

Unité de Formation et de Recherche de Médecine et des Techniques Médicales

Année Universitaire 2022-2023

Mémoire

Pour l'obtention du

Certificat de Capacité en Orthophonie

**Quelles hypothèses théoriques existent à l'heure actuelle pour rendre compte
du développement du traitement des nombres à plusieurs chiffres ?**

Revue systématique de littérature

Présenté par *Louise MULLER*

Née le 06/06/1997

Président du Jury : Madame Lebayle-Bourhis Annaïck – Orthophoniste, Chargée de cours

Directrice du Mémoire : Madame Huron Caroline – Chargée de recherche à l'Inserm

Co-directrice du Mémoire : Madame Prudhon Emmanuelle – Directrice Pédagogique du CFUO de Nantes, Orthophoniste, Chargée de cours

Membres du jury : Madame Quémart Pauline – Maître de conférence, Enseignante-Chercheuse

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes m'ayant permis de mener à bien ce mémoire :

Premièrement, je souhaite remercier mes directrices de mémoire, Caroline Huron et Emmanuelle Prudhon, qui ont accepté d'encadrer ce mémoire et qui, par leur disponibilité, leurs conseils et leurs encouragements, m'ont guidé dans sa réalisation.

Je tiens à remercier tous les professeur.e.s du CFUO de Nantes pour m'avoir apporté tout au long de mon cursus les connaissances et l'esprit critique qui ont permis la réalisation de ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements à toutes les orthophonistes qui m'ont accueillie en stage durant mes cinq années d'études, et plus particulièrement à mes maîtres de stages de cinquième année qui m'ont soutenue et ont nourri mes réflexions.

Merci à ma famille et mes ami.e.s pour leur soutien inconditionnel, leurs conseils et leurs nombreuses relectures qui m'ont permis d'avancer durant cette année.

Enfin je remercie les membres du jury pour le temps et l'attention consacrés à la lecture de ce mémoire.

Table des matières

Remerciements.....	1
Table des matières.....	2
Engagement de non-plagiat.....	5
Liste des tableaux et figures.....	6
Introduction.....	7
1. Cadre théorique.....	9
1.1. Modèles du nombre.....	9
1.1.1. Triple code de Dehaene.....	9
1.1.2. Système de position.....	9
1.1.3. Acquisition du nombre.....	10
1.1.4. Ligne Numérique Mentale.....	11
1.1.4.1. Effets propres à la LNM.....	11
1.1.4.2. Compression de LNM.....	12
1.1.4.3. Dimension spatiale de la LNM.....	12
1.1.4.4. Évolution de la LNM.....	13
1.2. Traitement des nombres à plusieurs chiffres.....	14
1.2.1. Effets spécifiques.....	14
1.2.1.1. Effet de compatibilité.....	14
1.2.1.2. Effet du chiffre le plus à gauche.....	15
1.2.2. Modèles théoriques.....	15
1.2.2.1. Modèle holistique.....	15
1.2.2.2. Modèle décomposé.....	16
1.2.2.3. Modèle hybride.....	17
1.2.3. Automaticité et contrôle attentionnel.....	18
1.2.3.1. Adaptation à la tâche.....	18
1.2.3.2. Contrôle attentionnel.....	18
1.2.3.3. Automaticité et effet de congruence.....	19
2. Méthode.....	21
2.1. Protocole de recherche.....	21
2.2. Critères d'éligibilité.....	21

2.2.1. Sujet de l'étude.....	21
2.2.2. Population.....	22
2.2.3. Types d'études.....	22
2.2.4. Langue.....	22
3. Synthèse.....	23
3.1. Caractéristiques des études.....	23
3.1.1. Populations.....	23
3.1.2. Méthodes.....	25
3.1.3. Qualité des études.....	26
3.1.4. Modèles théoriques de référence.....	28
3.2. Résultats et conclusions théoriques.....	28
3.2.1. Acquisition du nombre.....	29
3.2.1.1. Émergence du nombre à plusieurs chiffres.....	29
3.2.1.2. Rôle de l'apprentissage explicite du système de position.....	32
3.2.2. Arguments en faveur des différents modèles.....	33
3.2.2.1. Modèle hybride.....	33
3.2.2.2. Modèle décomposé séquentiel puis parallèle.....	34
3.2.2.3. Modèle décomposé parallèle dominant.....	35
3.2.2.4. Effet du chiffre le plus à gauche.....	37
3.2.3. Automaticité du traitement.....	39
3.2.3.1. Traitement automatique des nombres.....	39
3.2.3.2. Contrôle attentionnel.....	40
3.2.4. Compression de la ligne numérique mentale.....	41
4. Discussion.....	44
4.1 Principaux résultats.....	44
4.1.1. Existe-t-il un ou des modes de traitement spécifiques aux nombres à plusieurs chiffres chez l'enfant ?.....	44
4.1.2. Peut-on identifier des repères chronologiques dans le développement des nombres à plusieurs chiffres ?.....	45
4.1.3. Quels manques peuvent être identifiés dans la littérature existante ?.....	46
4.2. Intérêts pour le soin en orthophonie.....	47
4.2.1. Dimension spatiale du traitement des nombres.....	47

4.2.2. Accès à la magnitude du nombre par le nombre écrit.....	48
4.2.3. Identification du mode de traitement des nombres.....	48
4.2.4. Prévention chez le jeune enfant.....	49
4.3. Limites de la revue.....	50
Conclusion.....	51
Bibliographie.....	52
Annexes.....	63
Annexe A : Combinaisons de mots-clés.....	63
Annexe B : Diagramme de flux.....	64
Annexe C : Tableau de synthèse.....	65
Annexe D : Appraisal tool for Cross-Sectional Studies (AXIS).....	68
Annexe E : Diaporama de présentation.....	69

Engagement de non-plagiat



Nantes Université

U.E.7.5.c Mémoire

Semestre 10

Centre de Formation Universitaire en Orthophonie

Directeur : Pr Florent ESPITALIER

Co-Directrices Pédagogiques : Mme Emmanuelle PRUDHON - Mme Heglyn LEITE-PIMENTA

Directrice des Stages : Mme Leslie BARON

ANNEXE 9 ENGAGEMENT DE NON-PLAGIAT

« Par délibération du Conseil en date du 7 Mars 1962, la Faculté a arrêté que les opinions émises dans les dissertations qui lui seront présentées doivent être considérées comme propres à leurs auteurs et qu'elle n'entend leur donner aucune approbation ni improbation ».

Engagement de non-plagiat

Je, soussigné(e) Louise MULLER, déclare être pleinement conscient(e) que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés sur toutes ses formes de support, y compris l'Internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce mémoire.

Fait à : Nantes.

Le : 24/08/2023

Signature :

Liste des tableaux et figures

Figures :

Figure 1 : Regression models based on the averaged estimates of all children per data point, élaboré par Moeller et al., 2009

Tableaux :

Tableau 1 : Présentation des effectifs et âges des participants de chaque étude

Tableau 2 : Analyse qualitative selon AXIS (Downes et al., 2016)

Introduction

La connaissance des nombres est une compétence indispensable pour comprendre et évoluer dans le monde qui nous entoure. Nous rencontrons des nombres au quotidien pour mesurer des quantités, mais aussi pour mesurer le temps avec la date et l'heure, gérer l'argent, ou encore se repérer dans l'espace avec les adresses, les panneaux et les distances. Nous rencontrons ces nombres dès l'enfance, et la majorité d'entre eux sont des nombres à plusieurs chiffres. Les nombres sont également à la base des apprentissages mathématiques, et c'est en partie à travers cet apprentissage que se construisent nos capacités logiques de raisonnement ou de déduction, qui nous permettent de résoudre des problèmes au quotidien.

Si la prise en soins des troubles des apprentissages mathématiques n'a pas toujours été la préoccupation majeure des orthophonistes, elle est rapidement apparue dans leur champ de compétences. Elle est mentionnée dès le premier décret d'actes de 1983 sous la forme de la rééducation de la dyscalculie, au sein des troubles des apprentissages, anciennement appelés troubles « dys ». Malgré cela, la cognition mathématique n'a pas historiquement été un domaine privilégié dès le départ. Le projet Kalliopé, mené par Laurence Tain, qui a recensé à l'aide de questionnaires l'évolution des pratiques des orthophonistes, montre cependant que la cognition mathématique a été un des domaines ayant connu la plus grande progression entre 1970 et 2002 (Tain, 2016). La prise en soins des patients ayant des difficultés dans les apprentissages mathématiques est désormais courante chez les orthophonistes, notamment en libéral. Malgré cette démocratisation des prises en soins, les ressources théoriques à destination des orthophonistes dans ce domaine restent faibles. Un mémoire d'orthophonie étudiant l'évolution de la profession à travers les revues spécialisées en orthophonie montre que la dyscalculie et la cognition mathématiques font rarement l'objet d'articles dans ces revues avant les années 2000, et restent encore aujourd'hui un sujet minoritaire au sein des nombreux domaines de compétences des orthophonistes (Magnin et Poncet, 2012).

Par ailleurs, les données en orthophonie se concentrent souvent sur les difficultés des enfants atteints de troubles des apprentissages mathématiques et sur l'efficacité des interventions. Bien que ces sujets soient plus pertinents pour la pratique, ce mémoire s'appuie sur l'idée qu'une rééducation efficace est également fondée sur une meilleure compréhension

des mécanismes cognitifs de traitement du nombre chez l'enfant au développement typique. Pour répondre à cette problématique, ce mémoire a pour objectif de réaliser une revue systématique de la littérature concernant les mécanismes cognitifs de traitement des nombres à plusieurs chiffres chez l'enfant tout-venant afin de répondre aux questions suivantes : Existe-t-il un ou des modes de traitement spécifiques aux nombres à plusieurs chiffres chez l'enfant ? Peut-on identifier des repères chronologiques dans le développement du traitement des nombres à plusieurs chiffres ? Quels manques peuvent être identifiés dans la littérature existante à ce sujet ?

1. Cadre théorique

1.1. Modèles du nombre

1.1.1. Triple code de Dehaene

Le modèle le plus utilisé à ce jour pour décrire la représentation mentale du nombre est le modèle du triple code (Dehaene, 1992). Il postule qu'il existe trois formes distinctes de représentations mentales du nombre, que l'on nomme les trois codes :

- Le code analogique, ou représentation non symbolique, est une représentation primaire et universelle des quantités. C'est cette représentation qui correspond au sens du nombre ou à sa magnitude, c'est-à-dire à la quantité que représente le nombre. Il permet la comparaison et l'estimation de nombres. Il peut être divisé en deux systèmes principaux : le système numérique approximatif (SNA) qui peut traiter de très grands nombres, mais de manière imprécise, et le système numérique précis (SNP) qui permet la reconnaissance visuelle rapide des très petites quantités, de 1 à 4, également appelée subitizing (Feigenson et al., 2004) .

- Le code oral, représentation des noms des nombres sous une forme phonologique. Ce code est lié au langage et est donc différent selon la langue maternelle du sujet. Il permet notamment le dénombrement à travers la comptine numérique et la mémorisation des faits arithmétiques, comme la notion de parité ou les tables de calcul.

- Le code arabe, représentation du nombre par des symboles écrits. Dans la culture occidentale, cette représentation consiste en une combinaison des chiffres de 0 à 9. Il est le support de la plupart des apprentissages mathématiques formels comme l'arithmétique.

Le passage d'un code à l'autre est un processus cognitif nommé transcodage, qui est utilisé dans de nombreuses tâches, comme la lecture (arabe vers oral), la dictée (oral vers arabe) ou l'écriture simple de nombre (analogique vers arabe).

