrait d'améliorer à la fois les compétences logiques et les compétences mathématiques. Une expérience testant cette hypothèse a été menée chez des enfants de quatre ans (Clements, 1984). Les enfants ont été répartis en trois groupes : un groupe entraîné sur les compétences logiques, un groupe entraîné sur les compétences mathématiques et un groupe contrôle. Ils ont été évalués sur leurs habiletés numériques et leurs habiletés logiques. Les groupes ayant reçu les entraînements se sont améliorés par rapport au groupe contrôle sur les deux notions. Le progrès était similaire pour les deux groupes au niveau des habiletés logiques. Toutefois, pour les habiletés numériques, les participants du groupe ayant reçu l'entraînement concernant les mathématiques se sont plus améliorés que ceux ayant reçu l'entraînement logique. Le transfert

de compétences semble se faire depuis les compétences mathématiques vers les compétences logiques, et non l'inverse. Les habiletés logiques ne seraient donc pas à la base de la construction du nombre, comme le suggérait l'approche piagétienne (Clements, 1984).

1.1.2. Les modèles de la psychologie cognitive

Plusieurs modèles ont été développés dans le cadre de la psychologie cognitive pour expliquer le fonctionnement des compétences mathématiques. Parmi eux, deux mentionnent le concept de ligne numérique mentale (LNM) : le modèle du triple code de Dehaene (Dehaene, 1992) et le modèle développemental de Von Aster et Shalev (Von Aster & Shalev, 2007).

Selon le modèle du triple code (Dehaene, 1992 ; cf. Annexe 1), les nombres seraient représentés sous trois formes : le code verbal, le code arabe et le code analogique. Chaque code est lié à des procédures d'entrée et de sortie propres : visuelle (lecture), motrice (écriture), auditive, verbale, estimation visuelle et subitizing (identification précise des petites quantités inférieures ou égales à quatre). Passer d'un code à l'autre se nomme « transcodage ». Plusieurs études de cas de patients cérébrolésés ont révélé que ces codes seraient sous-tendus par des codes cérébraux distincts. Le cortex intrapariétal serait fondamental : permettant la représentation des quantités, il sert ainsi de base aux autres compétences mathématiques (pour une revue, voir Dehaene et al., 1998). Le code verbal concerne la représentation des mots-nombres. L'entrée est verbale, orale ou écrite, de même que la sortie (Dehaene, 1992). Le code arabe concerne la représentation des nombres en écriture arabe. L'entrée se fait par la lecture de nombres arabes et la sortie par leur écriture (Dehaene, 1992). Le code analogique concerne les représentations perceptives des quantités. L'entrée se ferait par les procédures d'estimation visuelle et de subitizing. Le code analogique serait représenté mentalement sous la forme d'une ligne numérique logarithmique, orientée de gauche à droite. Les transcodages concernant ce code sont approximatifs tant qu'on ne fait pas appel aux procédures de comptage (Dehaene, 1992). Le traitement de la quantité apparaît précocement et a été constaté chez plusieurs espèces. On observe notamment deux phénomènes communs à l'humain et à l'animal : l'effet de distance (plus deux nombres sont différents, plus il est facile de les discriminer) et l'effet de taille (à distance égale, il est plus facile de discriminer de petits nombres). Ceci témoignerait de l'existence d'un système neuronal dédié au traitement du nombre qui serait essentiel à l'Homme pour développer ses capacités arithmétiques. Selon des études sur des patients cérébrolésés et d'autres utilisant l'imagerie cérébrale, le code analogique serait lié à l'activité des aires intrapariétales inférieures bilatérales (Dehaene et al., 1998). Le modèle du triple code permet donc de comprendre quels processus sont impliqués dans les épreuves de bilan en cognition mathématique. Il permet de détailler les modalités d'entrée et de sortie d'une épreuve afin de cerner quels sont les modules fonctionnels ou non. Ce modèle constitue donc un socle pour créer une batterie d'évaluation des capacités mathématiques.

Selon le modèle développemental de Von Aster et Shalev (Von Aster & Shalev, 2007 ; cf. Annexe 2), le développement de la LNM est dépendant de l'expérience. Le modèle comprend quatre étapes de développement des capacités mathématiques et fait le lien avec les aires cérébrales concernées. Dès la prime enfance, l'humain aurait accès à un système de base

traitant la quantité. Il permettrait de donner la signification aux nombres en termes de quantité. Les systèmes symboliques verbaux et arabes se développent ensuite, en période préscolaire (avant l'entrée en maternelle) pour le système verbal et scolaire pour le système arabe. Ils servent de base au développement de la LNM avec laquelle apparaît la notion d'ordinalité. Un dysfonctionnement lors d'une de ces étapes peut perturber la mise en place des étapes suivantes. Ce modèle développemental prend ainsi en compte la chronologie des acquisitions. Il permet d'affiner l'analyse des capacités mathématiques en accordant plus ou moins de poids aux différentes tâches en fonction de l'âge de l'enfant.

1.2. Les troubles de la cognition mathématique

Le bilan et la rééducation de la cognition mathématique, respectivement codés AMO 34 et AMO 10.2 dans la Nomenclature générale des actes professionnels, font partie du champ de compétence de l'orthophoniste (Union nationale des caisses d'assurance maladie, 2005). La Nomenclature générale des actes professionnels ne propose pas de définition des troubles de la cognition mathématique mais cite entre parenthèses les troubles du calcul, les troubles du raisonnement logico-mathématique et la dyscalculie. Ces termes sont issus de différents courants et ne recouvrent pas les mêmes réalités (Organisation mondiale de la santé, 2008 ; Fayol, 2018 ; American Psychiatric Association, 2013). Le développement des compétences mathématiques a été étudié par plusieurs courants depuis le XXe siècle, d'abord sous l'influence des travaux de Jean Piaget, et, plus récemment avec les apports de la neuropsychologie et des sciences cognitives (Fayol, 2018).

1.2.1. Les classifications internationales

Les troubles concernant les mathématiques apparaissent dans les classifications internationales. La Classification statistique internationale des maladies et des problèmes de santé connexes (CIM-10) propose la notion de trouble spécifique de l'acquisition de l'arithmétique (Organisation mondiale de la santé, 2008). Le Manuel diagnostique et statistique des maladies mentales (DSM-5) place les troubles affectant les mathématiques parmi les troubles spécifiques des apprentissages (American Psychiatric Association, 2013).

Selon la CIM-10, sont inclus dans le trouble spécifique de l'acquisition de l'arithmétique les troubles qui affectent spécifiquement les compétences arithmétiques et qui touchent les éléments de base du calcul, notamment la maîtrise des quatre opérations. Les difficultés liées à un retard mental global ou à une scolarisation inadéquate sont exclues du trouble.

Selon le DSM-5, les troubles affectant les mathématiques font partie des troubles spécifiques des apprentissages. Les troubles spécifiques des apprentissages sont des troubles pour lesquels il existe un décalage significatif par rapport aux performances attendues, et qui ont des répercussions sur la scolarité, la vie professionnelle ou la vie quotidienne. Ces déficits peuvent se manifester plus ou moins tardivement, selon le moment à partir duquel les exigences deviennent supérieures aux capacités mathématiques de la personne. Pour les apprentissages mathématiques en particulier, il s'agit de difficultés à maîtriser le sens du nombre, les faits arithmétiques, le calcul ou le raisonnement mathématique. Les difficultés

liées à la déficience intellectuelle, un déficit auditif ou visuel non corrigé, un trouble mental ou neurologique, des contraintes psychosociales, une mauvaise maîtrise de la langue ou un enseignement inadéquat sont exclues.

Ces deux classifications proposent des critères diagnostiques basés sur l'observation de symptômes. Elles permettent également de tenir compte du contexte global de la personne en proposant des critères d'exclusion. Toutefois, elles ne permettent pas de comprendre les causes des troubles de la cognition mathématique. Or, aller au-delà du constat de l'existence du trouble et comprendre les mécanismes et enjeux du développement des compétences mathématiques permet de proposer une rééducation efficace en ciblant les différents processus impliqués.

1.2.2. Approche piagétienne : troubles du raisonnement logico-mathématique

La notion de troubles du raisonnement logico-mathématique est issue de l'approche piagétienne. Selon cette approche, les troubles des compétences mathématiques seraient liés à un défaut de leur construction logique.

L'approche piagétienne est basée sur les éléments qui étaient observables lors de son élaboration, notamment sur des expériences de conservation des quantités. Les progrès technologiques et le développement des études sur l'acquisition des compétences mathématiques ont permis d'en montrer les limites. Les travaux issus d'autres courants, en particulier la neuropsychologie et les sciences cognitives, ont apporté un nouvel éclairage sur les troubles concernant les mathématiques.

1.2.3. Les approches cognitives

Deux grandes théories sont avancées pour expliquer les origines des troubles concernant les mathématiques d'après les connaissances actuelles. D'aucuns suggèrent que les déficits mathématiques seraient liés à des atteintes cognitives générales, d'autres qu'ils seraient liés à un déficit primaire spécifique (Schwartz & Prado, 2018). Concernant les déficits généraux, deux hypothèses sont avancées : l'origine visuo-spatiale et l'hypersensibilité à l'interférence (faits arithmétiques qui s'activeraient simultanément, perturbant le traitement de la cible).

Des études ont permis de constater un lien entre difficultés en arithmétique et faiblesse du quotient intellectuel visuo-spatial. Les cas de difficulté en arithmétique étudiés se rapprochaient de ce qui peut être observé dans un syndrome de Gertsman développemental ou dans le cas d'une dyspraxie visuo-spatiale (pour une revue, voir Schwartz & Prado, 2018). De plus, il existe un lien important entre l'espace et le nombre (Walsh, 2003). Une atteinte des fonctions visuo-spatiales pourrait avoir un impact sur la construction de la LNM (pour une revue, voir Schwartz & Prado, 2018).

L'hypersensibilité à l'interférence serait liée à des déficits généraux d'attention et de mémoire de travail (De Visscher et al., cités dans Schwartz & Prado, 2018). L'évocation d'un fait arithmétique activerait les faits arithmétiques proches. Il faudrait alors les inhiber pour obtenir le résultat voulu. Selon cette hypothèse, les difficultés en arithmétique entraîneraient des difficultés pour inhiber les autres résultats (pour une revue, voir Schwartz & Prado, 2018).

Les personnes avec des difficultés en mathématiques seraient particulièrement sensibles à ces interférences. Toutefois, cette hypothèse ne se vérifie pas sur l'ensemble des cas de dyscalculie étudiés. Plusieurs profils de troubles mathématiques se dégagent (De Visscher & Noël, cités dans Schwartz & Prado, 2018).

Deux hypothèses sont également avancées concernant l'existence d'un déficit primaire spécifique : le déficit du sens du nombre et le déficit d'accès aux représentations numériques mentales. Selon l'hypothèse du déficit du sens du nombre, les représentations des quantités seraient altérées chez les personnes avec troubles mathématiques (Wilson & Dehaene, 2007). Chez les personnes avec troubles mathématiques, on observe à la fois des déficits du système numérique précis, sur les petites quantités, et du système numérique approximatif, sur les grandes quantités, lorsqu'il s'agit de représentations analogiques (Lafay et al., 2015). Dans d'autres études, les enfants avec troubles mathématiques sont capables de manipuler les quantités sous forme analogique et sont en difficulté sur les mêmes exercices utilisant des nombres symboliques. Ces résultats sont en faveur d'un déficit d'accès au sens du nombre via les codes symboliques, plutôt qu'un déficit du sens du nombre (pour une revue, voir Lafay et al., 2015). Ainsi, plusieurs hypothèses coexistent pour expliquer l'origine des troubles mathématiques. La diversité de ces hypothèses est liée à la diversité des profils de troubles mathématiques que l'on peut observer. Ceci permet de supposer qu'il y aurait plusieurs profils de troubles : des troubles primaires, liés à un déficit du sens du nombre ou d'accès au sens du nombre, et des troubles secondaires à des processus cognitifs plus généraux (Schwartz & Prado, 2018).

1.3. La ligne numérique mentale

Les nombres sont liés aux grandeurs physiques (Walsh, 2003). La ligne numérique mentale (LNM), présentée dans le modèle du triple code de Dehaene et dans le modèle développemental de Von Aster et Shalev, fait le lien entre espace et nombres. Elle serait la base du code analogique (Dehaene, 1992) et se développerait avec l'acquisition des codes symboliques (Von Aster & Shalev, 2007). Les nombres y seraient associés à l'espace en se répartissant sur une LNM horizontale, orientée de gauche à droite, avec une perte de la précision des représentations numériques pour les plus grands nombres (Dehaene, 1992).

1.3.1. L'espace et le nombre

On observe des liens entre l'espace et le nombre à travers plusieurs phénomènes : l'effet SNARC, l'effet de distance, l'effet de taille et la pseudo-négligence. Ces phénomènes ont été rapprochés de la LNM.

L'effet de distance s'observe dans les tâches de comparaison de nombres. Plus deux grandeurs sont numériquement éloignées, plus elles sont faciles à comparer. Cet effet s'observe pour les quantités sous formes analogiques et symboliques. Les nombres sous forme symboliques seraient convertis mentalement en format analogique, sous forme de ligne numérique. (Dehaene et al., 1998). L'effet SNARC s'observe lors des tâches de jugement de parité. Une personne doit juger si un nombre est pair ou impair en appuyant avec sa main droite ou gauche selon la réponse. Un petit nombre favorise une réponse rapide de la main

gauche tandis qu'un grand nombre favorise une réponse rapide de la main droite. Ce phénomène a été associé à une orientation gauche-droite de la ligne numérique (Dehaene et al. cités dans Fischer et al., 2016). L'effet de taille s'observe dans les tâches de comparaison de nombres. À distance égale entre deux nombres, comparer de petites quantités est plus simple que de comparer de grandes quantités. Les petites quantités seraient donc représentées plus précisément que les grandes (Dehaene et al., 1998). Ce phénomène est cohérent avec une LNM logarithmique (Dehaene, 1992). La pseudo-négligence est un biais qui induit un décalage significatif vers la gauche lors des tâches de bissection de lignes ou de nombres (Longo & Lourenco, 2010). Ce biais est influencé par les nombres. Il augmente lorsque les nombres sont donnés en ordre décroissant (Thomas et al., 2015). Dans le modèle ATOM (A theory of magnitude), l'existence d'un traitement commun entre différents types de magnitudes (temps, espace et quantité) est proposé (Walsh, 2003). D'autres grandeurs comme le poids (Holmes & Lourenco, 2013) ou l'intensité des émotions (Holmes & Lourenco, 2011) pourraient également être représentées selon le modèle de la LNM. Ces éléments témoignent de l'existence d'un lien entre l'espace et le nombre, qui peut être représenté sous forme de ligne numérique logarithmique orientée de gauche à droite.

1.3.2. Une part innée et une part acquise

Commune à plusieurs espèces, la LNM comporterait une part innée (Rugani et al., 2015 ; Triki & Bshary, 2018). Elle apparaîtrait précocement chez l'humain (Di Giorgio et al., 2018) et serait par ailleurs sous-tendue par un substrat anatomique identifiable (Walsh, 2003). Des indices témoignant de l'existence d'une LNM ont été observés chez les animaux. Les poussins, par exemple, associent les petits nombres au côté gauche et les grands nombres au côté droit (Rugani et al., 2015). Cette organisation n'apparaît toutefois pas chez toutes les espèces. Certains poissons sont ainsi capables de discriminer des quantités sans qu'on puisse constater l'existence d'une LNM. Les poissons nettoyeurs (*labroides dimidiatus*) sont ainsi capables de discriminer des quantités de deux, cinq et huit éléments mais ne les associent pas préférentiellement avec un côté de l'espace (Triki & Bshary, 2018). Une organisation mentale des quantités sur le modèle de la LNM semble ainsi partagée par une partie des vertébrés.

L'organisation de la quantité selon une LNM a été constatée chez des nouveau-nés de quelques heures. Dans cette expérience, ces nouveau-nés associent les nombres à un côté ou l'autre selon leur magnitude. Cette association est relative. Les nouveau-nés sont habitués à une quantité qui leur sert de référence. Les quantités qui leur sont ensuite présentées sont associées au côté gauche (petit nombre) ou au côté droit (grand nombre) par rapport à cette première référence. Les nouveau-nés auraient déjà une représentation spatiale des quantités organisée de gauche à droite, sur le modèle de la LNM (Di Giorgio et al., 2018).

Le système de traitement commun aux différentes magnitudes cité dans le modèle ATOM serait lié au cortex pariétal inférieur (Walsh, 2003). L'existence de la LNM à travers les espèces, chez les nouveau-nés et la présence d'un substrat anatomique identifiable montrerait qu'elle est au moins en partie innée. Des indices indiquent également que la représentation de la LNM se développe et s'affine avec l'âge.

La précision de l'estimation dépend de l'importance de l'intervalle considéré et de l'âge. Un nombre est interprété plus rapidement dans une plage de nombres plus restreinte (Pinhas et al., 2013). Des paires de nombres se suivant (ex. 11-12) ont été présentées soit dans un contexte de petite plage de nombres (entre 10 et 19), soit dans un contexte de grande plage de nombre (entre 10 et 39). Une même paire était comparée plus rapidement en contexte de petite plage de nombres. Une plage plus restreinte permettrait une meilleure représentation des nombres sur la LNM (Pinhas et al., 2013).

On observe une linéarisation de la LNM avec l'âge. Lorsqu'on propose une tâche d'estimation sur ligne numérique bornée par 0 et 100 à des enfants de maternelle, CP et CE1, les estimations des enfants de maternelle suivent un modèle logarithmique, celle des enfants de CE1 un modèle linéaire et celle des enfants de CP sont entre les deux types de modèles. Le même phénomène est observé chez des enfants plus âgés et des adultes sur des lignes 0-1000 (Siegler & Booth, 2004). La LNM passerait donc d'une représentation logarithmique à une représentation linéaire avec le temps. L'amélioration des performances dans la tâche d'estimation sur ligne numérique ne serait toutefois pas uniquement due à une évolution des représentations des magnitudes, mais également à un développement des stratégies d'estimation. Les enfants apprendraient à se servir de points de repères sur la ligne numérique pour améliorer leurs performances (Luwel et al., 2019).

La borne minimale de la LNM, chez un adulte tout-venant, semble être le zéro (Pinhas & Tzelgov, 2012). Il serait toutefois possible de représenter les nombres négatifs sur la LNM lorsque ceux-ci sont pris en compte dans leur globalité. En fonction de leur présentation, les nombres négatifs peuvent être traités selon leur valeur absolue et représentés de la même manière que les nombres positifs, ou être traités dans leur globalité et être représentés à gauche du zéro sur la LNM (Zhang & You, 2012). On peut également observer un effet SNARC cohérent avec une représentation des nombres négatifs sur la LNM. Selon que le nombre est précédé du signe positif ou négatif, le temps de réponse associé à chaque main change. Ainsi, les grands nombres amorcés par un signe négatif sont associés à une réponse rapide de la main gauche et les petits nombres à une réponse rapide de la main droite, contrairement à ce qui est obtenu avec des nombres positifs (Tse & Altarriba, 2010). Ainsi, on constate que la LNM s'étend et se précise avec l'âge de façon à faciliter le traitement des petits, puis des grands nombres, voire des nombres négatifs.

1.3.3. Facteurs influençant la LNM

Plusieurs facteurs contribueraient au développement de la LNM, notamment les aspects sensoriels (vue, ouïe, toucher), moteurs et culturels. Il est également possible d'agir consciemment sur le développement de la LNM avec des exercices visant à faire le lien entre les représentations symboliques et analogiques (Meyer, 2015 ; Vilette et al., 2010 ; Eyler et al., 2018).

L'implication de la vue (Crollen & Collignon, 2016), de l'ouïe (Roux, 2014) et du toucher dans le développement de la LNM est débattue. Concernant la vue, des indices permettent de penser que l'organisation de la LNM est similaire chez les personnes voyantes et non-voyantes (Crollen & Collignon, 2016). On peut par exemple observer le même

phénomène de pseudo-négligence chez les personnes non-voyantes que chez les personnes voyantes. Le décalage dans les tâches de bissection de ligne peut être affecté par l'énonciation de nombres à l'oral de la même façon dans les deux cas (Cattaneo et al., 2010). D'autres expériences montrent des incohérences avec l'organisation classique de la LNM chez les personnes non voyantes, ce qui indiquerait que la vue joue un rôle dans sa construction (Pasqualotto et al., 2014).

Concernant l'ouïe, les représentations des nombres des adolescents et adultes non-entendants semblent similaires à celles des personnes normo-entendantes. Leurs estimations sur la ligne numérique sont toutefois moins précises, en particulier pour les grands nombres (Roux, 2014). On dispose de peu de données concernant le développement de la LNM chez l'enfant sourd. Selon des études récentes, il n'y aurait pas de différences de développement des capacités mathématiques entre les enfants sourds scolarisés en milieu ordinaire et les enfants normo-entendants (Brisset et al., 2017). Seuls les enfants sourds scolarisés en milieu spécialisé présenteraient un retard dans l'acquisition des capacités mathématiques. Le développement des capacités mathématiques serait donc lié à l'environnement culturel plutôt qu'aux capacités auditives (Brisset et al., 2017).

Les conclusions concernant le sens du toucher varient en fonction des études. Selon les études, le sens du toucher ne favoriserait pas le développement de la LNM, contrairement à la modalité visuelle (Gimbert et al., 2013), ou contribuerait à améliorer les représentations mentales des quantités (Gimbert, 2016).

Il n'existe pas de consensus sur le rôle des différentes modalités sensorielles dans le développement de la LNM. La vue semble jouer un rôle important contrairement à l'ouïe. On ne dispose pas de conclusions claires concernant le rôle du toucher dans le développement de la LNM. La LNM et les mouvements du corps s'influencent mutuellement à petite (partie du corps) et grande (corps entier) échelle, voire contribuent à la construction de la LNM (Patro et al., 2016). Le mouvement de certaines parties du corps peut influencer et être influencé par la LNM. Les mouvements oculaires ont une influence sur le déplacement de l'attention le long de la LNM et sur la réalisation d'opérations mathématiques (Marc et al., 2016). Ils sont influencés par l'écoute de nombres de façon cohérente avec le modèle de la LNM (Myachykov et al., 2016).

Les mouvements digitaux peuvent également être affectés par la LNM (Sheridan et al., 2017). Le sens du comptage sur les doigts semble avoir une influence sur la construction de la LNM. Après un entraînement où il a été demandé à des enfants de compter de gauche à droite ou de droite à gauche, on observe un effet SNARC classique ou atténué, ce qui peut refléter une modification du sens de la LNM (Pitt & Casasanto, 2014).

Les mouvements globaux du corps, actifs (mouvements volontaires comme la marche) (Shaki & Fischer, 2014 ; Fischer et al., 2016) ou passifs (mouvements imposés au corps) (Hartmann et al., 2012) permettent d'influencer la perception des nombres ou d'influer sur le mouvement par les nombres de façon cohérente avec la LNM.

Des études ont permis d'observer l'influence de différents facteurs culturels sur la construction de la LNM, notamment celle du sens de lecture, de la langue et du système éducatif. Le sens de la lecture semble avoir un effet sur la construction de la LNM. L'effet SNARC serait plus modéré, voire inversé, chez les personnes lisant de droite à gauche (Dehaene et al., 1993). Ceci indiquerait que le sens de lecture a une influence sur la direction de la LNM. Ces résultats ne sont toutefois pas retrouvés dans toutes les études. D'aucuns proposent que le sens de lecture aurait une influence sur la ligne temporelle mentale mais pas sur la LNM (Pitt & Casasanto, 2016).

La langue peut également influencer le développement de la LNM. Certaines langues ont un système de numération plus transparent que d'autres. Par exemple, en français, on doit apprendre un certain nombre de mots (de zéro à neuf, les dizaines, les particuliers entre onze et seize, puis de soixante-dix à quatre-vingt-dix) pour pouvoir former l'intégralité des nombres. D'autres langues, comme le chinois, ont une structure plus régulière (par exemple, on ne dit pas onze, douze, treize, mais dix-un, dix-deux, dix-trois). Ces langues, où le système de numération est transparent, favoriseraient le développement des premiers concepts mathématiques (Ng & Rao, 2010). Les performances des enfants parlant chinois sur des épreuves d'estimation sur ligne numérique seraient comparables à celles d'enfants américains anglophones plus âgés d'un an (Laski & Yu, 2014).