1.1.2. Système de position

Les codes oral et arabe étant symboliques, ils possèdent un lexique et une syntaxe propres qui peuvent varier selon les langues et les cultures (McCloskey, 1992). Le code arabe utilisé dans les pays occidentaux est un système dit de position, où la valeur de chaque chiffre change selon la place de celui-ci dans le nombre. Ainsi le chiffre 1 vaut 10 dans 12 mais 100

dans 102. La valeur du nombre correspond à la somme des valeurs de chacun des chiffres le composant. Ce système de position est explicite dans le code oral, avec des mots comme cent ou mille, mais il n'est pas évident à l'écrit. (Fuson, 1990)

1.1.3. Acquisition du nombre

Les liens entre code analogique et codes symboliques sont complexes, en particulier au cours du développement. Selon le modèle développemental de l'acquisition numérique de Von Aster et Shalev (2007), il existe quatre étapes dans la construction du nombre qui correspondent aux développements successifs de chaque code. La première étape correspond à l'apparition du code analogique, inné et observable chez l'enfant très jeune. En effet, des études ont montré qu'avant l'âge d'un an, les enfants étaient déjà capables de discriminer deux quantités inférieures à 4 (Starkey & Cooper, 1980 ; Starkey et al, 1990 ; Strauss & Curtis, 1981) ou deux quantités supérieures si leur écart est suffisamment élevé (Xu & Spelke, 2000). La deuxième étape correspond ensuite à l'acquisition du code oral et à l'établissement de liens avec les quantités, par le biais de la comptine numérique et du dénombrement (Gallistel & Gelman, 1992). Puis la troisième étape correspond à l'apprentissage majoritairement explicite du code arabe, et enfin la quatrième étape correspond à une représentation mentale dite mature des nombres, notamment sous la forme d'une ligne numérique mentale. C'est cette représentation qui permet l'apprentissage formel du calcul et des structures mathématiques plus complexes (fractions, nombres décimaux, etc.).

Le code analogique semble donc être à la base du développement et de l'apprentissage des codes symboliques. Cependant il semble que la construction de codes symboliques, par le langage, entraîne également une précision des représentations analogiques. En effet, des études menées auprès d'un peuple d'Amazonie n'ayant des mots-nombres que de 1 à 5 ont montré que, sans le support de codes symboliques, leurs compétences se limitaient à l'estimation et au subitizing, sans possibilité de calcul exact ou de dénombrement précis au-delà des petites quantités. (Pica et al., 2004). Cet appui sur les codes symboliques et le langage pourrait expliquer pourquoi, même s'il apparaît très tôt dans le développement, le code analogique continue à gagner en précision jusque tard dans le développement de l'enfant (Halberda & Feigenson, 2008).

1.1.4. Ligne Numérique Mentale

La ligne numérique mentale (LNM) est un concept de représentation visuo-spatiale des quantités très utilisé, décrit par de nombreux auteurs (Moyer et Landauer, 1967 ; Restle, 1970 ; Dehaene, 2003). La LNM représente les quantités selon une ligne continue allant de gauche à droite en ordre croissant. Elle permet d'associer les quantités analogiques aux codes symboliques, notamment dans des tâches de comparaison ou d'estimation.

1.1.4.1. Effets propres à la LNM

L'émergence du concept de LNM est due à plusieurs effets observés lors de tâches mettant en lien le code analogique et les codes symboliques, oral ou arabe, comme la comparaison, l'estimation de quantité sur une ligne numérique ou les additions simples.

Les deux premiers effets sur lesquels Moyer et Landauer (1967) se sont appuyés pour émettre leur hypothèse sont l'effet de distance et l'effet de taille. L'effet de distance correspond au fait que plus la différence entre deux nombres est élevée, plus la comparaison de ces deux nombres sera rapide et précise. Ainsi une comparaison entre 2 et 23 sera plus rapide et précise qu'une comparaison entre 2 et 6 par exemple. L'effet de distance est le principal argument en faveur de l'existence d'une ligne numérique mentale permettant de représenter mentalement les quantités (Dehaene & Cohen, 1997 ; Gallistel & Gelman, 2000).

L'effet de taille ou de magnitude (*problem-size effect*) correspond au fait que plus les nombres sont grands, et donc loin sur la ligne numérique, plus la comparaison est difficile pour un écart constant. Ainsi pour un même écart de 10, la comparaison entre 110 et 120 sera plus lente que la comparaison entre 20 et 30. Cet effet montre qu'il existe une compression de la ligne numérique vers les grands nombres (Gallistel & Gelman 2000).

On rencontre parfois dans la littérature un effet de rapport ou de ratio, selon lequel la capacité de discrimination de deux quantités diminue proportionnellement lorsque le rapport entre ces quantités se rapproche de 1. En effet lorsque la distance entre deux nombres diminue ou que la magnitude de ces nombres augmente, leur rapport se rapproche de 1. L'effet de rapport est donc une autre manière de mesurer les effets de distance et de taille (Mussolin & Noël, 2007).

Brybaert en 1995 observe également un effet d'amorçage, ou de *priming*, selon lequel le traitement d'un nombre facilite le traitement du nombre suivant, si celui-ci a une valeur proche du nombre précédent. Par exemple lors d'une tâche de lecture de nombres, le temps de réponse sera plus faible pour la lecture du nombre 53 si le nombre présenté en amorce est 51 que si l'amorce est 84. Cet effet semble montrer que plus l'écart entre deux nombres est faible plus leurs représentations mentales sont « proches » sur le plan cognitif.

1.1.4.2. Compression de LNM

Les effets de distance et surtout de taille décrits précédemment montrent que l'échelle de la ligne numérique n'est pas constante. Un écart de magnitude similaire entre deux nombres ne correspond pas toujours au même « espace » sur la ligne numérique. De manière générale, plus les nombres sont grands, plus les écarts sont compressés, et plus la précision de la représentation mentale est faible.

Il existe deux hypothèses pouvant expliquer cette compression ; la première, émise par Siegler et Opfer en 2003, est celle d'une représentation logarithmique de la magnitude du nombre, où les grands nombres seraient perçus comme plus proches malgré un écart constant. Ainsi 90 et 100 paraîtraient plus similaires que 10 et 20. La deuxième hypothèse propose que la représentation de la magnitude est bien linéaire, mais que plus un nombre est grand, plus notre estimation de sa représentation analogique est imprécise, ce qui entraîne une plus grande variabilité de la représentation des grands nombres, comme si la place d'un nombre sur la ligne était de moins en moins nette en avançant vers les grands nombres. C'est cette variabilité qui serait la source des effets de taille et de distance, malgré une représentation linéaire de la magnitude (Gallistel & Gelman, 2000).

1.1.4.3. Dimension spatiale de la LNM

Selon la théorie de la ligne numérique mentale, notre représentation de la magnitude serait de nature spatiale. L'orientation de gauche à droite de cette ligne observée dans les pays dits occidentaux aurait une origine culturelle plutôt que neurologique, puisque les résultats sont les mêmes quelle que soit la spécialisation hémisphérique, gaucher ou droitier (Fias, Brybaert, Geypens et d'Ydewalle, 1996). Une orientation inverse a en revanche été observée

dans d'autres cultures : de droite à gauche chez des locuteurs arabes (Dehaene et al., 1993), et même une orientation verticale de bas en haut chez des locuteurs japonais (Ito & Hatta, 2004).

Ces différentes orientations sont mises en évidence par l'observation de l'effet SNARC (*Spatial Numerical Association of Response Codes*), selon lequel notre cerveau associerait spontanément les petits nombres avec un côté et les grands nombres avec l'autre, respectivement gauche et droite dans la culture occidentale. Le temps de réponse lors de tâches diverses (désignation, comparaison, jugement de parité) est influencé par la main utilisée pour répondre. Ainsi le temps de réponse pour les petits nombres est plus faible pour la main gauche, tandis qu'à l'inverse, le temps de réponse pour les grands nombres est plus faible avec la main droite (Dehaene et al., 1993 ; Berch et al., 1999 ; Nuerk et al., 2005 ; Wood et al., 2008). L'effet SNARC est souvent interprété comme un argument en faveur de l'existence de la LNM, mais il existe d'autres hypothèses pour expliquer cet effet. Santens et Gevers (2008) expliquent que les nombres seraient classifiés en deux polarités : relativement petits (polarité négative) et relativement grands (polarité positive), et que ce sont ces deux groupes qui sont associés au côté gauche pour les « petits » nombres et droit pour les « grands » nombres.

1.1.4.4. Évolution de la LNM

La ligne numérique apparaît tôt au cours du développement ; l'effet de distance est observable dès l'âge de 5 ans (Gilmore et al., 2007). L'effet de taille et donc la compression de la ligne numérique varie au cours du développement ; même si elle est toujours présente, la ligne numérique tend à devenir plus linéaire lorsque l'âge augmente. Cette linéarisation commence par les plus petits nombres, de 1 à 10, puis s'étend de 1 à 100 et se poursuit ainsi vers des nombres de plus en plus grands (Piazza et al., 2010). Le passage à une LNM plus linéaire se ferait entre le CP et le CM1, et pourrait être expliqué par plusieurs facteurs : familiarité des nombres de plus en plus grands, apprentissage des mots-nombres, mais surtout par l'apprentissage scolaire formel. En effet, Dehaene et al observent en 2008 que des adultes Mundurucu, tribu amazonienne disposant d'un lexique lié aux nombres très réduit (un, deux, trois, beaucoup), n'ayant pas bénéficié d'un apprentissage scolaire des nombres utilisent une représentation logarithmique des nombres qu'ils soient présentés sous forme symbolique ou

non. En revanche, les adultes occidentaux utilisent une représentation linéaire des nombres symboliques et des petits nombres d'une part et une représentation logarithmique des grands nombres présentés de façon non symbolique et dans une configuration empêchant le dénombrement, d'autre part.

1.2. Traitement des nombres à plusieurs chiffres

1.2.1. Effets spécifiques

La ligne numérique mentale, telle qu'elle a été pensée par Moyer et Landauer (1967), ne prend pas en compte toute la complexité des différents codes symboliques, notamment le système positionnel de la numération arabe ainsi que le lexique et la syntaxe du code oral. Les effets de distance, de taille ou SNARC ne suffisent donc pas à expliquer toutes les variations de performance dans le traitement du nombre à plusieurs chiffres, et d'autres effets ont été étudiés dans le but d'affiner le modèle de la LNM.

1.2.1.1. Effet de compatibilité

L'effet spécifique aux nombres à plusieurs chiffres le plus étudié dans la littérature est l'effet de compatibilité unité-dizaine. Deux nombres sont considérés comme compatibles si les comparaisons inter-unités et inter-dizaines arrivent à la même conclusion, par exemple 42 et 67 sont compatibles car $4 < 6$ et $2 < 7$. À l'inverse, 42 et 37 est une paire incompatible car $4 > 3$ mais $2 < 7$. On observe un effet de compatibilité unité-dizaine lorsque le temps de réponse et le nombre d'erreurs sont plus faibles pour les paires compatibles que pour les paires incompatibles. Cet effet se maintient pour des paires ayant le même écart et il ne peut donc pas être une émanation de l'effet de distance. Par exemple 32 et 47 (paire compatible, distance de 15) seront plus rapidement et plus précisément comparés que 38 et 53 (paire incompatible, distance de 15). L'effet de compatibilité est souvent masqué lors de tâches de comparaison à un standard, comme 55 ou 65, car la compatibilité d'une paire est alors liée à la distance. (Nuerk et al., 2001 ; Nuerk et al., 2005 ; Ganor-Stern et al., 2009 ; Knops et al., 2006 ; Korvorst & Damian, 2008 ; Macizo & Herrera, 2008, 2010 ; Ratinckx et al., 2006 ; Wood et al., 2006 ; Nuerk et al. 2015).