Le système éducatif pourrait toutefois avoir une plus grande importance que la langue dans le développement de la LNM. Dans une tâche d'estimation sur ligne numérique, les enfants parlant chinois et scolarisés en Chine ont de meilleurs résultats que les enfants parlant chinois scolarisés aux États-Unis (Laski & Yu, 2014). Les différences de système éducatif peuvent influencer la construction de la LNM.

Des facteurs culturels peuvent avoir des conséquences sur le développement de la LNM : le sens de lecture a une influence sur la direction de la LNM, la langue et le système éducatif ont une influence sur sa précision. Des recherches ont donc été menées pour voir s'il était possible de favoriser le développement de la LNM, notamment à des fins éducatives et rééducatives. L'utilisation de tâches d'estimation sur ligne numérique a été envisagée dans le domaine scolaire. Ces exercices permettraient de faire le lien entre les différentes représentations numériques. De cette façon, les enfants auraient une meilleure représentation de la quantité incluse dans les nombres symboliques (Vilette et al., 2018). Chez des enfants au développement typique, les activités sollicitant le système numérique approximatif permettent d'améliorer la précision des estimations sur ligne numérique et les compétences arithmétiques (Meyer, 2015). Un entraînement impliquant des tâches d'estimation sur ligne numérique et du calcul mental a permis d'obtenir des améliorations dans ces deux domaines chez des enfants tout-venant âgés de dix et onze ans (Vilette et al., 2010). Des améliorations sont également possibles dans une certaine mesure chez les adultes. Lors d'une étude, des tâches d'estimation sur ligne numérique ont été proposées à des adultes tout-venants. Ils bénéficiaient d'un retour sur leurs estimations après chaque essai. Les adultes avec un niveau d'éducation bas ont amélioré leurs performances, contrairement aux adultes ayant suivi un cursus dans l'enseignement supérieur. Les performances de ces derniers étaient probablement proches de leur pic individuel avant l'entraînement. Cette différence entre les progrès des deux groupes

pourrait être lié à l'importance des facteurs éducatifs dans le développement des compétences mathématiques (Eyler et al., 2018).

Au-delà du domaine scolaire, améliorer les représentations de la LNM serait ainsi possible chez des enfants présentant des troubles de la cognition mathématique. Les entraînements impliquant des tâches d'estimation sur ligne numérique permettraient de réduire les dysfonctionnements au niveau pariétal qui sont impliqués dans les troubles de la cognition mathématique (Kucian et al., 2011). Après entraînement, des améliorations en précision et en temps de réponse sont observées dans les tâches d'estimation sur ligne numérique (Marcon & Lafay, 2019). L'entraînement par estimation sur ligne numérique semble également efficace pour améliorer le lien entre code symbolique et code analogique chez les enfants présentant une trisomie 21 (Meyer, 2015). Par conséquent, proposer des tâches d'estimation sur ligne numérique contribuerait au développement de la LNM, en particulier chez les enfants issus de milieux socio-culturels défavorisés et chez les personnes avec troubles de la cognition mathématique.

1.3.4. LNM et autres domaines mathématiques

Le développement de la LNM est lié à celui des autres compétences mathématiques (Schneider et al., 2018). Des liens ont été observés avec la maîtrise des quatre opérations. Des auteurs proposent que les résultats des opérations ne seraient pas récupérés en mémoire à long terme mais seraient le résultat de procédures automatisées inconscientes de comptage sur une LMN (Thévenot, 2018). Ces procédures de comptage automatisées concerneraient les additions et les soustractions (Thévenot, 2018). On observe notamment une tendance à sous-estimer les résultats des soustractions, que l'on associerait au côté gauche, et à sur-estimer le résultat des additions, que l'on associerait au côté droit chez des enfants de trois à cinq ans (Haman & Lipowska, 2020). Un déplacement sur la LNM a également pu être observé chez des adultes pour des opérations de calcul mental complexes (Montefinisse & Semenza, 2018). Des entraînements impliquant des tâches d'estimation sur ligne numérique ont permis de constater une amélioration de la maîtrise de l'addition et de la soustraction chez des enfants tout-venant (Vilette et al., 2010).

Concernant le traitement des fractions et des multiplications, les conclusions des études sont moins tranchées. Selon certains, l'existence d'un traitement automatique des fractions sur une LNM ne peut pas être confirmé (Meert, 2010). Plus récemment, des effets de distance ont été trouvés concernant les fractions, ce qui suggérerait que les fractions seraient représentées sur la LNM (Ganor-Stern, 2012). Une étude propose une explication à ces résultats contradictoires. Lors d'une tâche de jugement, des étudiants devaient indiquer si une fraction était plus ou moins grande qu'une fraction de référence en répondant soit avec leur main droite, soit avec leur main gauche. Lorsque seul le dénominateur varie, on observe un effet de distance qui porte uniquement sur le dénominateur et un effet SNARC inversé. Quand on fait varier à la fois le numérateur et le dénominateur, un effet SNARC classique est constaté. En forçant la personne à traiter la fraction dans sa globalité, les valeurs des nombres et des fractions seraient associées à l'espace selon un processus commun (Toomarian & Hubbard, 2018).

Des indices permettent de suggérer l'existence d'un lien entre la connaissance des faits multiplicatifs et la LNM (Reinert et al., 2015). Une tâche d'estimation sur ligne numérique non bornée a été proposée à des étudiants. Il s'agit de placer un nombre sur une ligne numérique en ayant représenté la longueur d'une unité. Ici, la valeur de l'unité de référence est variable (par exemple, sur certaines lignes était représentée une certaine longueur qui valait une unité, sur d'autres une longueur qui valait quatre unités). Les résultats montrent que l'estimation est plus rapide lorsqu'il s'agit de placer un nombre multiple de l'unité de référence sur la ligne numérique (Reinert et al., 2015).

On observe un lien fort entre la LNM et la maîtrise des opérations d'addition et de soustraction. La division est également liée à la LNM car les fractions y sont représentées. Le lien entre la multiplication et la LNM a été moins étudié, mais des indices suggèrent une interaction entre les faits arithmétiques multiplicatifs et la LNM. De ce fait, la LNM lie la représentation analogique (l'espace) avec des représentations symboliques (nombre sous forme verbale ou arabe). Cette représentation innée de la quantité s'affine ensuite avec les expériences sensorielles, motrices et culturelles. Elle constitue un socle pour la formation des premiers concepts mathématiques et se développe en interaction avec d'autres concepts mathématiques, en particulier la maîtrise des opérations.

1.4. Évaluation de la ligne numérique mentale

En tant que représentation du code analogique (Dehaene, 1992), la LNM occuperait une place importante dans le cadre de la construction de la cognition mathématique. En effet, le code analogique est au centre de deux théories concernant l'origine des troubles de la cognition mathématique : l'hypothèse du déficit du sens du nombre (Wilson et Dehaene, 2007) et l'hypothèse du déficit d'accès au sens du nombre (pour une revue, voir Lafay et al., 2015). Par conséquent, l'évaluation de la LNM nous paraît pertinente à intégrer dans un bilan orthophonique de la cognition mathématique. Nous nous sommes ainsi penchée sur les méthodes d'évaluation en orthophonie, en particulier sur la notion de tests psychométriques, et sur les tâches d'estimation sur ligne numérique, dédiées à l'évaluation de la LNM.

1.4.1. L'évaluation des troubles en orthophonie : les tests psychométriques

Les tests sont des épreuves psychométriques, c'est-à-dire des moyens de mesure, utilisés notamment en psychologie, pour contribuer à la pose d'un diagnostic (Godfryd, 2011). Pour cela, on compare les résultats d'une personne sur une tâche à une norme, c'est-à-dire aux résultats d'un ensemble de personnes représentatif d'une population à cette même tâche (Seron, 2002). Un test psychométrique repose sur plusieurs qualités : la fidélité, la sensibilité et la validité. Il peut également être affecté par un certain nombre de biais (Rusinek, 2018).

La fidélité est la qualité d'un test qui permet à un individu d'obtenir toujours les mêmes résultats à ce test (Rusinek, 2018). Elle s'apprécie par la mesure de la cohérence entre les items, les variations inter-juges, la stabilité des résultats dans le temps et en établissant une marge de confiance dans les résultats (Hutchinson, 1996). La sensibilité est la capacité d'un test à différencier les performances des individus. La validité est la capacité d'un test à mesurer ce qu'il est censé mesurer. Elle dépend de la nature des questions et des

comparaisons à la population de référence (Rusinek, 2018). Elle se décline en validité concurrente (accord entre les résultats du test et ceux d'une autre source), validité théorique (adéquation entre les résultats du test et ce qu'il est censé mesurer), validité interne (vérification que les items sont corrélés entre eux et impliquent des réponses cohérentes) (Rusinek, 2018). On peut notamment l'apprécier en observant l'adéquation entre les objectifs du test et les modèles sur lesquels sont construits les tâches (Hutchinson, 1996) et en vérifiant l'exhaustivité des items.

Les principaux biais auxquels sont soumis les tests psychométriques sont les biais de mensonge, de désirabilité sociale (volonté de l'individu de se montrer sous son meilleur jour), de compréhension (besoin de certaines compétences préalables pour comprendre la tâche), de fatigue (perte de concentration en cas de test long), de comorbidité (mesure d'éléments communs à différents troubles), d'évaluateur (dont l'attitude peut modifier la réponse de la personne évaluée) et culturels (Rusinek, 2018).

Ces qualités psychométriques sont évaluées à partir des résultats obtenus lors de l'étalonnage. Il est nécessaire d'y réfléchir lors de la conception des épreuves pour limiter les risques de biais de la tâche.

1.4.2. Les tâches d'estimation sur ligne numérique

Les tâches d'estimation sur ligne numérique ont été utilisées pour évaluer le fonctionnement de la LNM dans de nombreuses études (Schneider et al., 2018). Celles-ci ont permis de constater une corrélation positive ($r = .443$ pour des enfants de 4 à 14 ans) entre les tâches d'estimation sur ligne numérique et les compétences mathématiques globales (Schneider et al., 2018). Ce type de corrélation avait déjà été observé pour d'autres types de tâches impliquant le code analogique ($r = .24$ ou $.30$ selon les études sur des tâches de comparaison de quantités). La force de cette corrélation serait plus importante dans le cas des tâches d'estimation sur ligne numérique. Il s'agit toutefois d'un lien de corrélation, qui ne renseigne pas sur la causalité du phénomène. Les auteurs suggèrent tout de même que ce lien pourrait signifier que la maîtrise des compétences mathématiques serait liée à l'utilisation d'une LNM linéaire. L'utilisation de tâches d'estimation sur ligne numérique pourrait être prédictive des compétences mathématiques globales de l'enfant.

2. Buts

Au cours de ce mémoire, nous avons réfléchi aux éléments de construction d'une épreuve permettant l'évaluation de la LNM. Dans un premier temps, nous avons cherché à justifier la pertinence de ce type d'épreuve. L'objectif de ce mémoire était également de déterminer les différents paramètres nécessaires à la construction d'une épreuve évaluant la LNM et d'en proposer un exemple.

Dans un premier temps, nous avons souhaité apporter des arguments en faveur de l'évaluation de la LNM par des épreuves d'estimation sur ligne numérique. Ces arguments avaient pour but de justifier l'utilisation d'épreuves d'estimation sur ligne numérique dans le

cadre des bilans orthophoniques. Il s'agissait également de montrer les éventuelles lacunes des épreuves existantes pour justifier la création d'une nouvelle tâche d'estimation sur ligne numérique.

Nous avons ensuite souhaité dégager les caractéristiques pertinentes pour la création d'une tâche d'estimation sur ligne numérique. Notre but était, à partir de ces caractéristiques, de proposer des éléments pour créer une tâche utile au dépistage ou au diagnostic des troubles de la cognition mathématique. Nous n'avons pas cherché à créer concrètement cette tâche, mais à fournir suffisamment d'éléments pour faciliter la création de cette tâche par la suite.

Méthode

Pour proposer une tâche d'estimation sur ligne numérique, deux étapes préliminaires semblaient importantes. D'abord, il s'agissait de déterminer les caractéristiques de l'épreuve, à la fois les caractéristiques générales pour construire une épreuve valable sur le plan psychométrique (ex. nombre d'items minimum) et les caractéristiques plus spécifiques à la LNM. Ensuite, il semblait pertinent de chercher les épreuves similaires pour observer ce qui existait déjà, ce qui pouvait manquer à ces épreuves et ce que nous ont appris leurs étalonnages.

1. Recherche des épreuves existantes

Nous avons commencé par rechercher les épreuves existantes concernant l'évaluation des compétences mathématiques. Ce travail a été réalisé en groupe, en coopération avec d'autres étudiants travaillant sur le projet de création d'un bilan orthophonique en cognition mathématique. À partir des tests mis à notre disposition en testothèque, nous avons répertorié différents éditeurs ayant proposé au moins une épreuve évaluant les compétences mathématiques. Nous avons ensuite consulté la liste des publications de ces maisons d'édition afin de compléter notre liste de tests évaluant les compétences mathématiques.

Après avoir établi cette liste, nous avons cherché à extraire certaines informations des manuels de ces tests. Nous avons commencé par classer ces tests en fonction de leur domaine d'évaluation. Ces tests n'étaient en effet pas tous des tests orthophoniques dédiés à l'évaluation des compétences mathématiques. Nous avons également relevé des questionnaires, des échelles d'intelligence et des batteries généralistes. Pour chacun de ces tests, nous avons ensuite cherché à isoler des données générales qui nous semblaient pertinentes pour appréhender le contenu de ces tests. Nous avons ainsi choisi de préciser le nom des tests, leurs auteurs, la tranche d'âge à laquelle s'adresse le test, l'éditeur, la date de parution, le champ théorique auquel se rattache le test et la modalité de passation (papier ou informatique). Nous avons ensuite relevé les tests comportant des tâches pertinentes pour chacun de nos mémoires respectifs.

Pour notre part, nous avons relevé trois tests comportant au moins une épreuve d'évaluation de la LNM. Nous avons ensuite détaillé ce qui caractérisait ces épreuves

d'estimation sur ligne numérique. Nous avons commencé par décrire ces épreuves, la forme sous laquelle elles se présentaient, leur nombre d'items et leur répartition. Nous avons également recensé des informations relatives à l'étalonnage de ces épreuves, notamment la constitution des différents groupes (effectifs, âge, niveau scolaire) et les résultats obtenus aux différentes épreuves. Enfin, nous avons répertorié les différentes mesures utilisées (précision et temps). Ces informations ont été utilisées par la suite pour déterminer les caractéristiques utiles à l'élaboration d'une tâche d'estimation sur ligne numérique.

2. Caractéristiques d'une tâche d'estimation sur ligne numérique

Nous avons cherché dans un premier temps à déterminer les caractéristiques générales des tests psychométriques pour avoir une trame globale autour de laquelle structurer la tâche d'estimation sur ligne numérique. Cette trame nous a essentiellement permis de déterminer le nombre d'items, leur nature et le mode cotation adapté.

2.1. Caractéristiques générales d'une épreuve pertinente sur le plan psychométrique

Pour optimiser les qualités psychométriques d'une tâche, nous avons réfléchi à plusieurs éléments lors de la conception de celle-ci, notamment à la présentation de l'épreuve et au choix des items.

La présentation de la tâche, qui comprend la consigne, la présentation des items et le recueil des réponses, peut avoir des conséquences sur la fidélité. Il semble important que la consigne soit claire, tant pour l'évaluateur que pour la personne évaluée, afin de limiter les variations dans les résultats liés à une mauvaise compréhension de la consigne. La formulation doit être compréhensible par l'enfant et présentée sous une forme accessible (ex. pas de consigne uniquement écrite pour des enfants de niveau CP ou moins). La présence d'items d'exemples peut contribuer à la meilleure compréhension de la tâche.

La présentation des items doit également être adaptée aux compétences de l'enfant. Il faut qu'il ait la possibilité de comprendre l'item (ex. pas de présentation de nombres sous forme de code verbal écrit avant le CP). Le moyen de réponse doit également permettre de limiter le risque d'erreur qui ne serait pas directement lié à la tâche. On privilégiera plutôt les réponses à choix fermé, qui facilitent la cotation, avec une présentation la plus claire possible. Le nombre d'items doit être suffisant pour balayer l'ensemble de la compétence évaluée et ainsi améliorer la validité du test. Leur nombre ne doit toutefois pas être trop important en raison du biais de fatigabilité. Dans le cadre de la construction d'une épreuve, il semble préférable de choisir un nombre relativement élevé d'items. Une sélection pourra ensuite être effectuée au sein de ces items après présentation de l'épreuve à un premier échantillon de personnes. Les items doivent également être variés pour améliorer la fidélité du test. Il est nécessaire d'avoir différents niveaux de difficulté afin d'éviter les effets plafond et plancher.

Il est possible d'anticiper la difficulté des items en faisant le lien avec le développement de la compétence évaluée chez l'enfant.

La méthode de cotation du test peut avoir une influence sur la fidélité. Il s'agit d'utiliser une méthode permettant de limiter les erreurs de mesure lors de la cotation du test. Pour cela, nous avons vu que nous pouvions envisager de limiter le nombre de réponses possibles (ex. choix multiple), de détailler les consignes de cotation ou d'automatiser la cotation grâce à un support informatisé.

Pour que les qualités psychométriques de l'épreuve soient suffisantes, il faudra une consigne accessible au niveau de l'enfant, potentiellement soutenue par des items d'exemples, des items suffisamment nombreux et variés, qui ne nécessitent pas de réponses ouvertes et dont la cotation ne soit pas ambiguë.

2.2. Caractéristiques pertinentes d'une épreuve centrée sur l'évaluation de la ligne numérique mentale

De nombreux articles scientifiques abordent le sujet de la LNM et la tâche d'estimation sur ligne numérique a été fréquemment utilisée (Schneider et al., 2018). Les données disponibles ont permis de nous orienter sur les choix à faire concernant la présentation de la ligne numérique, le choix des items et les méthodes de cotation.

2.2.1. Présentation de la ligne numérique

Nous avons commencé par répertorier les caractéristiques de la LNM utiles à l'élaboration des lignes elles-mêmes. Nous avons également examiné les tâches d'estimation sur ligne numérique proposées dans la littérature. Notre démarche est précisée ci-dessous.

La LNM serait spontanément représentée sous forme de ligne horizontale, orientée de gauche à droite. De ce fait, la majorité des études sur la LNM utilisent des lignes numériques correspondantes. Il serait toutefois possible pour les enfants de se représenter les nombres dans l'espace à la fois sur des lignes numériques verticales et horizontales (Simms et al., 2013). Toutefois, les enfants plus jeunes éprouveraient des difficultés à estimer précisément les nombres sur des lignes verticales. Dans le cas où le même type de ligne devrait également servir pour des enfants de moins de six ans, il semble plus pertinent d'utiliser des lignes horizontales dans le cadre d'une tâche d'estimation sur ligne numérique. Des éléments culturels peuvent également avoir une influence sur la direction de la LNM, comme le sens de lecture (Dehaene et al., 1993). Pour une tâche d'estimation sur ligne numérique prévue pour un public dont le sens de lecture est orienté de gauche à droite, il semble plus pertinent de conserver cette même orientation.

Deux types de tâches d'estimation sur ligne numérique ont pu être répertoriés (cf. annexe 3) : ligne numérique bornée et ligne numérique non bornée (Schneider et al., 2018). Pour les tâches de lignes numériques bornées, la ligne est délimitée par deux points de repères : l'origine de la ligne (généralement zéro) et une borne de fin (généralement cent ou mille). C'est le type de ligne le plus fréquemment utilisé. Dans le cas des lignes numériques non

bornées, seule l'origine de la ligne (généralement zéro) est précisée et une unité est matérialisée afin de donner un point de repère pour effectuer une estimation. On peut également observer deux variantes dans les consignes des tâches d'estimation sur ligne numérique (Schneider et al., 2018). Il peut soit être demandé de placer un nombre, donné sous forme symbolique, sur une ligne numérique (nombre vers position), soit de donner un nombre correspondant à une position déjà indiquée sur la ligne (position vers nombre).

D'autres éléments de présentation varient encore en fonction des études comme le support de présentation de la tâche (papier ou numérique), la longueur des lignes, le nombre d'essais par item et le code dans lequel est présenté l'item (analogique, verbal ou arabe). Parmi ces éléments, deux semblent avoir une influence importante sur la manière dont l'épreuve est perçue par les participants : la présentation de la ligne sous forme bornée ou non bornée et le code dans lequel sont présentés les items. Ces deux éléments auraient une influence significative sur la force du lien de corrélation entre la tâche d'estimation sur ligne numérique et le reste des compétences mathématiques (Schneider et al., 2018).

Le lien de corrélation entre tâche d'estimation sur ligne numérique et autres compétences mathématiques n'apparaîtrait que dans le cas des lignes bornées (Schneider et al., 2018). Des auteurs proposent que la LNM en elle-même pourrait être évaluée efficacement par les tâches d'estimation numérique sur ligne non bornée et que les deux types de présentation n'évalueraient pas la même représentation sous-jacente (Link et al., 2014). Ils concluent que la forme non bornée serait plus efficace pour évaluer la représentation de la LNM en elle-même et que ce seraient les processus numériques supplémentaires, possibles uniquement avec les lignes numériques bornées (ex. jugement de proportionnalité, utilisation de points de repères tels que le milieu de la ligne) qui feraient le lien avec les compétences mathématiques autres. La force du lien de corrélation entre tâche d'estimation sur ligne numérique et autres compétences mathématiques dépendrait du code dans lequel les items sont présentés. La corrélation serait plus importante pour la présentation en code arabe, moins importante pour la présentation en code verbal oral ou mixte, et la moins importante pour la présentation en code analogique (Schneider et al., 2018).

Les autres variations dans la présentation des tâches (support, nombre d'essais et longueur des lignes) ne semblent pas avoir d'impact majeur sur la perception de la tâche, dans la mesure où ils n'ont pas d'impact sur la force du lien de corrélation entre une tâche d'estimation sur ligne numérique et les autres habiletés mathématiques (Schneider et al., 2018).

Parmi les paramètres qui peuvent varier dans le cadre de la présentation de la tâche, on peut également citer les valeurs des bornes dans le cas des lignes numériques bornées et la valeur de l'unité de référence dans le cas des lignes numériques non bornées. Concernant les valeurs des bornes pour les lignes numériques bornées, l'interprétation d'un nombre serait facilitée par une plage de nombres restreinte (Pinhas et al., 2013). On constate une amélioration des performances sur les lignes bornées entre zéro et cent chez les enfants entre la grande section de maternelle et le CE1, puis une évolution similaire sur une ligne bornée de zéro à mille chez des enfants plus âgés et des adultes (Siegler & Booth, 2003). Il serait également possible de représenter les nombres négatifs sur la LNM (Zhang & You, 2012). Il

faudrait proposer des lignes bornées représentant des plages de nombres plus ou moins étendues selon l'âge des participants. Concernant la valeur de l'unité à représenter dans le cas de lignes numériques non bornées, on sait que les performances s'améliorent en augmentant la valeur de l'unité (Reinert et al., 2015). Dans le cas d'une ligne numérique non bornée, la difficulté du type de ligne pourrait être influencée par la valeur de l'unité de référence.

Il semble pertinent de proposer un modèle de ligne horizontal, orienté de gauche à droite dans le cadre d'une tâche d'estimation numérique. Selon l'objectif du test, la ligne numérique pourrait être présentée de différentes manières : soit avec une présentation sous forme de ligne numérique bornée, soit sous forme de ligne numérique non bornée. Selon la présentation choisie, il faudra tenir compte de différents points, à savoir les valeurs des bornes dans le cas d'une ligne numérique bornée et la valeur de l'unité de référence dans le cas d'une ligne numérique non bornée. Le code à adopter pour la présentation des items pourrait également avoir de l'importance.

2.2.2. Choix des items

Concernant le choix des items, nous avons trouvé des éléments dans la littérature scientifique qui nous ont orientée sur la modalité de présentation des items et leur répartition. Nous avons également relevé des éléments utiles pour anticiper la difficulté potentielle de ces items.

Les différents codes (analogique, verbal, arabe) sont acquis selon une certaine chronologie. Dans le cas du développement typique, l'enfant a accès à des représentations de la quantité dès la petite enfance, puis il acquiert les codes symboliques verbaux avant l'entrée à l'école et arabe après son entrée à l'école (Von Aster & Shalev, 2004). Selon son niveau scolaire, il s'appuierait plus ou moins sur l'un ou l'autre de ces codes pour réussir certaines tâches, notamment les tâches d'estimation sur ligne numérique : une présentation où l'on associe forme verbale et arabe faciliterait les estimations pour les enfants de CP et une présentation sous forme verbale seule faciliterait les estimations chez les enfants de CE2 (Meyer & Vilette, 2012). Selon l'âge de l'enfant, certaines modalités de présentation des items seraient donc plus accessibles que d'autres. Il pourrait être intéressant de présenter des items dans les différents codes symboliques, voire de proposer une modalité mixte code verbal / code arabe. Ceci pourrait aider à comprendre où en est l'enfant dans sa maîtrise des codes symboliques.