L'effet de compatibilité a également été étendu aux nombres à plus de deux chiffres. On parle alors d'effet de compatibilité unité-dizaine, mais aussi de compatibilité unité-centaine et dizaine-centaine. Korvorst et Damien (2008) ont mesuré ces effets lors d'une tâche de comparaison de nombres à trois chiffres. Ils observent cependant que l'effet de compatibilité unité-centaine est plus faible que les effets de compatibilité unité-dizaine et dizaine-centaine, et interprètent cette différence comme le résultat de la lecture des nombres de gauche à droite, en passant de centaines à dizaines, puis de dizaines à unités, sans jamais mettre côte à côte centaines et unités.

1.2.1.2. Effet du chiffre le plus à gauche

L'effet du chiffre le plus à gauche ou *left-digit effect*, est un phénomène selon lequel un poids plus élevé est donné à la valeur du chiffre de gauche d'un nombre dans le processus d'estimation, de comparaison ou de placement sur une ligne numérique par exemple. Deux nombres de magnitudes similaires mais dont le chiffre de gauche est différent, comme 597 et 602, seront donc perçus comme plus éloignés sur la ligne numérique que deux nombres avec un même écart mais dont le chiffre de gauche est le même, comme 637 et 642. Lors d'une tâche de placement sur une ligne numérique, les nombres précédant un changement de centaine ou de millier sont donc légèrement sous-estimés, donc placés plus à gauche qu'attendu sur la ligne, tandis que ceux qui suivent ce changement sont surestimés, donc placés plus à droite qu'attendu (Thomas & Morwitz, 2005, 2009 ; Lai et al., 2018).

1.2.2. Modèles théoriques

L'étude de ces différents effets a permis de construire différents modèles du traitement du nombre à plusieurs chiffres. Ils s'intéressent à la fois à la gestion de l'information numérique écrite, mais également à la représentation mentale de ces nombres, et à la forme que prend la ligne numérique mentale au-delà de 10.

1.2.2.1. Modèle holistique

Le modèle holistique est le modèle le plus ancien de traitement du nombre. Émis par Dehaene, Dupoux et Mehler (1990), il postule que lors de n'importe quelle tâche numérique, les nombres sont reconnus de manière holistique et systématiquement placés sur la

représentation mentale de la magnitude pour effectuer ensuite la tâche. Les nombres à plusieurs chiffres seraient donc représentés sur une extension continue de la ligne numérique mentale. Ils observent que le nombre des unités a un effet sur les performances en comparaison : 41 et 55 sont comparés plus rapidement que 48 et 55, alors que les chiffres des dizaines sont identiques, respectant ainsi l'effet de distance et montrant que le chiffre des unités est pris en compte. Ils en concluent que le nombre est traité dans sa globalité, sans isoler le chiffre des dizaines alors même qu'il permettrait seul d'arriver à une conclusion.

Une des hypothèses de ce modèle est que les effets de taille et de distance seraient expliqués par la compression logarithmique de la LNM dans les grands nombres (Brannon et al., 2001).

1.2.2.2. Modèle décomposé

La présence de l'effet de compatibilité remet cependant en question le modèle holistique, qui n'explique pas cet effet. Un modèle alternatif a donc été proposé par Nuerk et al. (2001, 2002), qui suggèrent un traitement séparé de chaque chiffre composant le nombre. La différence de temps de réponse entre la comparaison entre 41 et 55 et celle entre 48 et 55 serait alors expliquée par le fait qu'une des deux paires est compatible tandis que l'autre ne l'est pas.

La ligne numérique mentale serait alors discontinue, et correspondrait en réalité à plusieurs lignes : une pour les chiffres des unités, une pour les chiffres des dizaines etc. Verguts et De Moor (2005) suggèrent que chaque chiffre est placé sur sa propre ligne numérique selon sa position et la valeur ou puissance de 10 que celle-ci lui attribue. Des comparaisons simultanées entre unités et entre dizaines auraient donc lieu, ce qui justifie l'effet de compatibilité, tout en tenant compte des effets de taille et de distance. Cette discontinuité pourrait aussi exister sous la forme de lignes numériques séparées pour chaque dizaine, c'est-à-dire une ligne découpée entre chaque dizaine (Nuerk, 2001).

Dans certaines situations d'étude, particulièrement chez l'enfant, un effet de compatibilité inverse a été observé, où les paires incompatibles ont été comparées plus rapidement et plus précisément (Knops et al., 2006). Cet effet peut être interprété comme le

résultat d'un traitement décomposé mais purement séquentiel des chiffres, de gauche à droite. Le chiffre de gauche serait ainsi traité isolément en premier lieu, et les chiffres suivants, notamment celui des unités, seulement traités si les chiffres précédents n'ont pas permis de conclusion. L'effet de compatibilité inverse vient du fait que, pour un écart entre les nombres constant, la distance entre les chiffres des dizaines sera toujours plus élevée pour une paire incompatible que pour une paire compatible (Nuerk et al., 2002). Dans cette situation, la paire incompatible sera donc plus facilement comparée grâce à l'effet de distance appliqué à la ligne numérique des dizaines (Nuerk et al., 2004). Cette distance entre chiffres des dizaines est visible en reprenant un exemple précédent : 32 et 47 (compatible, distance de 15, distance entre dizaines de 1) seront moins rapidement et moins précisément comparés que 38 et 53 (incompatible, distance de 15, distance entre dizaines de 2).

Au sein du modèle décomposé, on peut donc distinguer deux modes de traitement des chiffres composant le nombre : le traitement décomposé parallèle, créant un effet de compatibilité simple et le traitement décomposé séquentiel, créant un effet de compatibilité inverse.

1.2.2.3. Modèle hybride

Dès 2001, Nuerk, Weger et Willmes mentionnent une explication alternative à l'effet de compatibilité qui consisterait en une représentation double : une ligne numérique continue d'une part, et des lignes séparées pour les unités et les dizaines d'autre part. Ces deux représentations fonctionneraient en parallèle, chacune des représentations prenant le dessus à des moments différents selon la tâche effectuée.

Ces deux modèles, décomposé et hybride, permettent tous les deux de justifier les effets de taille et de distance, mais également l'effet de compatibilité spécifique aux nombres à plusieurs chiffres. Il est donc difficile de départager ces modèles sur le plan qualitatif, et les observations de ces effets ne permettent pas de réaliser des prédictions quantitatives. Moeller et al. (2010) ont créé et entraîné trois modèles informatiques correspondant aux trois modèles théoriques de représentation du nombre, afin d'observer lequel explique au mieux les effets observés. Ils concluent que le modèle dont les résultats semblent correspondre le mieux aux

effets observés empiriquement est le modèle décomposé. Huber et al. (2013) ont répliqué cette modélisation avec des nombres à trois chiffres, en utilisant uniquement le modèle décomposé. Ce modèle semble expliquer de manière satisfaisante les effets de taille et de distance, mais aussi de compatibilité.

1.2.3. Automaticité et contrôle attentionnel

1.2.3.1. Adaptation à la tâche

Les mécanismes cognitifs permettant le traitement des nombres à plusieurs chiffres sont très dépendants de l'attention, notamment visuo-spatiale, et du chiffre sur lequel l'attention se porte. Les effets de taille, de distance et de compatibilité dépendent en partie des caractéristiques des nombres ou des paires de nombres proposés durant la tâche. En particulier, l'augmentation du nombre de comparaisons intra-dizaines, telles que 62 et 69, ou 123 et 127, a pour effet de diminuer l'effet de distance entre centaines, et de distance entre dizaines, puisqu'elle amène le participant à devoir se concentrer plus régulièrement sur le chiffre des unités. L'effet de distance entre unités est également réduit, ce qui pourrait être expliqué par le fait que l'augmentation du nombre de comparaisons intra-dizaines amène à une décision moins automatique. L'effet de compatibilité a, quant à lui, tendance à augmenter dans ces conditions, puisque le chiffre des unités devient aussi important que celui des dizaines ou des centaines dans la prise de décision (Huber et al., 2013).

Il se pourrait donc que dans le cas du modèle hybride, le passage d'une représentation à l'autre, en plus d'être influencé par le type de tâche, dépende également des caractéristiques des nombres proposés.

1.2.3.2. Contrôle attentionnel

Ce changement dans l'attention selon le stimulus utilisé peut être mis en parallèle avec la *Dual Mechanisms of Control theory* ou théorie des mécanismes de contrôle double (Braver, 2012). Cette théorie propose deux types de contrôle attentionnel : proactif et rétroactif. Le contrôle proactif correspond à un état plus alerte de l'attention où la tâche en cours est activée en permanence dans la mémoire de travail et où le participant anticipe les conflits possibles. Le contrôle rétroactif correspond à un état d'attention moins élevé, où le participant détecte et résout les conflits quand ils sont devant ses yeux. Le contrôle proactif permet de meilleures

performances mais est plus coûteux en énergie. Chacun des contrôles est donc utilisé à différents moments selon la tâche effectuée, et notamment selon la proportion de situations de conflit rencontrées.

Macizo et Herrera (2013) ont appliqué cette théorie aux tâches de comparaisons de nombres à plusieurs chiffres. Ils en concluent qu'il existe en effet une alternance entre contrôle proactif et contrôle rétroactif lors de ce type de tâche, selon la proportion de situations de conflit, c'est-à-dire de paires incompatibles, dans les comparaisons proposées. Autrement dit, une forte proportion de paires incompatibles entraîne un contrôle proactif tandis qu'une faible proportion de paires incompatibles entraîne plutôt un contrôle rétroactif.

1.2.3.3. Automaticité et effet de congruence

Le traitement du nombre peut être volontaire ou automatique. On parle de traitement volontaire lors d'une tâche portant explicitement sur la magnitude du nombre, comme la comparaison, l'estimation, ou encore le jugement de similarité ou de magnitude.

Le traitement est automatique lorsque, lors d'une tâche impliquant des nombres mais ne nécessitant pas une prise en compte de leur magnitude, cette dernière a tout de même un effet sur les performances. La tâche la plus courante dans ce cas est le stroop numérique, qui consiste à demander au sujet de comparer la taille physique (police de caractère) de deux nombres en désignant le plus grand nombre physiquement. On observe alors un effet de la magnitude du nombre, ou effet de congruence, sur les performances en comparaison de taille physique. En effet, la réponse est moins rapide et précise lorsque le nombre ayant la magnitude la plus élevée est le plus petit physiquement (Girelli et al., 2000, Ganor-Stern et al., 2007).

Quelques publications ont étudié la façon dont cette automaticité s'applique au traitement des nombres à plusieurs chiffres, en utilisant une tâche de stroop numérique modifiée. Les paires présentées étaient composées de nombres à quatre chiffres contenant trois zéros et un chiffre entre 1 et 9, par exemple 0300 et 0003. On retrouve dans ces études un effet de congruence similaire à celui observé lors d'un stroop numérique classique : les performances des participants étaient meilleures si le nombre dont le seul chiffre avait une plus grande valeur de position (0300) était physiquement plus grand que le nombre dont le

chiffre avait une valeur de position plus faible (0003). De plus, l'effet de congruence était plus marqué lorsque l'écart de position était plus élevé, par exemple 0300 vs 0003 montrait un effet de congruence plus fort que 0300 vs 0030. On peut donc en conclure que l'information positionnelle dans les nombres à plusieurs chiffres peut elle aussi être traitée de manière automatique (Garcia-Orza et al., 2017 ; Kallai & Tzelgov, 2012).