La LNM se développe et se précise avec l'âge et les expériences de l'enfant. On passe d'une représentation logarithmique à une représentation linéaire (Siegler & Booth, 2004). La différence entre les deux représentations est plus marquée sur la partie de la ligne dédiée aux petits nombres. Des auteurs proposent de sur-représenter les items concernant le tiers inférieur de la ligne pour mieux distinguer un modèle linéaire d'un modèle logarithmique (Siegler & Booth, 2004). Pour juger de la difficulté des items, on peut supposer que les petits nombres seront plus faciles à traiter que les grands nombres. L'effet de taille témoigne d'une meilleure représentation des petits nombres (Dehaene et al., 1992). Dans ce cadre, il faut tenir compte du développement de la LNM. Avec l'âge, la LNM se linéarise et la représentation des grands nombres s'affine (Siegler & Booth, 2004). La difficulté portant sur les grands nombres devrait

dépendre de l'âge de la personne concernée. Ensuite, des études permettent de constater que certaines difficultés sont propres au type de ligne numérique présenté. Pour les lignes bornées, les estimations sont facilitées pour les items proches de trois points de repères : le début, le milieu et la fin de la ligne (Link et al., 2014). Pour les lignes non bornées, l'estimation des multiples de l'unité de référence serait plus facile que l'estimation des non-multiples de cette unité (Reinert et al., 2015).

Pour varier la difficulté des items, on peut proposer différentes modalités de présentation plus ou moins facilitatrices (arabe seule, verbale seule, association des codes verbal et arabe), des variations dans l'ordre de grandeur des nombres et des items plus ou moins éloignés des points de repère liés aux différents types de lignes. Pour mieux distinguer le modèle qui sous-tend la LNM, on peut sur-représenter les items concernant le tiers inférieur de la ligne. Une fois déterminées les caractéristiques importantes concernant les tâches d'estimation sur ligne numérique, nous avons examiné les tâches déjà existantes.

3. Analyse des épreuves existantes

En fonction des caractéristiques importantes déterminées précédemment, nous avons pu analyser les tâches déjà existantes. Dans un premier temps, nous les avons listées. Pour cela, nous avons élaboré un tableau commun aux différents mémoires portant sur la création d'une batterie en cognition mathématique. Il recense les tests impliquant des tâches d'évaluation des capacités mathématiques, issus de différents courants théoriques. À partir de ce tableau, nous avons identifié lesquels de ces tests comprennent au moins une tâche d'estimation sur ligne numérique.

Après avoir listé les tâches existantes, nous avons examiné plusieurs points : d'un côté l'épreuve en elle-même, de l'autre l'étalonnage. Nous avons décrit les différentes tâches, leur présentation, leurs items et leur cotation. Après cela, nous avons confronté ces éléments aux caractéristiques déterminées comme pertinentes à la construction d'une tâche d'estimation sur ligne numérique. Nous avons ainsi pu avoir un regard critique sur les épreuves existantes et compléter notre liste de caractéristiques utiles à la création d'une nouvelle tâche d'estimation sur ligne numérique.

Nous avons ensuite examiné les étalonnages correspondant à ces tâches. Ces étalonnages ont notamment permis d'observer la répartition des résultats, ainsi que la présence d'effets plafond ou plancher. L'existence de tels effets a contribué à déterminer la difficulté de la tâche, ce qui nous a permis de comprendre à quelles tranches d'âge nous pouvions proposer une tâche d'estimation sur ligne numérique en particulier. Après avoir ainsi complété l'inventaire des caractéristiques utiles à la création d'une tâche d'estimation sur ligne numérique, nous avons pu faire une proposition de tâche concrète.

4. Proposition d'une tâche d'estimation sur ligne numérique

Suite aux constats réalisés à partir des données de la littérature et des tâches pré-existantes, nous avons proposé différents exemples de tâches d'estimation sur ligne numérique. Nous avons expliqué ce que nous pourrions souhaiter trouver concrètement au sein de cette tâche, en fonction du support choisi. Nous avons déterminé une liste des items, un exemple de feuille de réponse et une méthode de cotation. Concernant un support informatisé, nous avons cherché à expliciter ce que nous attendrions de la part d'un éventuel futur logiciel. Nous avons notamment essayé de préciser l'aspect de l'interface, une liste d'items, les mesures effectuées et la présentation des résultats pour le professionnel.

Résultats

1. Caractéristiques d'une épreuve de ligne numérique pertinente

Pour alimenter la réflexion autour de l'élaboration d'une tâche d'estimation sur ligne numérique, nous avons pris en compte les épreuves similaires utilisées dans les précédents tests s'intéressant au diagnostic de troubles dans le domaine des mathématiques. Nous en avons par la suite extrait un certain nombre de caractéristiques, puis avons émis notre propre proposition de tâche d'estimation sur ligne numérique.

1.1. Analyse des épreuves existantes

Nous avons commencé par sélectionner les épreuves visant l'évaluation de la LNM parmi les tests repérés par les différents mémorants impliqués dans le projet de création d'un bilan orthophonique de la cognition mathématique. Nous en avons ensuite extrait des éléments concernant la présentation des tâches et leur passation.

1.1.1. Sélection des épreuves à analyser

Dans un premier temps, un tableau commun aux différents mémoires impliqués dans le projet de création d'un bilan orthophonique de la cognition mathématique a été élaboré (cf. Annexe 4). Il répertorie les tests comportant des tâches auxquelles nous nous sommes intéressés dans le cadre de nos différents mémoires.

Nous avons répertorié 49 tests s'intéressant au moins partiellement à l'évaluation des compétences mathématiques pour lesquels nous avons détaillé le type de test, le nom des auteurs, la tranche d'âge concernée par le test, l'éditeur, la date de parution et la modalité de passation du test (informatisé ou papier crayon). Nous avons également précisé quels étaient les tests qui abordaient les domaines travaillés dans chacun de nos mémoires.

Nous avons classé ces tests en plusieurs catégories. Nous avons retenu 2 questionnaires, 3 échelles d'intelligence, 19 batteries générales comportant un ou plusieurs sous-tests mathématiques et 25 batteries ou tests évaluant spécifiquement les compétences mathématiques.

On peut noter que les étalonnages s'étendent des enfants de 2 ; 6 ans jusqu'à l'âge adulte. La majorité des tests concerne toutefois les enfants. On peut en effet constater que sur les 45 tests dont l'âge de la population est précisé, 33 sont au moins en partie dédiés aux moins de 18 ans contre 15 dédiés au moins en partie aux adultes. Les âges les plus représentés sont ceux des enfants de primaire et collège. Ces tests sont parus entre 1949 et 2017. La moitié d'entre eux a été publiée après 2005 et le quart après 2011. On remarque qu'il est souvent difficile de classer un test au sein d'un courant théorique précis. Sur les 49 tests répertoriés, 25 ne citent pas explicitement le courant théorique auquel ils se rattachent dans leur manuel, soit 51%. Parmi les tests restant, 15 s'inscrivent dans des courants issus de la neuropsychologie et 4 sont issus d'approches piagésiennes. Concernant les modalités de passation, la majorité des tests sont disponibles uniquement dans la modalité papier crayon (38/49, soit environ 80%). Deux tests proposent des modalités de passation mixtes et six sont exclusivement informatisés. Les tests informatisés ont tous été publiés après l'année 2000.

Parmi les 49 tests répertoriés, seuls 3 comportent au moins une tâche approchant d'une tâche d'estimation sur ligne numérique. Nous les avons regroupés et analysés au sein d'un second tableau (cf. Annexe 5). Il s'agit du Test neurocognitif pour l'apprentissage du nombre et du calcul, abrégé en Numerical (Gaillard, 2000), de la Batterie pour l'évaluation des nombres et du calcul, abrégé en Zareki-R (Von Aster & Dellatolas, 2005), et de la Batterie informatisée d'examen des habiletés mathématiques, abrégé en Examath 8-15 (Lafay & Helloin, 2016). Ces trois tests s'inscrivent dans une approche neuropsychologique et concernent les enfants. Deux de ces tests, le Numerical et le Zareki-R, respectivement édités en 2000 et 2005 peuvent être considérés comme anciens. L'examath 8-15 est le test le plus récent à utiliser des tâches d'estimation sur ligne numérique. Parmi ces trois tests, il est le seul à être informatisé.

1.1.2. Analyse des épreuves sélectionnées

Le Numerical (Gaillard, 2000) comporte deux subtests dont le principe se rapproche des tâches d'estimation sur ligne numérique : la droite à graduer et le compteur de vitesse. La droite à graduer se présente sous forme d'une ligne verticale bornée par zéro à sa base, sans autre point de repère. C'est à l'enfant de définir l'endroit où placer la borne haute (100). L'enfant place et écrit six nombres qui lui sont donnés à l'oral (50, 25, 10, 95, 33 et 75) au crayon sur la ligne. On peut considérer le placement de la borne haute comme un item d'entraînement. Les items sont présentés sous forme verbale et la réponse est donnée sous forme analogique et arabe. Les items sont répartis de manière homogène sur la ligne numérique. L'enfant obtient un point par item correctement placé sur la ligne, avec une marge de tolérance d'un centimètre. Le compteur de vitesse se présente sous forme d'un cercle comportant onze graduations disposées à intervalles réguliers. Les bornes 0 et 200 sont notées sous forme arabe pour marquer les extrémités du compteur et son sens de lecture. Huit items sont donnés à l'enfant sous forme verbale. Il doit les placer sur la figure et les écrire sous

forme arabe. Les items sont sur-représentés dans le tiers inférieur du cadran (50% des items se trouvent dans le tiers inférieur du cadran). L'enfant obtient un point par essai correct, avec une marge de tolérance correspondant à un intervalle de cadran.

Le Zareki-R (Von Aster & Dellatolas, 2005) utilise une tâche d'estimation sur ligne numérique, séparée en quatre parties : présentation orale ligne marquée, présentation écrite ligne marquée, présentation orale ligne non marquée, présentation écrite ligne non marquée. Les lignes se présentent sous forme de droites verticales, bornées par 0 et 100. Les lignes marquées comportent quatre graduations de façon à proposer une réponse à choix multiples à l'enfant. Trois items sont proposés pour chaque modalité : présentation orale avec choix multiples, présentation écrite avec choix multiples, présentation orale et placement sur une ligne vierge, présentation écrite et placement sur une ligne vierge. La répartition des items est difficile à analyser en raison de leur petit nombre. Selon l'écart par rapport à la position correcte, indiqué par un patron spécifique à la cotation de chaque ligne, l'enfant peut obtenir jusqu'à deux points par item.

L'Examath 8-15 (Lafay & Helloin, 2016) propose six subtests utilisant des tâches d'estimation sur ligne numérique, regroupés en trois catégories : ligne numérique arabe (0 – 100, 0 – 1000, – 1000 + 1000), ligne numérique orale (0 – 100, 0 – 1000) et ligne numérique fractions. Les lignes se présentent sous forme de droites horizontales, bornées par différentes valeurs selon la ligne utilisée (0 à 100, 0 à 1000, – 1000 à 1000, 0 à 5). Dix items sont proposés pour chaque ligne. Ils sont présentés sous forme verbale (items énoncés par l'ordinateur) pour les lignes numériques orales et sous forme arabe pour les autres. L'enfant répond en plaçant le curseur à l'endroit approprié de la droite. Le logiciel calcule automatiquement la distance moyenne à la réponse et le temps moyen par item. Une représentation graphique des résultats est également proposée. Pour la ligne numérique fractions, seule la distance moyenne à la réponse est calculée.

2. Proposition d'une épreuve de ligne numérique

À partir des observations précédentes concernant les données de la littérature et les tests pré-existants, nous avons souhaité émettre plusieurs propositions de tâches d'estimation sur ligne numérique.