2. Méthode

2.1. Protocole de recherche

La recherche bibliographique a été effectuée entre le 18 avril et le 5 mai 2023 sur 4 bases de données spécialisées dans plusieurs domaines : ERIC pour les sciences de l'éducation, Cochrane Library et PubMed pour la médecine, et PsychInfo pour la psychologie. Cette recherche a été menée en utilisant les combinaisons de mots-clés listées en Annexe A. Ces mots-clés ont été choisis en accord avec la problématique et des recherches préliminaires effectuées avec le moteur de recherche Google Scholar ont permis de vérifier leur pertinence. Des critères d'éligibilité correspondant à la problématique ont été choisis et rédigés avant le début de la recherche et sont détaillés plus bas. Un travail de veille a été effectué après la fin de la recherche systématique pour détecter d'éventuelles nouvelles publications.

Pour chaque base de données, les données suivantes ont été extraites : titre, auteurs, résumé, année de publication, revue de publication. Ces données ont été triées dans un tableau Excel afin d'éliminer les duplicatas. Elles ont ensuite fait l'objet d'une double lecture afin de déterminer si les articles correspondaient aux critères choisis pour cette revue. Les articles ainsi retenus ont ensuite été lus dans leur intégralité pour valider leur inclusion.

Les bibliographies des articles sélectionnés ont également été étudiées afin d'en extraire les articles pertinents n'étant pas ressortis lors de la recherche systématique. Les titres, auteurs et résumés de chaque article cité ont été lus et soumis aux mêmes critères d'éligibilité que les articles résultants de la recherche par mots-clés.

2.2. Critères d'éligibilité

2.2.1. Sujet de l'étude

Sont incluses dans cette revue les études portant sur les mécanismes cognitifs spécifiques au traitement des nombres à plusieurs chiffres à travers différentes tâches. Parmi celles-ci, nous avons choisi d'exclure les études portant sur l'influence du genre, ainsi que celle de la ou des langues parlées sur ce traitement. Ces deux catégories d'études représentent des problématiques parallèles à celle traitée ici et pourraient faire l'objet d'une autre revue.

2.2.2. Population

Cette revue s'intéresse à une population d'enfants âgés de 2 à 15 ans ayant un développement typique. Les études portant spécifiquement sur des sujets en difficultés scolaires, atteints de troubles des apprentissages mathématiques ou d'autres troubles ont été exclues. Concernant les études portant à la fois sur des enfants et des adultes, seules les données concernant les enfants ont été prises en compte, lorsque celles-ci étaient traitées séparément.

2.2.3. Types d'études

Nous avons choisi de sélectionner pour cette revue les études expérimentales portant sur un échantillon conséquent. Sont donc exclues les études de cas ou de cas multiples, les revues de littérature ainsi que les modélisations informatiques.

2.2.4. Langue

Pour permettre l'analyse des articles sélectionnés, seules ont été retenues les études rédigées en langue anglaise ou française.

3. Synthèse

Cette revue a permis de retenir 17 études publiées entre 2004 et 2022. Les études ont été sélectionnées selon le diagramme de flux présenté en Annexe B.

3.1. Caractéristiques des études

3.1.1. Populations

On retrouve parmi les 17 études retenues 5 études ayant été menées sur des enfants autrichiens, tous germanophones, 6 sur des enfants américains, 3 sur des enfants belges, dont 2 sur des francophones et 1 sur des flamands, 2 sur des enfants chinois et 1 sur des enfants allemands. Au vu de la diversité des nationalités et pour une meilleure compréhension des données, toutes les informations sur le niveau scolaire seront ici transmises par leur équivalent français. Les participants ont été recrutés directement dans leur école dans 6 des études, par des annonces locales (associations, clubs, événements locaux) dans 2 des études et dans une base de données de participants dans 2 études. La méthode de recrutement n'est pas citée dans 7 études.

Les études retenues portent sur des enfants de 3 à 12 ans, les plus jeunes étant en maternelle ou non scolarisés et les plus âgés en 5^e. Plus précisément, 3 études portent sur des enfants en maternelle ou non scolarisés, 1 étude porte sur des enfants de maternelle et élémentaire, 10 études portent sur des enfants d'élémentaire, dont 3 uniquement sur des enfants en CP, 2 études portent sur des enfants d'élémentaire et collège et enfin une étude intègre des enfants des trois établissements, de 5 ans à 11 ans. Presque tous les groupes étudiés étaient mixtes, à l'exception d'un groupe recruté uniquement dans une école pour filles dans l'étude de Chan et al. (2011).

11 études sur les 17 retenues donnent des informations sur les caractéristiques scolaires et cognitives des participants. Parmi celles-ci, 3 mentionnent simplement que les participants n'ont pas de difficulté en mathématiques, 4 ont fait passer un test de QI préalable pour écarter les enfants dont les scores sont plus d'un écart-type en dessous de la moyenne, et 2 ont évalué

les fonctions cognitives (empan mnésique, test de Flanker pour l'inhibition, matrices du test de Weiss). Par ailleurs, 7 vérifient la vision des participants.

De plus, 5 des études donnent des informations sur le niveau socio-économique des participants, et 5 études prennent en compte les enseignements scolaires attendus pour le pays de l'étude à l'âge du test. Enfin, 4 études ont écarté les enfants ayant un pourcentage d'erreurs jugé trop important lors de l'expérimentation.

Tableau 1 : Présentation des effectifs et âges des participants de chaque étude

Année	Auteurs	Participants
2014	Byrge, Lisa ; Smith, Linda B. ; Mix, Kelly S.	172 participants : 41 de 4 ans ; 72 de 5 ans ; 59 de 6 ans
2011	Chan, Winnie Wai Lan ; Au, Terry K. ; Tang, Joey	390 participants : 90 CP ; 81 CE1 ; 78 CE2 ; 63 CM1 ; 78 CM2
2016	Dietrich, Julia F. ; Huber, Stefan ; Dackermann, Tanja ; Moeller, Korbinian ; Fischer, Ursula	43 participants du début à la fin du CP
2021	Kong, Michelle Nga Ki ; Chan, Winnie Wai Lan	187 participants : 74 MSM ; 97 GSM
2018	Lai, Maxine ; Zax, Alexandra ; Barth, Hilary	118 participants dont 75 enfants : 17 de 7 ans ; 18 de 8 ans ; 20 de 9 ans ; 20 de 10 ans
		120 participants dont 96 enfants : 16 de 7 ans ; 21 de 8 ans ; 19 de 9 ans ; 20 de 10 ans ; 20 de 11 ans
2011	Mann, Anne ; Moeller, Korbinian ; Pixner, Silvia ; Kaufmann, Liane ; Nuerk, Hans-Christoph	72 participants du CE1 au CM1
2012	Mann, Anne ; Moeller, Korbinian ; Pixner, Silvia ; Kaufmann, Liane ; Nuerk, Hans-Christoph	78 participants du CE1 au CM1
2022	Meijer, Anne-Merel ; Aben, Bart ; Reynvoet, Bert ; Van den Bussche, Eva	168 participants , dont 127 enfants : 38 CE1 ; 42 CM1 ; 47 6e
2014	Mix, Kelly S. ; Prather, Richard W. ; Smith, Linda B. ; Stockton, Jerri DaSha	Étude 1 : 91 participants : 31 maternelle ; 25 CP ; 35 CE1
		Étude 2 : 92 participants : 26 de 3 ans ; 32 de 4 ans ; 34 de 5ans
		Étude 3 : 24 participants en GSM
2009	Moeller, Korbinian ; Pixner, Silvia ; Kaufmann, Liane ; Nuerk, Hans-Christoph	130 participants en CP
2007	Mussolin, Christophe ; Noël, Marie-Pascale	60 participants : 20 CE1 ; 20 CE2 ; 20 CM1
2008	Mussolin, Christophe ; Noël, Marie-Pascale	58 participants : 20 CE1 ; 20 CE2 ; 18 CM1

2004	Nuerk, Hans-Christoph ; Kaufmann, Liane ; Zoppoth, Sabine ; Willmes, Klaus	80 participants : 20 CE1 ; 20 CE2 ; 18 CM1 ; 22 CM2
2009	Pixner, Silvia ; Moeller, Korbinian ; Zuber, Julia ; Nuerk, Hans-Christoph	128 participants en CP
2016	Thompson, Clarissa A. ; Ratcliff, Roger ; McKoon, Gail	91 participants : 19 CP ; 26 CE1/CE2 ; 27 CM1/CM2 ; 19 6e/5e
2022	Williams, Katherine ; Zax, Alexandra ; Patalano, Andrea L. ; Barth, Hilary	Étude 1 : 73 participants : 11 de 5 ans ; 21 de 6 ans ; 20 de 7 ans ; 21 de 8 ans
		Étude 2 : 27 participants : 7 de 9 ans ; 8 de 10 ans ; 12 de 11 ans
2019	Yuan, Lei ; Prather, Richard W. ; Mix, Kelly S. ; Smith, Linda B.	Étude 1 : 176 participants : 44 de 3 ans ; 43 de 4 ans ; 45 de 5ans ; 44 de 6ans
		Étude 2 : 54 participants : 15 de 3 ans ; 13 de 4 ans ; 13 de 5 ans ; 13 de 6 ans
		Étude 3 : 129 participants : 32 de 3 ans ; 36 de 4 ans ; 31 de 5 ans ; 31 de 6 ans
		Étude 4 : 62 participants : 13 de 3 ans ; 19 de 4 ans ; 16 de 5 ans ; 14 de 6 ans
		Étude 5 : 54 participants : 14 de 3 ans ; 13 de 4 ans ; 13 de 5 ans ; 14 de 6 ans

3.1.2. Méthodes

Les études retenues sont toutes des études de psychologie cognitive qui visent à mettre en évidence les mécanismes cognitifs mis en jeu lors du traitement d'un nombre. À la différence des études qui s'intéressent aux effets d'une intervention, elles ne requièrent pas de comparer les résultats entre deux groupes de sujets. Parmi les 17 études, la plupart mesurent les performances des sujets durant une ou plusieurs sessions espacées de quelques jours. Seules 3 études adoptent une démarche longitudinale en suivant une cohorte d'enfants sur plusieurs mois ou plusieurs années (Dietrich et al., 2016 ; Mann et al., 2011 ; Mann et al., 2012).

Les tâches utilisées pour étudier le traitement des nombres à plusieurs chiffres sont principalement des tâches mettant en jeu le traitement de nombres présentés visuellement sous forme symbolique (comparaison, identification, placement sur une ligne numérique) mais quelques études utilisent des tâches de production comme la dictée de nombres. Ainsi, on retrouve la tâche de comparaison dans 10 études sur 17, le stroop numérique dans 4 études, le

placement sur une ligne numérique dans 4 études, l'identification d'un nombre parmi plusieurs propositions dans 2 études et la dictée de nombres dans 2 études également.

Certaines tâches sont très liées à une problématique spécifique dans le traitement du nombre à plusieurs chiffres. Les deux tendances les plus marquées sont l'utilisation des tâches de comparaison pour évaluer l'effet de compatibilité et du stroop numérique pour étudier le traitement automatique du nombre.

Concernant les stimuli utilisés, 11 études sur 17 étudient uniquement les nombres à deux chiffres, 4 études les nombres à trois chiffres, et 2 études portent à la fois sur les nombres à deux et à trois chiffres.

3.1.3. Qualité des études

La qualité méthodologique des études a été évaluée en s'inspirant de la liste de critères de l'outil AXIS (Downes et al., 2016), consultable en Annexe D. En l'absence d'outils correspondant exactement à la méthodologie des études sélectionnées, cet outil a été utilisé comme un guide des indicateurs principaux d'une méthodologie robuste mais n'a pas pu donner lieu à une note ou une catégorisation rigoureuse de la qualité des études. Les items 7, 9, 13 et 14 ont notamment été supprimés, puisqu'ils correspondaient à des études diffusant un questionnaire, ce qui n'est le cas d'aucune des études de notre revue.

Les résultats de chaque item de l'outil AXIS sont listés dans le tableau 2. Toutes les études remplissent la majorité des critères énoncés, les études ayant les moins bons résultats remplissant tout de même 12 critères sur les 16 retenus. Concernant les critères non satisfaits, une partie d'entre eux porte sur la population : la justification de la taille de l'échantillon n'est présente que dans 4 études sur 17, tandis que la description de la méthode de recrutement n'est présente que dans 10 études sur 17. Parmi les études ayant décrit leur méthode de recrutement, on juge que cette méthode ne permet pas la sélection d'un échantillon représentatif de la population étudiée dans une étude (Chan et al., 2011), puisque les participants ont été recrutés dans une école de filles, donnant donc un échantillon entièrement féminin. Un autre critère satisfait par peu d'études porte sur la discussion, où seules 5 études sur 17 mentionnent clairement les limites de leur méthode et discutent de celles-ci. Enfin, concernant la présence de conflits d'intérêts et les garanties éthiques, aucune étude ne donne

d'élément concret permettant d'affirmer une faiblesse de méthodologie, mais plusieurs études ne donnent pas les informations permettant d'affirmer l'inverse : 3 études ne mentionnent pas leur financement et ne déclarent pas clairement l'absence de conflits d'intérêts, tandis que 12 études ne citent pas explicitement les garanties éthiques de leur étude, notamment le consentement éclairé des participants.

Tableau 2 : Analyse qualitative selon AXIS (Downes et al., 2016)

	1. Clarté des objectifs	2. Cohérence objectifs - méthode	3. Justification de la taille d'échantillon	4. Définition de la population	5. Représentativité de la population	6. Pertinence de la méthode de recrutement	8. Pertinence des variables mesurées	10. Outils statistiques	11. Possibilité de reproduire l'étude	12. Description des données	15. Cohérence interne des résultats	16. Adéquation avec la méthode décrite	17. Cohérence résultats - conclusions	18. Discussion des limites de l'étude	19. Conflits d'intérêt	20. Considération éthique
Byrge et al., 2014	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Nm
Chan et al., 2011	Oui	Oui	Non	Oui	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui
Dietrich et al., 2016	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Nm	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui
Kong et Chan, 2021	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui
Lai et al., 2018	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Nm
Mann et al., 2011	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Nm	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Nm
Mann et al., 2012	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Nm	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Nm
Meijer et al., 2022	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Nm	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui
Mix et al., 2014	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Nm
Moeller et al., 2009	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Nm
Mussolin et Noël, 2007	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Nm
Mussolin et Noël, 2008	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non	Non	Oui

Nuerk et al., 2004	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Nm	Oui	Non	Nm							
Pixner et al., 2009	Oui	Oui	Non	Oui	Oui	Nm	Oui	Non	Nm							
Thompson et al., 2016	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Nm	Oui	Non	Nm							
Williams et al., 2022	Oui	Nm														
Yuan et al., 2019	Oui	Oui	Non	Oui	Nm											
Nm : Non mentionné																

3.1.4. Modèles théoriques de référence

Toutes les études ne font pas référence à un ou des modèles théoriques précis dans leur analyse. Une majorité des études retenues (9 sur 17) étudie le traitement du nombre à travers le modèle de traitement holistique ou décomposé, en cherchant à mesurer des effets en faveur de l'un ou l'autre au cours du développement. Une étude (Meijer et al., 2022) s'appuie sur la théorie des mécanismes de contrôle proactif ou rétroactif de Braver (2012) et une étude (Byrge et al., 2014) cite la méthode d'analyse des erreurs selon Piaget (Flavell, 1963) comme moyen d'observer le développement du nombre chez l'enfant.

On remarque qu'en isolant les 4 études portant entièrement ou en partie sur des enfants ayant un âge inférieur à 6 ans, en maternelle ou non scolarisés, seule une étude sur 4 (Kong et Chan, 2021) s'appuie sur le modèle de traitement holistique ou décomposé du nombre. Cette proportion est largement inférieure aux études portant sur les enfants d'élémentaire et collègue, où 8 études sur 13 s'appuient sur ce modèle.

3.2. Résultats et conclusions théoriques

En raison des thématiques diverses abordées par les articles au sein du traitement des nombres à plusieurs chiffres, il n'est pas possible de regrouper les données pour en faire une réelle analyse quantitative. Cependant l'analyse qualitative des 17 articles retenus permet d'obtenir une vue d'ensemble sur les connaissances actuelles sur la manière dont se développe ce traitement chez l'enfant.

3.2.1. Acquisition du nombre

Avant d'aborder les différents modèles de traitement du nombre, plusieurs études s'intéressent dans un premier temps à la construction du nombre à plusieurs chiffres, pour savoir quels sont les âges ou les étapes marquantes de cette construction, et quelles en sont les bases cognitives.

3.2.1.1. Émergence du nombre à plusieurs chiffres

Toutes les études menées sur des jeunes enfants (moins de 6 ans) que nous avons retenues s'accordent sur deux points majeurs : ces jeunes enfants ont des compétences dans le traitement des nombres à plusieurs chiffres d'une part, et celles-ci augmentent avec l'âge d'autre part. Dans toutes les tâches testées (comparaison, identification, dictée) les enfants de moins de 6 ans montrent un taux de réussite qui suggère que la notion de nombre à plusieurs chiffres émerge avant un apprentissage explicite. L'âge exact d'apparition semble varier selon la tâche et les enfants testés, mais des performances significatives sont mesurées dès l'âge de 3 ans, notamment en comparaison (Mix et al., 2014 ; Yuan et al., 2019). Par ailleurs, les performances dans toutes les tâches proposées sont positivement corrélées à l'âge des participants (Byrge et al., 2014 ; Mix et al., 2014 ; Yuan et al., 2019). Si ces résultats font donc consensus, l'analyse approfondie des résultats de ces études nous permet de préciser la manière dont ces compétences se développent.

Byrge et al. (2014) ont proposé à des enfants de moins de 6 ans, n'ayant donc pas suivi d'enseignement formel des nombres, une tâche de dictée de nombres à trois chiffres. Les résultats montrent qu'avant 6 ans, les enfants produisent la forme exacte du nombre dans moins de 10 % des essais, contre 33 % des essais à l'âge de 6 ans. Ils observent cependant une écriture qu'ils nomment *expanded writing*, où des chiffres sont ajoutés à la séquence de chiffres attendue. Ces ajouts sont en majorité des zéros entre chaque chiffre pour correspondre à chaque mot entendu. On retrouvera par exemple 642 écrit 600402 ou 6100402. Cette écriture est retrouvée dans 10 % des productions à 4 ans, 54 % à 5 ans, et seulement 48 % à 6 ans, lorsque le nombre de productions correctes augmente. Il semble donc que cette forme d'écriture des nombres soit une transition vers la forme correcte.

En l'absence d'enseignement explicite, les auteurs suggèrent que les enfants utilisent les nombres auxquels ils sont le plus exposés au quotidien, notamment les nombres des dizaines et des centaines, comme 20, 40, 100 ou 200, pour transcrire directement le code verbal mots à mots. Cela se manifeste par une intégration de manière visible des mots comme « cent » ou « mille » qui n'ont pas d'équivalent dans la syntaxe écrite. Ces interprétations sont retrouvées dans des études sur le lien entre langage et apprentissage du nombre (Pixner et al., 2011 ; Zuber et al., 2009).

L'écriture de nombres avec des ajouts de chiffres a été mise en relation avec une mauvaise compréhension du système de position dans des études précédentes, notamment chez des enfants en élémentaire (Moeller et al., 2011). Cependant les résultats de Byrge et al., (2014) semblent montrer que ce type d'écriture est une étape normale de la construction du nombre écrit, et que c'est le maintien de cette écriture dans le temps qui peut être signe de difficultés dans le traitement du nombre écrit.

Bien que cette étude montre que les jeunes enfants ont des connaissances sur les nombres à plusieurs chiffres, il n'est pas évident que celles-ci reflètent une compréhension du système de position et un accès à la magnitude du nombre par le code arabe. Yuan et al. (2019) suggèrent que les premières connaissances sur les nombres à plusieurs chiffres émergent d'abord par le code arabe qui dans un premier temps se suffit à lui-même et n'est pas lié à la magnitude du nombre. Une tâche d'identification de nombre a été proposée : un nombre à deux chiffres était donné à l'oral à des enfants de 5 et 6 ans en posant la question « *Which is X ?* », et ceux-ci devaient désigner la bonne réponse parmi deux nombres écrits ou parmi deux ensembles de points. Les résultats montrent que la proportion de bonne réponse est supérieure à 50 % pour la désignation d'un nombre écrit, mais pas pour la désignation d'ensemble de points. Cela signifie que dans la modalité « nombre écrit », les enfants ont mieux répondu que s'ils avaient donné toutes leurs réponses au hasard, ce qui n'est pas le cas dans la modalité « ensemble de points ». Les enfants de 4 ans ne montrent pas des performances supérieures au hasard dans aucune des deux tâches. De la même manière, après un re-test à cette épreuve, les performances montrent une amélioration plus marquée dans la modalité « nombres écrits » que dans la modalité « ensemble de points ». Ces résultats montrent que, pour des nombres à plusieurs chiffres, les enfants à partir de 5 ans font des liens entre code verbal et code arabe, mais pas entre code verbal et magnitude.

Le même type d'expérience a été répliqué lors de tâches de comparaison (« *Which is more ?* ») et les enfants montrent dès 3 ans des performances supérieures au hasard dans les deux modalités (ensemble de points et nombre écrit). Les performances dans la modalité « ensemble de points » sont en moyenne légèrement meilleures que dans la modalité « nombre écrit », ce qui correspond au développement connu du système numérique approximatif (SNA) (Barth et al., 2006 ; Gilmore et al., 2014). Les tâches de comparaison permettent également de mettre en évidence l'absence de corrélation entre les performances dans chaque modalité. Ainsi ces deux compétences se développeraient indépendamment l'une de l'autre. Ces résultats correspondent aux travaux de Kolkman et al. (2013), qui expliquent que les compétences symboliques et non symboliques sont séparées à l'âge de 4 ans, et s'unifient à partir de l'âge de 6 ans. Enfin Yuan et al., (2019) retrouvent une corrélation entre les performances en comparaison et en identification de nombres écrits. Cela semble indiquer que les connaissances des enfants de moins de 6 ans sur les nombres à plusieurs chiffres correspondent à un ensemble de règles comprenant à la fois leur nom, qui permet l'identification, et leur ordre, qui permet la comparaison.

Les résultats de Yuan et al. (2019) reproduisent ceux de Mix et al. (2014) qui ont testé les mêmes tâches d'identification (« *Which is X?* ») et de comparaison (« *Which is more?* ») dans trois modalités différentes : nombre écrit, ensemble de points et ensemble de blocs, chez des enfants de 4 à 6 ans. Les auteurs notent une proportion de bonnes réponses supérieure au hasard dans toutes les conditions dès l'âge de 3 ans. Lors de la tâche d'identification de nombre écrit, les auteurs remarquent deux stratégies : la reconnaissance de mots-nombres courants, comme 14, 20 ou 50, et la reconnaissance du mot « cent ». Les enfants sont donc plus performants dans la reconnaissance d'un nombre familier, ou d'un nombre à trois chiffres, contenant le mot « cent », en opposition à un nombre à deux chiffres où ce mot est absent, par exemple 607 vs 67. Ces stratégies vont dans le sens de l'hypothèse de Byrge et al. (2014), selon laquelle les jeunes enfants remarqueraient des régularités dans les nombres qu'ils rencontrent au quotidien et généraliseraient ces connaissances à l'ensemble des nombres écrits.