Dans un premier temps, concernant les lignes et leurs bornes, nous avons proposé cinq lignes bornées et quatre lignes non bornées. Pour les lignes bornées, nous avons proposé une ligne bornée de 0 à 20 destinée aux enfants à partir de la maternelle, une ligne 0 à 100, qui pourrait être utilisée à partir de la moyenne section de maternelle, une ligne de 0 à 1000 utilisable à partir du niveau CE2 et des lignes avec nombres relatifs (–100 à 100 et –1000 à 1000) à partir de la 5^e. Nous avons également proposé leurs équivalents non bornés mais recouvrant les mêmes plages de nombres, c'est-à-dire une ligne de 0 à 20 pour la maternelle, une ligne 0 à 1000 pour le CE2 et une ligne de -100 à 100 pour la 5^e. La ligne de 0 à 100 non bornée serait en revanche proposée à partir du CP et déclinée en sous-épreuves, au sein desquelles on ferait varier la valeur de l'unité de référence. Cette unité de référence pourrait

ainsi prendre les valeurs un, deux, trois, cinq, sept et dix. Une variation de même nature est proposée pour la ligne 0 à 1000, avec des unités de référence pouvant prendre les valeurs un, dix ou cent.

Ensuite, nous avons proposé un ensemble d'items pour chaque ligne, classés selon leur difficulté potentielle (cf. Annexe 6). Le nombre d'items proposé a été adapté en fonction de la plage de nombres couverte par la ligne. Nous avons ainsi proposé 10 items pour les lignes 0-20, 20 items pour les lignes 0-100, 30 items pour les lignes 0-1000, 40 items pour les lignes -100 à 100 et 60 items pour les lignes -1000 à 1000. Selon les lignes, les items seraient donnés sous forme verbale, arabe ou mixte (arabe et verbal). Nous souhaiterions également suggérer d'ajouter au moins un item d'exemple par type de ligne.

Enfin, nous avons proposé de mesurer la précision de l'estimation par écart à la position correcte ainsi que le temps de réponse. Nous suggérerions également de présenter les résultats à la fois sous forme numérique et sous forme de graphiques.

Discussion

En nous basant sur les données théoriques à disposition, nous avons émis une proposition de tâche d'estimation sur ligne numérique dans le but d'évaluer la construction de la LNM. Cette proposition est toutefois purement théorique et donc incomplète dans son état actuel. Des modifications semblent nécessaires pour pouvoir l'utiliser en tant que test diagnostique ou de dépistage. Celles-ci pourront être déterminées après la conception de l'épreuve.

1. Justification des choix des différents aspects de la tâche d'estimation sur ligne numérique

Nous avons détaillé ici les réflexions ayant mené à nos choix finaux pour la présentation des tâches d'estimation sur ligne numérique. Nous sommes partie d'observations concernant les étalonnages des épreuves pré-existantes pour ensuite argumenter nos choix concernant la présentation des lignes, les items et le type de cotation que nous aurions souhaité voir mis en œuvre dans une tâche d'estimation sur ligne numérique.

1.1. Ce que nous ont appris les épreuves pré-existantes

Concernant l'étalonnage de ces différentes épreuves, pour ceux qui sont disponibles, on peut constater que, dans l'ensemble, les moyennes obtenues témoignent d'une amélioration des compétences avec l'âge. Ces observations sont cohérentes avec le développement de la LNM chez l'enfant.

On peut noter toutefois que les scores semblent stagner dans les épreuves de droite à graduer du Numerical. Plusieurs hypothèses pourraient justifier cette stagnation : la population d'échantillonnage pourrait avoir été trop limitée pour observer les compétences

réelles des enfants. On constate en effet un déséquilibre entre les effectifs des groupes 2^e primaire (n = 154) et 3^e primaire (n = 126) par rapport au groupe 4^e primaire (n = 13). On peut également supposer que le nombre d'items (six items) est insuffisant pour discriminer les différences interindividuelles des enfants. Enfin, il est possible que la cotation (0 ou 1) n'offre pas un détail suffisant pour discriminer les différences de performances entre ces enfants.

Dans l'épreuve de positionnement de nombres sur lignes marquées du Zareki-R, on observe que les résultats moyens des enfants s'améliorent pour les groupes 6;0 à 6;11 ans et 7;0 à 7;11 ans. Pour les groupes des enfants plus âgés, on observe un plateau où le score moyen obtenu par ces enfants ne progresse plus. On peut supposer que les scores plafonnent à cette épreuve à partir de huit ans. Cette épreuve pourrait ne pas être suffisamment difficile pour discriminer les performances des enfants de plus de huit ans. Comme cet effet de plateau n'est pas observable sur l'épreuve de positionnement de nombres sur lignes non marquées, on peut supposer que c'est l'aspect choix multiple qui est facilitateur.

D'après ces observations, on peut retenir qu'il est préférable de disposer de plus de six items par subtest et d'utiliser une méthode de cotation fine, de type écart à la position correcte, pour une meilleure discrimination des performances des enfants. On note également que le support informatique permet une mesure du temps de réponse contrairement au support papier-crayon, ainsi qu'une automatisation de la cotation.

1.2. Choix des lignes

Nous avons relevé l'existence de deux types de lignes : bornées et non bornées. Le type de ligne le plus utilisé est la ligne bornée. Toutefois, des auteurs estiment que les deux types de lignes n'évalueraient pas les mêmes types de représentations et que les lignes non bornées offriraient une évaluation plus spécifique de la LNM (Link et al., 2014). Nous avons par conséquent choisi de proposer les deux types de lignes.

Des lignes bornées de 0 à 100 sont parfois proposées dès la moyenne section de maternelle (Siegler & Booth, 2004). Les résultats obtenus à cet âge sur ce type de ligne semblent indiquer une LNM avec un modèle logarithmique. Il est possible que sur des lignes bornées avec un intervalle plus restreint, on puisse observer une LNM suivant un modèle linéaire. Au cycle 1 (école maternelle), le programme scolaire est orienté sur la connaissance du nombre jusqu'à dix (Ministère de l'Éducation nationale, de la jeunesse et des sports, 2020). Connaissant l'influence du système éducatif sur la construction de la LNM (Laski & Yu, 2014), il semble pertinent de proposer une tâche d'estimation sur une ligne numérique se rapprochant de ce qui est proposé dans le programme scolaire. Pour proposer également des items plus difficiles, il nous a semblé pertinent de proposer une ligne avec un intervalle supérieur à celui travaillé à l'école. De ce fait, nous avons proposé une ligne bornée de 0 à 20 dès la petite section de maternelle, puis également de 0 à 100 à partir de la moyenne section de maternelle. Ces lignes nous permettraient également de proposer une évaluation de la LNM à des âges qui ne sont pas couverts par les différentes épreuves que nous avons relevées plus haut.

Les représentations de la LNM se linéarisent entre la moyenne section de maternelle et le CE1 (Siegler & Booth, 2004). La même évolution est observée sur les lignes bornées de 0 à 1000 chez les enfants plus âgés et les adultes. Nous avons donc choisi de proposer des lignes numériques bornées de 0 à 1000 à partir du CE2, comme cela a été fait au sein de l'Examath 8-15 (Lafay & Helloin, 2016).

Les nombres relatifs sont abordés lors du cycle 4 (de la 5^e à la 3^e ; Ministère de l'Éducation nationale, de la jeunesse et des sports, 2020). Nous avons par conséquent proposé d'introduire des lignes numériques avec des nombres négatifs à partir du niveau scolaire de la 5^e, comme cela a été fait dans l'Examath 8-15 (Lafay & Helloin, 2016). Cependant, dans cette batterie, seule la ligne -1000 à $+1000$ est proposée. Or, on observe une différence de précision importante entre les deux groupes d'échantillonnage sur cette ligne. On peut supposer que la ligne -1000 à $+1000$ est difficile en début d'apprentissage des nombres relatifs. Il nous a donc semblé intéressant de proposer également une ligne bornée de -100 à $+100$ dans le cas où celle-ci permettrait de mieux distinguer les performances des élèves.

Les lignes non bornées sont moins utilisées en recherche que les lignes bornées (Schneider et al., 2018). Nous disposons par conséquent de moins d'informations les concernant. Nous avons vu que l'estimation est facilitée lorsque l'unité de référence est grande et que la connaissance des faits multiplicatifs a une influence sur la perception des items (Reinert et al., 2015). Il nous a paru pertinent de proposer des lignes équivalentes aux lignes bornées décrites ci-dessus, en variant également la taille de l'unité de référence, à partir du moment où les faits multiplicatifs sont connus des enfants. Les faits multiplicatifs sont étudiés à partir du cycle 2 (Ministère de l'Éducation nationale, de la jeunesse et des sports, 2020). Il nous a donc paru intéressant de proposer des variations de la valeur de référence à partir de ce niveau scolaire.

1.3. Choix des items

D'après ce que nous avons relevé précédemment, plusieurs éléments seraient importants pour sélectionner les items pour une épreuve d'estimation sur ligne numérique : leur nombre, leur répartition, leur mode de présentation et leur difficulté présumée.

Le nombre d'items a été adapté en fonction de l'étendue de la ligne. D'après ce qui a pu être observé sur les autres tests, il nous semblait préférable d'avoir au minimum six items par ligne. Nous avons choisi de sélectionner plus d'items que le minimum nécessaire. Certains articles proposaient de sur-représenter les items du tiers inférieur des lignes afin de mieux distinguer les représentations linéaires des représentations logarithmiques de la LNM (Siegler & Booth, 2004). Nous avons donc choisi de sélectionner 50% des items dans le tiers inférieur de la ligne et 50% dans les deux tiers supérieurs de la ligne.

Il nous a paru pertinent de proposer une présentation sous forme arabe pour l'ensemble des lignes. La corrélation entre estimation sur ligne numérique et code arabe serait la plus forte dans ce code dans le cas des lignes bornées (Schneider et al., 2018) et il nous a semblé que c'était la forme la plus utilisée dans le domaine scolaire. Il nous a également paru pertinent de proposer une présentation sous forme verbale pour les lignes de 0 à 20, de 0 à

100, de 0 à 1000 et de -100 à 100, car ce code nous a semblé souvent utilisé au quotidien. La présentation sous forme verbale pour la ligne -1000 à 1000 nous a semblé moins pertinente car moins fréquente au quotidien. Il nous paraissait également pertinent de proposer une présentation mixte (verbale et arabe) pour les lignes de 0 à 20 et de 0 à 100. En effet, les résultats de certaines études permettent de suggérer que la présentation mixte pourrait être une étape importante de la construction du lien entre les différents codes et qu'elle serait donc intéressante à explorer (Meyer & Vilette, 2012).

Nous avons relevé plusieurs facteurs susceptibles d'influencer la difficulté des items, notamment la taille du nombre et différents points de repère. Afin de limiter d'éventuels biais de sélection et d'augmenter les chances d'avoir des items de difficultés différentes, nous avons choisi aléatoirement un nombre important d'items pour chaque ligne proposée. À partir de cette sélection, nous avons tenté d'anticiper globalement la difficulté de ces différents items. Nous avons réparti ces items en potentiellement facile, moyen ou difficile selon la valeur des items et leur proximité par rapport à des points remarquables. Nous avons arbitrairement décidé que les nombres dont la valeur est inférieure à 25 % de la plage de nombre couverte par la ligne seraient considérés comme des petits nombres (ex. sur la ligne 0 à 100, les nombres compris entre 0 et 25 sont considérés comme de petits nombres). De la même façon, les nombres correspondant au quart supérieur de la plage couverte par la ligne sont considérés comme des grands nombres. Les petits nombres sont considérés comme potentiellement faciles, les grands nombres comme potentiellement difficiles et les nombres intermédiaires comme étant de difficulté moyenne. Pour les lignes bornées, les nombres se situant autour des bornes et de la moitié de ligne, dans un intervalle de ± 10 % par rapport à la plage de nombres couverte par la ligne, sont considérés comme plus faciles et reportés à la difficulté inférieure (ex. sur une ligne de 0 à 100, 95 est un grand nombre, donc potentiellement difficile, mais il est compris entre 90 et 100, donc on le classe dans la difficulté intermédiaire). Pour les lignes non bornées, la difficulté est également définie en premier lieu par la valeur du nombre. Les nombres multiples de la valeur de l'unité de référence sont également considérés comme plus faciles et classés dans la difficulté inférieure (par exemple, sur une ligne 0-100 avec une unité de référence de 5, le nombre 45 est classé comme étant un nombre de taille intermédiaire, mais comme il est multiple de 5, on le considère comme étant d'une difficulté potentiellement facile).