3.2.1.2. Rôle de l'apprentissage explicite du système de position

Avec une tâche de comparaison, de nombres à deux chiffres d'une part, et d'ensemble de points correspondant à ces nombres d'autre part, Thompson et al. (2016) ont retrouvé un effet de distance chez des enfants de différentes classes, du CP à la 5^e. L'effet de distance est similaire dans les deux modalités de tests ; en code arabe (nombre écrit) ou en code analogique (ensemble de points). De plus, pour chaque enfant, les performances en comparaison de nombres écrits sont corrélées à celles en comparaison d'ensembles de points. Ces résultats contrastent avec ceux de Yuan et al. (2019), cités plus haut, pour des enfants plus jeunes (4 à 6 ans) qui ne trouvaient pas de corrélation entre performances aux tâches symboliques et non symboliques. À partir de l'élémentaire, on observe donc que les enfants font des liens entre le nombre écrit et sa magnitude. Cette mise en relation des différentes formes de représentations du nombre à partir de l'âge de 6 ans correspond également aux travaux de Kolkman et al. (2013) cités plus haut.

L'âge de 6 ans correspondant dans la plupart des pays occidentaux à l'entrée à l'école élémentaire et à l'apprentissage explicite du code arabe et de son système de position, il est possible de se questionner sur le rôle de cet apprentissage dans le développement du traitement des nombres à plusieurs chiffres. Mix et al. (2014) en répétant leurs tâches d'identification (« *Which is X?* ») et de comparaison (« *Which is more?* ») dans trois modalités (nombre écrit, ensemble de points, ensemble de blocs) sur des enfants de grande section de maternelle (GSM), de CP et de CE1, observent que, pour la tâche d'identification, la proportion de bonnes réponses est plus élevée dans la modalité « nombre écrit » que dans les deux autres. Cette différence est significative pour les CP et CE1, mais négligeable chez les GSM, qui montrent des performances similaires dans toutes les modalités. Les auteurs font donc l'hypothèse que l'apprentissage explicite joue un rôle dans ce changement.

Pour confirmer cette hypothèse, Mix et al. (2014) ont sélectionné des enfants entre 3 et 6 ans n'ayant pas eu d'enseignement explicite sur les nombres à plusieurs chiffres et leur ont fait réaliser les tâches de comparaison et d'identification dans les trois modalités citées plus haut, avant et après un programme d'enseignement spécifique. Les enfants ont été répartis en deux groupes : le premier a bénéficié de cinq sessions d'enseignement centrées sur la

manipulation de blocs correspondant à la base 10, tandis que le second a bénéficié de cinq sessions centrées sur l'apprentissage du code arabe en lui-même. On observe que les enfants ayant suivi l'enseignement centré sur la manipulation s'améliorent principalement dans la modalité « ensemble de blocs », alors que les enfants ayant suivi un enseignement centré sur le code arabe s'améliorent dans toutes les modalités. Les auteurs remarquent que l'absence de groupe contrôle limite cette étude, mais que les sessions ayant lieu dans un laps de temps réduit (3 semaines), il est peu probable que les progrès mesurés soient seulement dus au développement de l'enfant.

Cette étude tend à prouver que l'apprentissage explicite, en particulier des symboles du code arabe, joue un rôle dans le développement des compétences des enfants dans le traitement du nombre écrit. De plus, la différence entre l'apprentissage du code et l'apprentissage par la manipulation semble suivre l'hypothèse de Yuan et al. (2019), selon laquelle les enfants maîtrisent les nombres à plusieurs chiffres d'abord par le code arabe en lui-même, le lien avec les compétences non symboliques se faisant plus tard dans le développement.

3.2.2. Arguments en faveur des différents modèles

Une grande proportion des études de cette revue s'appuie sur les différents modèles de traitement du nombre à plusieurs chiffres proposés par Nuerk et al. (2001), afin de savoir lequel est le plus utilisé chez l'enfant, et s'il y a une évolution dans l'utilisation des différents modes de traitement. Les conclusions sur ce sujet divergent selon les études et les tâches proposées, cependant une grande majorité des études s'accorde pour écarter le modèle holistique, puisqu'il ne permet pas d'expliquer l'effet de compatibilité qui est observable sous différentes formes et à différentes intensités, à tous les âges du développement.

3.2.2.1. Modèle hybride

Si tous les auteurs s'accordent sur le fait que le modèle holistique du traitement du nombre à plusieurs chiffres ne suffit pas à expliquer les effets observés lors des études retenues, certains auteurs ne rejettent pas entièrement la possibilité d'une part de traitement holistique dans le traitement du nombre. Mussolin et Noël (2008) retrouvent, lors d'une tâche de comparaison de nombres à deux chiffres proposée à des enfants scolarisés en élémentaire

(du CE1 au CM1), que la compatibilité d'une paire de nombres a un impact sur le taux d'erreurs, qui est plus élevé pour les paires incompatibles, mais pas sur le temps de réponse des participants. Ils interprètent ces résultats comme une indication que les traitements décomposé et holistique se font en parallèle l'un de l'autre.

3.2.2.2. Modèle décomposé séquentiel puis parallèle

Nuerk et al. (2004), lors d'une tâche de comparaison de nombres à deux chiffres avec des enfants scolarisés en élémentaire (CE1 à CM2) retrouvent un effet de compatibilité pour tous les âges sur le nombre d'erreurs. En effet, une paire de nombres incompatibles, comme 45 et 62, a beaucoup plus de chance de donner lieu à une réponse erronée qu'une paire de nombres compatibles, comme 45 et 68. Ce résultat valide un modèle décomposé de traitement du nombre dès l'école élémentaire.

Cependant, les résultats sur le temps de réponse sont moins tranchés : on observe selon l'âge soit un effet de compatibilité simple, c'est-à-dire que le temps de réponse est plus faible pour les paires compatibles, soit un effet de compatibilité inverse, c'est-à-dire que le temps de réponse est plus faible pour les paires incompatibles, comme expliqué plus haut dans les parties 1.2.1.1. et 1.2.2.2. respectivement. Les enfants de CM2 montrent un effet de compatibilité simple significatif, similaire à celui observé chez l'adulte, tandis que les enfants plus jeunes montrent un effet de compatibilité moins marqué, notamment les enfants de CE1 qui montrent un effet de compatibilité inverse majoritaire, tandis que les enfants de CE2 et CM1 montrent un effet de compatibilité plus faible, modulé par les caractéristiques des chiffres des paires de nombres à comparer. Ainsi l'effet de compatibilité dans ces groupes d'âges est diminué par une distance entre unités faible, par exemple 44 vs 62 a une distance entre unités de 2, et provoquera un effet de compatibilité plus faible que 48 vs 62, avec une distance entre unités de 5. On observe donc une progression de l'effet de compatibilité avec l'âge. Les auteurs notent également que, pour tous les groupes d'âge, l'effet de compatibilité est plus marqué lorsque la distance entre dizaines est plus faible, donc quand les nombres sont plus proches et la comparaison plus difficile. On peut également noter que durant cette expérience, les enfants n'ont pas été testés sur des comparaisons intra-dizaines, avec des paires ayant le même chiffre des dizaines, comme 22 et 29, ce qui pourrait avoir un impact sur les résultats.

L'effet de compatibilité simple étant associé à un traitement décomposé parallèle d'une part, et l'effet de compatibilité inverse étant associé à un traitement décomposé séquentiel d'autre part, les résultats en terme de temps de réponse semblent à première vue montrer que le traitement décomposé du nombre est plutôt séquentiel au début du développement, et devient parallèle à l'âge adulte. Cependant les résultats en terme de proportion d'erreurs, qui montrent un effet de compatibilité à tous les âges, laissent à penser que le traitement décomposé parallèle est déjà présent au début du développement, et que les traitements parallèle et séquentiel sont tous les deux utilisés en premier lieu, tandis que le traitement parallèle devient majoritaire par la suite.

Ces résultats sont retrouvés dans l'étude de Chan et al. (2011) utilisant une tâche de stroop numérique avec des enfants scolarisés en élémentaire, du CP au CM2. Similairement à la tâche de comparaison de Nuerk et al. (2004), les paires de nombres proposées ne comprenaient pas de comparaisons intra-dizaines. Les auteurs mesurent que la compatibilité d'une paire de nombres facilite l'apparition de l'effet de congruence, ce qui veut dire que la compatibilité facilite le traitement des nombres, même lorsque celui-ci est automatique. Cette forme d'effet de compatibilité, signe d'un traitement décomposé parallèle, est observée dans une grande majorité des cas (93%) chez les enfants du CE2 au CM2, alors que seulement 68 % des élèves de CP et CE1 montrent cet effet, et donc un traitement décomposé parallèle. Les auteurs émettent l'hypothèse qu'au début de l'élémentaire, tous les élèves n'ont pas encore fait la transition d'un traitement séquentiel à un traitement parallèle, confirmant ainsi les résultats précédents.

3.2.2.3. Modèle décomposé parallèle dominant

Pixner et al. (2009), en utilisant la même tâche de comparaison que l'étude de Nuerk et al. (2004) avec des enfants de CP uniquement, trouvent des résultats qui ne correspondent pas à un traitement séquentiel du nombre, qui serait attendu au début du développement de l'enfant. En effet, les auteurs mesurent un effet de compatibilité simple chez les enfants de CP, ce qui correspond à un traitement parallèle des différents chiffres composant le nombre. Une des pistes d'explication de cette différence de résultats est l'inclusion de comparaison intra-dizaines, par exemple 43 vs 48, dans les comparaisons proposées. Cette inclusion

forcerait les enfants à se détacher du chiffre des dizaines, privilégié dans le traitement séquentiel, puisqu'il ne permet pas d'atteindre une conclusion. Ainsi les enfants seraient capables dès le CP d'adapter leurs stratégies de traitement en fonction de la tâche demandée.

Ces travaux ont été poursuivis par Mann et al. (2011), qui ont réalisé une étude longitudinale en suivant les enfants du CE1 au CM1, en testant une fois par an les enfants avec une tâche de comparaison de nombres à deux chiffres, en intégrant des comparaisons intra-dizaines. Les résultats montrent un effet de compatibilité simple majoritaire à tous les âges, ce qui correspond à un traitement décomposé parallèle dominant. L'effet de compatibilité augmente lorsque la proportion de comparaisons intra-dizaines proposées augmente, ce qui montre que les enfants sont capables dès l'élémentaire de moduler leur stratégies attentionnelles en fonction de la tâche et du type de stimuli auxquels ils font face. De plus en comparant l'effet de compatibilité entre cette expérience, contenant des comparaisons intra-dizaines, et l'expérience de Nuerk et al. (2004), sans ces comparaisons, les auteurs observent que la différence d'effet de compatibilité entre les deux études augmente avec l'âge. Cela signifie que la capacité d'adaptation des stratégies attentionnelles augmente elle aussi avec l'âge.

L'étude longitudinale a également permis d'observer les trajectoires de développement des enfants. Même si la majorité des enfants utilisait déjà un traitement parallèle au début de l'expérience, les enfants chez qui on pouvait observer un effet de compatibilité inverse, démontrant un traitement séquentiel, ont eu tendance à évoluer vers un traitement décomposé, tandis que les enfants utilisant un traitement décomposé gardaient en majorité la même stratégie tout au long de l'étude. Ces tendances individuelles confirment donc les observations de Nuerk et al. en 2004, qui constataient que les traitements décomposés parallèle et séquentiel étaient tous les deux présents chez l'enfant dès le CE1, mais que le traitement privilégié par les enfants était le traitement séquentiel au début du développement, puis le traitement parallèle par la suite.

Cette étude longitudinale a été reproduite en étudiant spécifiquement les nombres à trois chiffres (Mann et al. 2012). L'analyse de tâches de comparaison de nombres à trois chiffres implique de mesurer des effets de compatibilité distincts : les effets de compatibilité unité-dizaine, unité-centaine, et dizaine-centaine. Cette étude se concentre sur les deux effets de

compatibilité impliquant le chiffre des centaines, ainsi que sur l'effet de distance entre centaines. L'effet de compatibilité dizaine-centaine, premièrement, est absent à tous les âges testés. Les hypothèses avancées par les auteurs pour expliquer cette absence sont soit un traitement visuo-spatial particulier de ces deux chiffres, soit du fait de la langue allemande dans laquelle a été réalisée cette étude, qui est une langue dite à inversion, pour laquelle la syntaxe du code oral est centaine-unité-dizaine, ce qui pourrait modifier le traitement du nombre, comme l'ont montré plusieurs études (Pixner et al., 2011).

L'effet de compatibilité unité-centaine est observable à partir du CE2 et l'effet de distance entre centaines est lui observable dès le CE1. Ces deux effets sont significatifs et augmentent avec l'âge. Ils montrent donc un traitement décomposé de plus en plus parallèle des nombres à trois chiffres. Les auteurs notent cependant que l'effet de compatibilité unité-centaine est plus faible et augmente moins vite que l'effet de compatibilité unité-dizaine mesuré dans les études précédentes (Nuerk et al., 2004 ; Pixner et al., 2009 ; Mann et al., 2011), indiquant que le traitement décomposé parallèle des nombres à trois chiffres se construit plus tard dans le développement que pour les nombres à deux chiffres.

3.2.2.4. Effet du chiffre le plus à gauche

Williams et al. (2022) ont approché le traitement du nombre à plusieurs chiffres en étudiant la présence de l'effet du chiffre le plus à gauche chez l'enfant. Cet effet consiste à attribuer une magnitude plus grande à un nombre dès lors que le chiffre des dizaines passe à la dizaine suivante. Ainsi 71 sera placé plutôt plus à droite que sa réelle place sur la ligne numérique tandis que 69 sera placé plutôt vers la gauche. Pour cela, ils ont utilisé une tâche de placement de nombres sur une ligne numérique de 0 à 100, avec des enfants ayant entre 5 et 8 ans dans une première expérience, puis ayant entre 9 et 11 ans dans une deuxième, toujours avec la même tâche. Leurs résultats montrent que l'effet du chiffre de gauche émerge à partir de l'âge de 8 ans et reste présent tout au long du développement. Cependant les auteurs interprètent l'absence de l'effet chez les enfants plus jeunes comme la conséquence d'une imprécision globale du placement des nombres sur la ligne, plutôt que d'un traitement différent.

Les auteurs se sont également penchés sur la comparaison des estimations au sein d'une même dizaine, en essayant de savoir si les enfants montraient une différence de placement

entre 22 et 29 par exemple. Les enfants de 5 et 6 ans ne font pas de différence entre le placement de deux nombres appartenant à une même dizaine, ce qui confirme l'imprécision globale des estimations chez les jeunes enfants. En revanche, les enfants à partir de 7 ans différencient ces deux nombres dans leur placement, ce qui montre d'une part que l'effet du chiffre le plus à gauche n'est pas lié à un traitement isolé du chiffre des dizaines, puisque deux nombres ayant le même chiffre des dizaines sont différenciés, et d'autre part que la capacité à distinguer deux nombres dans une même dizaine émerge avant l'effet du chiffre le plus à gauche.

Concernant le modèle de traitement du nombre à plusieurs chiffres, selon Williams et al. (2022), l'effet du chiffre le plus à gauche serait aussi bien expliqué par le modèle holistique que par le modèle décomposé. Ainsi dans le modèle holistique, l'effet serait attribué à la lecture de gauche à droite, qui induit, malgré le traitement global, que le chiffre de gauche serait traité en premier chronologiquement, ce qui lui donnerait plus de poids, tandis que dans le modèle décomposé, l'effet serait expliqué par la prise en compte du système de position et donc à la magnitude plus importante attribuée au chiffre de gauche, ici les dizaines.

Dans une étude précédente en 2018, Lai et al. ont réalisé le même type d'expérience sur les nombres à trois chiffres en utilisant une tâche de placement des nombres sur une ligne de 0 à 1000, avec des enfants de 7 à 11 ans. Ils retrouvent un effet du chiffre le plus à gauche à partir de 7 ans sans contrainte de temps, et de 8 ans avec cette contrainte, ce qui tend à montrer que cet effet émerge légèrement plus tôt pour les grands nombres. Par ailleurs, une analyse du placement de nombres de la même centaine avec des magnitudes très différentes, appelées les paires *high-low*, comme 702 et 798, montre que les enfants de 7 et 8 ans ne font pas de différence entre le placement de deux nombres si ceux-ci appartiennent à la même centaine. Ces résultats semblent montrer que lors d'une tâche de placement, les enfants les plus jeunes se réfèrent uniquement au chiffre des centaines, et que les chiffres des dizaines et des unités ne sont intégrés que plus tard dans le développement, puisque les enfants à partir de 9 ans font bien une différence entre deux nombres dans la même centaine.

Ainsi si l'étude de Williams et al. (2022) ne permet pas de conclure sur le modèle privilégié pour le traitement du nombre à deux chiffres, celle de Lai et al. (2018) semble montrer que, dans le cadre d'une tâche de placement sur une ligne numérique, le traitement

des nombres à trois chiffres est séquentiel chez les jeunes enfants, avant d'intégrer les chiffres des dizaines et des unités par la suite.

3.2.3. Automaticité du traitement

3.2.3.1. Traitement automatique des nombres

Nous avons recensé dans cette recherche quatre études s'intéressant au traitement automatique, ou involontaire, des nombres à plusieurs chiffres chez l'enfant. La tâche utilisée dans toutes ces études est le stroop numérique, qui consiste à demander aux participants de sélectionner le nombre étant écrit le plus gros (police de caractère). Lorsque le temps de réponse est plus rapide pour une paire où la taille physique correspond aux magnitudes des nombres, donc lorsque le nombre le plus grand est écrit le plus gros, cette différence de temps est attribuée à l'interférence du traitement automatique de la magnitude, aussi appelé effet de congruence.

Mussolin et Noël en 2007 ont mis en évidence cet effet de congruence chez les enfants dès le CE1 pour les nombres inférieurs à 50, et dès le CE2 pour les nombres jusqu'à 100. Ces résultats ont été obtenus en présentant les paires de nombres dans la même police de caractère dans un premier temps, avant que les nombres ne changent de taille et que l'enfant désigne le plus gros des deux. Le temps précédant le changement de taille était établi selon l'âge de l'enfant et ses performances à une tâche de comparaison de nombres classique. Cette configuration permet donc aux enfants de commencer le traitement des nombres avant de devoir juger la taille.

La même équipe a répété le même type de tâche en changeant l'amorce de la comparaison. Au lieu d'être exposés aux nombres avant de devoir juger la taille, les enfants avaient tout de suite sous les yeux la paire de nombres de deux tailles différentes. Cette exposition était cependant précédée par un flash de quelques millisecondes, soit des nombres qui allaient suivre, soit de symboles neutres (#\$#\$#\$). La tâche fait ainsi appel à un traitement inconscient des nombres, puisque la présentation subliminale des nombres ne permet pas aux enfants d'engager un traitement volontaire. Dans cette configuration, les résultats montrent que les enfants de CE1 ne présentent pas d'effet de congruence, les enfants de CE2 ne

présentent un effet de congruence qu'avec une exposition aux nombres préalables et les CM1 présentent un effet de congruence dans tous les cas. Au regard de cette étude et de la précédente, on peut conclure que la vitesse de traitement joue un rôle central dans la possibilité d'un traitement automatique. Il est probable que l'effet de congruence n'apparaisse pas chez les enfants les plus jeunes car le traitement de la taille physique des nombres est bien plus rapide que le traitement de leur magnitude.

Des résultats différents ont été trouvés par Chan et al. (2011), qui ont utilisé une tâche de stroop numérique sans aucune exposition préalable aux nombres comparés, pour laquelle ils ont mesuré un effet de congruence, et donc un traitement automatique, dès le CP. Les auteurs expliquent ces résultats par la structure du système scolaire chinois, où les enfants sont plus exposés aux nombres à plusieurs chiffres et bénéficient d'un apprentissage précoce du système de position. Il faut également noter que les participants de cette étude ont été recrutés dans une seule et même école de filles à Hong Kong, ce qui peut biaiser les résultats.

Kong et Chan (2021) ont exploré le traitement automatique chez les très jeunes enfants scolarisés en maternelle. Pour cela ils ont adapté la tâche de stroop numérique pour se concentrer sur le traitement de l'information de position. Les paires proposées étaient composées de deux suites composées de trois symboles et un chiffre, où seule la position du chiffre variait d'une suite à l'autre, par exemple X6X vs XX6. On considère dans cette configuration que plus le chiffre est à gauche, plus sa magnitude est grande. Comme pour le stroop numérique classique, il était demandé aux enfants de juger la taille physique plutôt que la magnitude, en désignant le plus gros des deux.

Les résultats montrent un effet de congruence dès la maternelle, mais seulement si les écarts de magnitude sont suffisants. Ainsi l'effet de congruence est observable lorsque les paires ont un écart de position supérieur à deux, comme 6XX vs XX6, mais pas lorsque cet écart est de 1, par exemple X6X vs XX6.

3.2.3.2. Contrôle attentionnel

Plusieurs études citées précédemment notent des changements de stratégies de traitement, notamment entre un traitement décomposé séquentiel ou parallèle, qui apparaît très

tôt dans le développement. Ces changements de stratégies semblent être le reflet d'une adaptation aux stimuli proposés. Par exemple, pour les mêmes groupes d'âge, on observe une adaptation du traitement selon l'inclusion ou l'exclusion de comparaisons intra-dizaines, par exemple 22 et 29. Ces comparaisons spécifiques amèneraient les enfants à privilégier un traitement parallèle dès le début du développement puisqu'elles incitent l'enfant à porter aussi son attention sur le chiffre des unités (Pixner 2009 ; Mann et al., 2011, 2012), tandis que leur absence entraîne une proportion plus élevée de l'utilisation du traitement séquentiel, en particulier chez les enfants les plus jeunes (Nuerk et al. 2004).

Cette adaptation du contrôle attentionnel entraîne un changement de cible (chiffre des dizaines ou des unités), mais il peut également entraîner un changement du type d'attention employé pour chaque tâche. Meijer et al. (2022) ont étudié le contrôle attentionnel chez l'enfant (du CE1 à la 6^e) lors de comparaisons de nombres à plusieurs chiffres en s'appuyant sur la théorie des mécanismes de contrôle de Braver (2012), qui a déjà été employée pour les comparaisons de nombres chez l'adulte par Macizo et Herrera en 2013. Pour rappel cette théorie propose deux modes de contrôle attentionnel : le contrôle proactif, plus efficace mais plus coûteux, où le sujet anticipe les situations de conflits, et le contrôle rétroactif, où le sujet ne détecte les conflits que lorsqu'il y fait face directement.