1.4. Choix de la cotation

Deux éléments peuvent être mesurés lors d'une tâche d'estimation sur ligne numérique : la précision de l'estimation et le temps de réponse. Concernant la précision de l'estimation, plusieurs mesures sont proposées dans les différentes tâches d'estimation sur ligne numérique présentes dans la littérature : pourcentage d'essais corrects, écart par rapport à la position correcte (mesure la plus utilisée), coefficient directeur de la droite et erreur quadratique moyenne. L'utilisation d'un type de mesure par rapport à un autre n'aurait pas d'influence majeure sur la pertinence de la tâche (Schneider et al., 2018). On a toutefois remarqué avec l'étalonnage du Numerical (Gaillard, 2000) que les mesures de type nombre d'essais corrects pourraient être insuffisamment précises pour discriminer les performances des enfants, en particulier avec un nombre restreint d'items. Une mesure de la précision plus détaillée, comme l'écart à la position correcte, nous a par conséquent paru plus appropriée. L'Examath

8-15 (Lafay & Helloin, 2016) propose une représentation graphique des résultats. Cette présentation nous a semblé intéressante pour observer le modèle de ligne numérique (linéaire ou logarithmique) utilisé par l'enfant.

Concernant le temps de réponse, nous avons relevé que celui-ci peut dépendre de plusieurs facteurs, notamment la plage dans laquelle se fait l'estimation (Pinhas et al., 2013) et l'utilisation de points de repères comme les multiples de l'unité de référence pour les lignes non bornées (Reinert et al., 2015). Mesurer le temps de réponse nous semble donc pertinent.

1.5. Choix du support

Nous suggérons d'utiliser un support informatisé car celui-ci permettrait d'automatiser la cotation du test et de mesurer l'écart à la position correcte de façon fine. Il permettrait également la prise en compte du temps de réponse, dont les variations peuvent être de l'ordre de la milliseconde, ce qui n'est pas reproductible de façon fiable avec le support papier. L'utilisation d'un support informatique pourrait également contribuer à limiter certains biais liés à l'évaluateur (influence sur la réponse de l'évalué, erreurs de cotation) et ainsi améliorer les qualités psychométriques du test.

2. Une proposition de tâche basée sur des aspects purement théoriques

Notre proposition de tâche est purement théorique. Pour ce mémoire, nous nous sommes uniquement intéressée aux étapes préparatoires à la conception d'une tâche. La création concrète de la tâche, en particulier pour une tâche informatisée, faisait appel à des compétences techniques spécifiques dont nous ne disposons pas. De plus, les contraintes sanitaires actuelles limitaient les possibilités d'étalonnage. Un projet de normalisation d'une batterie d'évaluation de la cognition mathématique était initialement prévu mais a dû être reporté. La tâche n'existe par conséquent pas actuellement sous une forme aboutie.

Ceci pose un problème concernant la validation de la tâche sur le plan psychométrique. Les qualités psychométriques d'une tâche s'apprécient en fonction des résultats de la population d'échantillonnage. Ce sont avec ces résultats que l'on peut mesurer la cohérence inter-items, la fidélité inter-juge, la stabilité des résultats dans le temps, la difficulté réelle des items, etc. Pour proposer des éléments utiles à la conception de cette tâche, nous nous sommes appuyée sur les données de la littérature afin d'augmenter les chances que les qualités psychométriques de la tâche soient suffisantes. Toutefois, sans tester réellement la tâche auprès d'une population, il nous est impossible d'affirmer que les qualités psychométriques du test sont satisfaisantes.

Cette proposition de tâche a été élaborée en sachant que, pour être utilisable, des modifications importantes seraient nécessaires. Pour cette proposition de tâche, nous avons cherché à explorer différentes possibilités, en évitant d'exclure une proposition. Nous supposons notamment que certaines propositions de lignes (ex. neuf propositions de lignes 0-100) sont redondantes entre elles et que le nombre d'items, que ce soit par ligne ou en tout, est

trop important. Nous avons préféré multiplier les propositions car il était difficile de les départager à partir de considérations purement théoriques. Nous pensons que la sélection des éléments réellement pertinents ne pourrait se faire qu'après avoir proposé la tâche sous une forme plus aboutie à un échantillon de personnes.

De la même façon, notre classement de difficulté potentielle des items est artificiel et arbitraire car il ne repose que sur un nombre restreint de critères théoriques. La difficulté réelle de ces items dépend de nombreux facteurs intriqués et nous semble par conséquent difficilement prévisible. C'est une des raisons pour lesquelles nous préférons proposer un nombre important d'items pour chaque type de ligne numérique. Ce classement nous permet essentiellement de supposer que, parmi les items proposés, il existerait des items de difficulté différentes, ce qui est important pour assurer une sensibilité suffisante au test.

Nous avons donc conscience que cette proposition n'est pas une version aboutie de tâche d'estimation sur ligne numérique. Il s'agit d'une étape préalable à une éventuelle validation sur un échantillon de personnes, étayée par des arguments théoriques.

3. Une utilisation possible de la tâche dans un but de dépistage

Au cours de nos recherches sur les épreuves d'estimation sur ligne numérique, nous avons remarqué qu'elles regroupaient certaines caractéristiques qui pourraient en faire des tâches de dépistage des troubles de la cognition mathématique.

Les tâches d'estimation sur ligne numérique sont souvent utilisées pour évaluer la construction de la LNM, qui serait la représentation du code analogique (Dehaene, 1992). Or, ces tâches peuvent impliquer l'utilisation des trois codes présents dans le modèle du triple code de Dehaene. Elles ne ciblent pas un module spécifique et nous avons noté que la LNM se construit également avec l'expérience de l'enfant, notamment scolaire (Von Aster & Shalev, 2007). Des difficultés observées sur une tâche d'estimation sur ligne numérique pourraient par conséquent être liées à divers facteurs et non à un déficit spécifique touchant le code analogique. Cette approche plus globale des difficultés pourrait être plus adaptée à un test de dépistage qu'à un test diagnostique.

De plus, les performances aux tâches d'estimation sur lignes numériques bornées seraient fortement corrélées aux compétences mathématiques globales, en particulier dans le cas de la présentation des items sous forme de nombres arabes (Schneider et al., 2018). On pourrait envisager de développer en priorité les lignes numériques bornées de façon à en faire des épreuves de dépistage efficaces.

Les épreuves de dépistage peuvent également être utilisées par d'autres professionnels dans le but d'orienter les enfants vers les professionnels de soins adéquats. Il est donc préférable que la prise en main de l'épreuve soit simple et rapide. Une version informatique d'une épreuve d'estimation sur ligne numérique semble répondre à ces critères. Les consignes peuvent être présentées à l'écran et énoncées par l'ordinateur et la cotation peut être réalisée

automatiquement. En limitant le type de ligne utilisé aux lignes numériques bornées avec présentation des items sous forme arabe, on peut également réduire le temps de passation de l'épreuve.

L'utilisation de tâches d'estimation sur ligne numérique pourrait donc être adaptée au dépistage des troubles de la cognition mathématique. Nous n'avons pas relevé l'existence de tests de ce genre au cours de nos recherches, ce qui pourrait refléter un manque, voire un besoin au niveau des tests de dépistage.

Conclusion

Dans ce mémoire, nous avons cherché à donner des éléments justifiant l'utilisation de tâches d'estimation sur ligne numérique et à proposer des caractéristiques pertinentes à la conception de ces tâches. Nous avons commencé par établir une liste des épreuves évaluant la LNM. Nous avons ensuite cherché à établir une liste de caractéristiques utiles à la conception d'une épreuve d'estimation sur ligne numérique à partir de données extraites de ces épreuves et d'éléments présents dans la littérature scientifique. Les éléments recueillis nous ont permis de dégager des caractéristiques nécessaires pour optimiser les futures qualités psychométriques de l'épreuve ainsi que des éléments concernant la présentation des lignes et le choix des items. Nous en avons déduit qu'il était possible de présenter les lignes numériques sous forme bornée ou non bornée, en privilégiant des lignes horizontales, orientées de gauche à droite, couvrant différentes plages de nombres. Nous avons également retenu qu'il était possible de varier la difficulté des items en proposant différentes présentations sous différents codes (verbal, arabe ou mixte), et en variant l'ordre de grandeur des nombres proposés. Nous avons finalement proposé des exemples de lignes et d'items, s'adressant à différents niveaux scolaires : lignes 0 à 20 à partir de la maternelle, 0 à 100 à partir de la maternelle (ligne bornée) ou du CP (ligne non bornée), 0 à 1000 à partir du CE2 et lignes -100 à 100 et -1000 à 1000 à partir de la 5^e. Un certain nombre d'items, plus ou moins important en fonction de l'étendue de la ligne, était suggéré pour chacune de ces lignes. Nous avons également argumenté en faveur d'une mesure de la précision par écart à la position correcte et d'une mesure du temps de réponse. Nous avons ensuite suggéré de présenter les résultats sous forme numérique et sous forme de graphiques.

Nous avons relevé que les tâches d'estimation sur ligne numérique pourraient être utilisées en tant qu'épreuves de dépistage. En effet, les performances à ces épreuves seraient fortement corrélées aux compétences mathématiques globales. De plus, sur support informatisé, ce type de tâche nous a semblé simple d'utilisation car il offre la possibilité d'automatiser les mesures des résultats. Nous n'avons pas relevé l'existence d'une utilisation de ce type de tâche dans un but de dépistage au cours de nos recherches, or cette perspective nous semble intéressante. Nous avons toutefois conscience que les éléments proposés au sein de ce mémoire ne sont qu'une étape préalable à la conception effective d'une tâche d'estimation sur ligne numérique. La sélection de lignes et d'items que nous avons proposée pourrait être affinée suite à des essais en conditions réelles, auprès des populations concernées.

Bibliographie

- Brisset, M., Mussolin, C., & Leybaert, J. (2017). Traitements numériques, capacités visuo-spatiales et gnosies digitales chez les enfants sourds et entendants : impact du type d'instruction. *Rééducation Orthophonique*, 270(1), 51-80.
- Cattaneo, Z., Fantino, M., Tinti, C., Silvanto, J. & Vecchi, T. (2010). Crossmodal interaction between the mental number line and peripersonal haptic space representation in sighted and blind individuals. *Attention, Perception, & Psychophysics*, 72(1), 885-890.
- Clements, D. H. (1984). Training effects on the development and generalization of piagetian logical operations and knowledge of number. *Journal of Educational Psychology*, 76(5), 766-776.
- Crollen, V. & Collignon, O. (2016). Cognition numérique : Que peuvent nous apprendre les personnes non-voyantes ? *Medecine / Sciences*, 32(12), 1097-1102.
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44(1), 1-42.
- Dehane, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology*, 122(3), 371-396.
- Dehaene, S., Dehaene-Lambertz, G. & Cohen, L. (1998). Abstract representations of numbers in the animal and human brain. *Trends in neuroscience*, 21(8), 355-361.
- Di Giorgio, E., Lunghi, M., Rugani, R., Regolin, L., Dalla Barba, B, Vallortgara, G, & Simion, F. (2019). A mental number line in human newborns. *Developmental Science*, 22(6), 1-10.
- Eyler, R.F., Cordes, S., Szymanski, B.R., & Fraenkel, L. (2018). Use of feedback to improve mental number line representations in primary care clinics. *BMC Medical Informatics and Decision Making*, 18(40), 1-8.
- Fayol, M. (2018). *L'acquisition du nombre*. Presses Universitaires de France.
- Fischer, U., Moeller, K., Class, F., Huber, S., Cress, U. & Nuerk, H.C. (2016). Dancing with the SNARC : Measuring spatial-numerical associations on a digital dance mat. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 70(4), 306-315.
- Gaillard, F. (2000). *Numerical : Test neurocognitif pour l'apprentissage du nombre et du calcul*. Actualités Psychologiques.
- Ganor-Stern, D. (2012). Fractions but not negative numbers are represented on the mental number line. *Acta Psychologica*, 139(2), 350-357.
- Gimbert, F. (2016). *L'appréhension des quantités par la vision ou le toucher : son développement et son rôle dans les apprentissages numériques chez l'enfant* [Thèse de doctorat]. Université de Grenoble.
- Gimbert, F., Gentaz, E., & Mazens, K. (2013). Évaluation d'entraînements multisensoriels de préparation aux apprentissages numériques chez les enfants scolarisés en grande section de maternelle. *A.N.A.E*, 123(1), 1-8.

- Godfryd, M. (2011). Vocabulaire psychologique & psychiatrique. Dans : éd., *Vocabulaire psychologique et psychiatrique* (pp. 4-126). Paris, France : Presses Universitaires de France.
- Haman, M., & Lipowska, K. (2020). Moving attention along the mental number line in preschool age : Study of the operational momentum in 3- to 5-year-old childrens non-symbolic arithmetic. *Developmental Science*, 24(1), 1-15.
- Hartmann, M., Grabherr, L., & Mast, F.W. (2012). Moving along the mental number line : Interactions between whole-body motion and numerical cognition. *Journal of Experimental Psychology : Human Perception and Performance*, 38(6), 1416-1427.
- Holmes, K.J., & Lourenco, S.F. (2011). Common spatial organization of number and emotional expression : A mental magnitude line. *Brain and Cognition*, 77(2), 315-323.
- Holmes, K.J., & Lourenco, S.F. (2013). When numbers get heavy : Is the mental number line exclusively numerical ? *PloS ONE*, 8(3).
- Hutchinson, T.A. (1996). What to look for in technical manual : Twenty questions for users. *Language, Speech and Hearing Services in Schools*, 27(2), 109-121.
- Kucian, K., Girond, U., Rotzer, S., Henzi, B. Schönmann, C., Plangger, F., Gälli, M., Martin, E., et Von Aster, M. (2011). Mental number line training in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage*, 57(3), 782-795.
- Lafay, A. & Helloin, M.C. (2016). *EXAMATH 8-15 : Batterie informatisée d'examen des habiletés mathématiques*. Happyneuron.
- Lafay, A., Saint-Pierre, M.C., & Macoir, J. (2015). Revue narrative de littérature relative aux troubles cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale : Déficit du sens du nombre ou déficit de l'accès aux représentations numériques mentales ?. *Psychologie canadienne*, 56(1), 96-107.
- Laski, E.V., & Yu, Q. (2014). Number line estimation and mental addition : Examining the potential roles of langage and education. *Journal of Experimental Child Psychology*, 117(1), 29-44.
- Link, T., Nuerk, H.C. & Moeller, K. (2014). On the relation between the mental number line and arithmetic competencies. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 67(8), 1597-1613.
- Longo, M.R., & Lourenco, S.F. (2010). Bisecting the mental number line in near and far space. *Brain and Cognition*, 72(3), 362-367.
- Luwel, K., Peeters, D. & Verschaffel, L. (2019). Developmental change in number line estimation : A strategy-based perspective. *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 73(3). 144-146.
- Marc, M., Verselder, H., Cretenet, J., & Dru, V. (2016, 7 au 9 septembre). *Stimulations motrices et cognition numérique : mouvement des yeux et performances mathématiques* [communication orale]. Congrès de la Société française de psychologie, Paris. https://sfp2016.sciencesconf.org/data/pages/Actes_SFP_2018.pdf
- Marcon, L., & Lafay, A. (2019). Intervention mathématique à l'aide du logiciel informatique DéCaLigne ciblant la ligne numérique et le calcul chez les enfants ayant un trouble des apprentissages en mathématiques. *Glossa*, 128(1), 27-52.

- Meert, G. (2010). *Quand le rapport de deux nombres naturels ouvre sur le continu : Étude comportementale du traitement de la magnitude des fractions chez l'enfant et l'adulte* [Thèse de doctorat]. Université de Louvain.
- Meyer, S. (2015). *L'estimation numérique dans les apprentissages mathématiques : Rôles et intérêts de la mise en correspondance des représentations numériques au niveau développemental, éducatif et rééducatif* [Thèse de doctorat]. Université Charles-De-Gaulle Lille Nord de France.
- Meyer, S. & Vilette, B. (2012). *Les codes symboliques et la rééducation des troubles du calcul chez l'enfant* [communication orale]. Congrès de la Société Française de Psychologie, Montpellier.
http://www.psychanalyse.com/pdf/PSYCHOLOGIE_CONGRES_2012_408pages.pdf
- Ministère de l'Éducation nationale, de la jeunesse et des sports. (2020). *Programme du cycle 1 en vigueur à la rentrée 2020*. https://cache.media.eduscol.education.fr/file/A-Scolarite_obligatoire/24/3/Programme2020_cycle_1_comparatif_1313243.pdf.
- Ministère de l'Éducation nationale, de la jeunesse et des sports. (2020). *Programme du cycle 2 en vigueur à la rentrée 2020*. https://cache.media.eduscol.education.fr/file/A-Scolarite_obligatoire/24/5/Programme2020_cycle_2_comparatif_1313245.pdf
- Ministère de l'Éducation nationale, de la jeunesse et des sports. (2020). *Programme du cycle 4 en vigueur à la rentrée 2020*. https://cache.media.eduscol.education.fr/file/A-Scolarite_obligatoire/37/7/Programme2020_cycle_4_comparatif_1313377.pdf.
- Montefinese, M., & Semenza, C. (2018). Number line estimation and complex mental calculation : Is there a shared cognitive process driving this two tasks ? *Cognitive processing*, 19(4), 495-504.
- Myachykov, A., Ellis, R., Cangelosi, A., & Fischer, M.H. (2016). Ocular drift along the mental number line. *Psychological Research*, 80(1), 379-388.
- Ng, S.S.N., & Rao, N. (2010). Chinese number words, culture, and mathematics learning. *Review of Educational Research*, 80(2), 180-206.
- Organisation Mondiale de la Santé. (2008). *Classification Statistique Internationale des maladies et des Problèmes de Santé Connexes*. Repéré à <https://icd.who.int/browse10/2008/fr/#/F81>
- Pasqualotto, A., Taya, S., & Proulx, M.J. (2014). Sensory deprivation : Visual experience alters the mental number line. *Behavioural Brain Research*, 261(1), 110-113.
- Patro, k., Nuerk, H.C., & Cress, U. (2016). Mental number line in the preliterate brain : The rôle of early directional experiences. *Child Development Perspectives*, 10(3), 172-177.
- Pinhas, M., Pothos, E.M., & Tzelgov, J. (2013). Zooming in and out from the mental number line : Evidence for a number range effect. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 39(3), 972-976.
- Pinhas, M., & Tzelgov, J. (2012). Expanding on the mental number line : Zero is perceived as the "smallest". *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory, and Cognition*, 38(5), 1187-1205.
- Pitt, B., & Casasanto, D. (2014). Experiential origins of the mental number line. *Proceeding of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, 36(36), 1174-1179.

- Pitt, B., & Casasanto, D. (2016). Reading experience shapes the mental timeline but not the mental number line. *Proceeding of the Annual Meeting of the Cognitive Science Society*, 2753-2758.
- Pitt, B., & Casasanto, D. (2016).. In A. Papfragou, D. Grodner, D. Mirman, & J.C. Trueswell (Eds.), *Proceedings of the 38th Annual Conference of the Cognitive Science Society* (pp.2753-2758).
- Reinert, R.M., Huber, S., Nuerk, H.C., & Moeller, K. (2015). Multiplication facts and the mental number line : evidence from unbounded number line estimation. *Psychological Research*, 79(1), 95-103.
- Roux, M.O. (2014). Surdit  et difficultés d'apprentissage en mathématiques, état des lieux et probl matiques actuelles. *Bulletin de psychologie*, 532(4), 295-307.
- Rugani, R., Vallortigara, G., Priftis, K., & Regolin, L. (2015). Number-space mapping in the newborn chick resemble humans' mental number line. *Science*, 347(6221), 534-536.
- Rusinek, S. (2018). 35. Tests et psychométrie. Dans : Chapelle, F., Moni , B., Rusinek, S., & Poinot, R. (Dir), *Thérapies comportementales et cognitives: En 37 notions* (pp. 311-315). Paris: Dunod.
- Schneider, M., Merz, S., Stricker, J., De Smedt, B., Torbeyns, J., Verschaffel, L., & Luwel, K. (2018). Associations of number line estimation with mathematical competence : A meta-analysis. *Child development*, 89(5), 1467-1484
- Schwartz, F. & Prado, J. (2018). *La dyscalculie développementale : bases cérébrales et cognitives* [communication orale]. Séminaire de didactique des mathématiques de l'ARDM, Paris. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-02421410/document>
- Seron, X. (2002). *La neuropsychologie cognitive*. Presses Universitaires de France.
- Shaki, S., & Fischer, M.H. (2014). Random walks on the mental number line. *Experimental Brain Research*, 232(1), 43-49.
- Sheridan, R., Van Rooijen, M., Giles, O., Mushtaq, F., Steenbergen, B., Mon-Williams, M., & Waterman, A. (2017). Counting on the mental number line to make a move : sensorimotor ("pen") control and numerical processing. *Experimental Brain Research*, 235(1), 3141-3152.
- Siegler, R. S., & Booth, J. L. (2004). Development of numerical estimation in young children. *Child development*, 75(2), 428-444.
- Simms, V., Muldoon, K. & Towse, J. (2013). Plane thinking : Mental representations in number line estimation as a function of orientation, scale, and counting proficiency. *Journal of Experimental Child Psychology*, 115(3), 468-480.
- Thévenot, C. (2018). La résolution d'additions simples par procédures de comptage automatisées. *ANAE*, 156(1), 1-7.
- Thomas, N.A., Rose, W., & Nicholls, M.E.R. (2017). The influence of distractors and numerical direction on mental number line bisection. *Asymetries of Brain, Behaviour, and Cognition*, 22(1), 31-48.

- Toomarian, E.Y., & Hubbard, E.M. (2018). The fractions SNARC revisited : Processing fractions on a consistent mental number line. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 71(8), 1761-1770.
- Triki, Z., & Bshary, R. (2017). Cleaner fish *Labroides dimidiatus* discriminate numbers but fail a mental number line test. *Animal Cognition*, 21(1), 99-107.
- Tse, C.S. & Alarriba, J. (2010). The revelation of the negative side of a mental number line depends on list context : Evidence from a sign priming paradigm. *European Journal of Cognitive Psychology*, 22(8).
- Union nationale des caisses d'assurance maladie. (2005). *Nomenclature générale des actes professionnels*. <https://www.ameli.fr/sites/default/files/Documents/717399/document/ngap-assurance-maladie-04022021.pdf>
- Union Nationale des Caisses d'Assurance Maladie et Fédération Nationale des Orthophonistes. (2017, 27 octobre). *Avenant n°16 à la convention nationale organisant les rapports entre les orthophonistes et l'Assurance Maladie signée le 31 octobre 1996*. https://www.ameli.fr/sites/default/files/Documents/348931/document/convention_nationale_des_orthophonistes_actualisee_le_27_octobre_2017.pdf
- Vilette, B., Mawart, C., & Rusinek, S. (2010). L'outil "estimateur", la ligne numérique mentale et les habiletés arithmétiques. *Pratiques Psychologiques*, 16(2), 203-214.
- Vilette, B., Meyer, S., & Hild, M. (2018, 10 au 12 janvier). *Peut-on améliorer l'enseignement des mathématiques au primaire avec des activités basées sur l'estimation numérique et le "sens du nombre" ?* [communication orale]. Colloque de l'ADMEE-Europe au Luxembourg, Esch-sur-Alzette. https://admee2018.sciencesconf.org/data/pages/ADMEE_2018_Actes_du_colloque.pdf
- Von Aster, M. & Dellatolas, G. (2005). *ZAREKI-R : Batterie pour l'évaluation du traitement des nombres et du calcul*. ECPA.
- Von Aster, M. & Shalev, R. (2007). Number development and developmental dyscalculia. *Developmental Medicine & Child Neurology*, 49(11), 868-873.
- Walsh, V. (2003). A theory of magnitude : common cortical metrics of time, space and quantity. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(11), 483-488.
- Wilson, A. J., & Dehaene, S. (2007). *Number sense and developmental dyscalculia*. In D. Coch, G. Dawson, & K. W Fischer (Eds.), *Human behavior, learning, and the developing brain: Atypical development* (p. 212–238). The Guilford Press.
- Zhang, Y., & You, X. (2012). Extending on the mental number line : How do negative numbers contribute ?. *Perception*, 41(11), 1323-1335.

Exemple de page au format paysage

Liste des annexes

Annexe n°1 : Triple code (Dehaene, 1992)

Annexe n°2 : Modèle développemental de Von Aster et Shalev (Von Aster & Shalev, 2007)

Annexe n°3 : Exemples de lignes numériques

Annexe n°4 : Tableau des tests concernant les mathématiques

Annexe n°5 : Tableau des épreuves d'estimation sur ligne numérique

Annexe n°6 : Propositions d'items pour chaque ligne numérique