Pour évaluer la présence d'un contrôle rétroactif ou proactif, les auteurs ont proposé deux listes de comparaisons de nombres à deux chiffres, l'une contenant 20 % de paires incompatibles, l'autre contenant 80 % de paires incompatibles. L'analyse des temps de réponse et des taux d'erreurs pour chacune de ces listes, comparés au modèle de Braver, montre que la liste principalement compatible entraîne un contrôle majoritairement rétroactif, tandis que la liste principalement incompatible entraîne un contrôle majoritairement proactif, ce qui correspond aux résultats mesurés chez l'adulte. Il existe donc des modulations du contrôle attentionnel chez l'enfant selon les nombres à comparer, qui est présent à tous les âges sans qu'on puisse noter d'évolution majeure liée à l'âge.

3.2.4. Compression de la ligne numérique mentale

Dans un premier temps, on note que Dietrich et al. (2016) ont évalué le lien entre tâche de placement sur une ligne numérique et compréhension du système de position. Ils ont testé

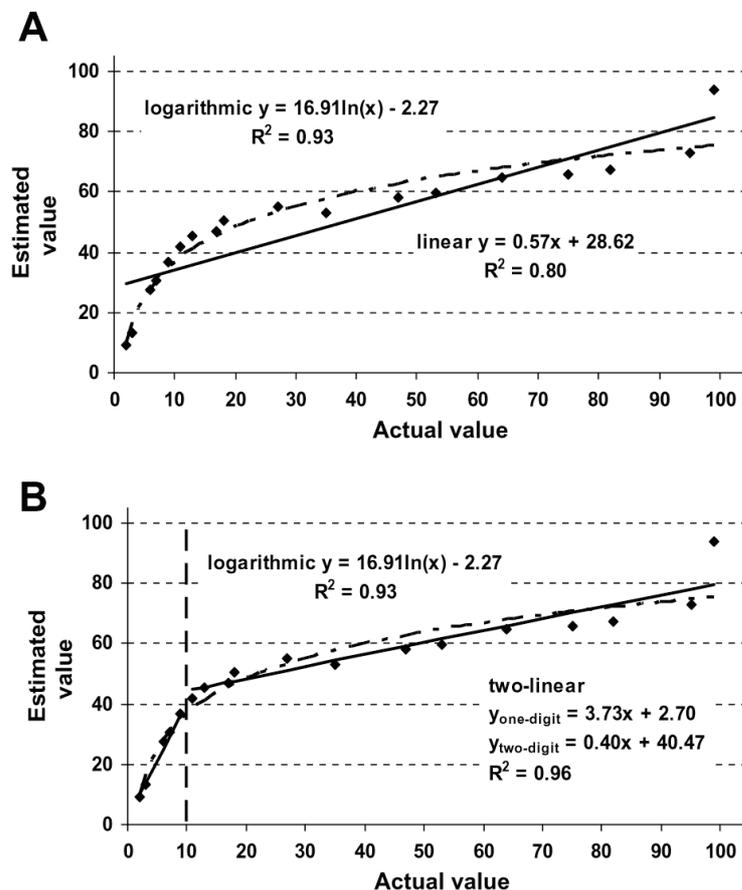
des enfants de CP, en début et en fin d'année scolaire, sur plusieurs tâches de traitement du nombre : placement sur une ligne numérique de 0 à 10, de 0 à 20 et de 0 à 100, transcodage (lecture et dictée) et problèmes arithmétiques. Il en ressort qu'il existe une corrélation positive entre les performances en placement sur une ligne numérique de 0 à 20 ou de 0 à 100 et les performances en transcodage, qui implique une bonne compréhension du système de position. En revanche on ne retrouve pas de corrélation entre les performances en placement sur une ligne numérique de 0 à 10 et celles en transcodage. Les auteurs en déduisent que la ligne numérique est une bonne mesure de la compréhension du système de position.

La différence entre placement sur une ligne de 0 à 10 et des lignes de 0 à 20 ou 0 à 100 peut être le reflet de la différence de traitement entre nombre à un seul chiffre et nombre à plusieurs chiffres.

Moeller et al. (2009) se sont posé la question de l'effet d'un traitement spécifique des nombres à plusieurs chiffres sur la ligne numérique mentale. En effet, l'effet de taille implique une non-linéarité de la LNM, qui peut être expliquée par plusieurs hypothèses, la plus répandue étant la représentation logarithmique des nombres, en particulier chez le jeune enfant. Cependant, la discontinuité de la ligne numérique mentale correspondant au traitement décomposé des nombres à plusieurs chiffres pourrait apporter une nouvelle explication à cet aspect logarithmique de la LNM. Pour étudier cette hypothèse, des enfants de CP ont effectué une tâche de placement sur une ligne numérique, de 0 à 10 dans un premier temps puis de 0 à 100. Les résultats montrent que la précision sur la tâche de 0 à 10 correspond à une représentation linéaire des nombres à un chiffre, contrairement à la tâche 0 à 100 dont les résultats correspondent à la représentation dite logarithmique attendue à cet âge. Les auteurs montrent ici que la forme de la courbe est mieux expliquée par une double linéarité, l'une correspondant au traitement des nombres à un seul chiffre, la seconde correspondant au traitement des nombres à plusieurs chiffres, comme on peut le voir sur la figure 2.

Les auteurs attribuent le changement d'inclinaison de la représentation à un traitement décomposé encore immature des nombres à deux chiffres chez l'enfant. Dans ce cadre, puisque les résultats de cette tâche sur une ligne de 0 à 100 chez l'adulte donnent une représentation linéaire de bout en bout, on pourrait émettre l'hypothèse que le traitement décomposé se transforme en traitement holistique au cours du développement. Cependant au vu des nombreux travaux sur l'effet de compatibilité (Nuerk et al., 2001 ; Nuerk et al., 2005 ;

Ganor-Stern et al., 2009; Knops et al., 2006 ; Korvorst & Damian, 2008 ; Macizo & Herrera, 2008, 2010 ; Pixner et al., 2009 ; Ratinckx et al., 2006 ; Wood et al., 2006 ; Nuerk et al. 2015), les auteurs jugent peu probable un traitement purement holistique du nombre à plusieurs chiffres à l'âge adulte. Le passage à une représentation plus précise des nombres de 0 à 100 serait expliqué par un traitement décomposé plus efficace, associé à des connaissances sur le système de position permettant de mettre en place des stratégies, en utilisant notamment des points de repères permettant de diviser la ligne numérique pour affiner le placement. Les auteurs mentionnent également l'hypothèse de la transition d'un traitement décomposé séquentiel à un traitement décomposé parallèle à l'âge adulte, en lien avec les résultats de Nuerk et al. (2004).



Figure

1 : Regression models based on the averaged estimates of all children per data point. (A) Differences between overall logarithmic (dashed line) and simple linear fitting (solid line) for the 0-to-100 scale. (B) Overall logarithmic (dashed line) versus two-linear fitting (solid line) of the 0-to-100 scale, élaboré par Moeller et al., 2009

4. Discussion

4.1 Principaux résultats

Nous tâcherons dans cette partie de rappeler les différents résultats et conclusions des études retenues, afin de répondre aux problématiques énoncées au début de ce mémoire.

4.1.1. Existe-t-il un ou des modes de traitement spécifiques aux nombres à plusieurs chiffres chez l'enfant ?

Il semble que le traitement des nombres à plusieurs chiffres soit différent du traitement des nombres à un seul chiffre chez l'enfant. En effet, les études retrouvent toutes un effet de compatibilité, qu'il soit simple ou inverse, dès le CP (Mussolin & Noël, 2008 ; Pixner et al., 2009 ; Moeller et al., 2009) et un effet du chiffre le plus à gauche à partir de l'âge de 7 ans (Williams et al., 2022 ; Lai et al., 2018). La présence de ces deux effets dès les débuts de l'apprentissage du nombre à plusieurs chiffres montre que le traitement des nombres n'est pas holistique, comme celui des nombres à un seul chiffre, mais qu'il existe un traitement séparé de chaque chiffre composant le nombre.

Ce traitement spécifique pourrait être une explication alternative à l'effet de taille et à la compression de la ligne numérique mentale, où, plutôt qu'une représentation logarithmique du nombre chez l'enfant, il s'agirait plutôt de deux représentations linéaires distinctes entre les nombres à un seul chiffre (0 à 10) et les nombres à plusieurs chiffres (10 à 100) (Moeller et al., 2009).

Par ailleurs, il semble exister une évolution dans la manière dont les différents chiffres du nombre sont traités. Un traitement purement séquentiel, qui traite un à un les chiffres de gauche à droite, est retrouvé de manière plus fréquente chez les enfants plus jeunes, et cette fréquence diminue chez les enfants plus âgés (Nuerk et al., 2004 ; Mann et al., 2011, 2012 ; Chan et al., 2011 ; Williams et al., 2022). Cependant, il semble que le traitement parallèle soit déjà présent dès le CP, mais seulement utilisé dans des situations qui ne peuvent pas être résolues sans prendre en compte le chiffre des unités, notamment les comparaisons intradizaines, tandis que les enfants à partir du CE2 environ utilisent le traitement parallèle peu importe la tâche (Pixner et al., 2009 ; Mann et al., 2011, 2012). Il semble également que le

traitement séquentiel se maintienne plus longtemps pour les nombres à trois chiffres que pour les nombres à deux chiffres (Mann et al., 2012 ; Lai et al., 2018). Tous les auteurs notent également des grandes variations inter-individuelles dans les résultats. Le rôle de l'attention est central dans le passage d'un mode de traitement à l'autre, comme le montre l'impact du changement de stimuli, ainsi que le changement de contrôle attentionnel selon la proportion de paires incompatibles dans la tâche, étudié par Meijer et al. (2022).

Concernant le traitement automatique, ou involontaire, des nombres à plusieurs chiffres, il est également présent chez l'enfant. L'âge d'apparition du traitement automatique varie selon les études mais semble se situer entre 6 et 8 ans. Cet âge semble dépendre à la fois de la familiarité avec les nombres et de la vitesse de traitement des nombres, puisqu'un traitement de la magnitude beaucoup plus long que le traitement de l'information visuelle empêche l'apparition de l'effet de la congruence, signe d'un traitement automatique (Mussolin & Noël, 2007, 2008). Chez les enfants de maternelle, si on ne retrouve pas de traitement automatique du nombre à plusieurs chiffres en tant que tel, Kong et Chan (2021) montrent cependant qu'il existe un traitement automatique de l'information de position d'un chiffre, qui serait la base du traitement du nombre par la suite.

4.1.2. Peut-on identifier des repères chronologiques dans le développement des nombres à plusieurs chiffres ?

Les différentes études menées avec des enfants de moins de 6 ans, n'ayant donc pas ou peu bénéficié d'un apprentissage explicite du système positionnel, montre que les capacités à traiter le nombre à plusieurs chiffres émergent avant cet apprentissage. Dès 3 ans, les enfants montrent plus de 50 % de bonnes réponses en comparaison de nombres à deux chiffres (Mix et al., 2014 ; Yuan et al. 2019). Les compétences en comparaison de nombres à trois chiffres émergent plus tardivement, à partir de l'âge de 5 ans (Yuan et al., 2019). De même, à partir de 5 ans, les enfants obtiennent plus de 50 % de bonnes réponses pour l'identification d'un nombre à plusieurs chiffres parmi deux nombres écrits (Mix et al., 2014 ; Yuan et al., 2019). Enfin en dictée de nombres à trois chiffres, Byrge et al. (2014) observent 10 % de productions correctes dès 5 ans, 33 % de productions correctes à 6 ans.

Cependant, l'absence de corrélation entre les compétences en comparaison ou identification de nombres écrits, et celles en comparaison ou identification d'ensembles de points semble montrer qu'avant l'âge de 6 ans, les enfants ne font pas de lien entre l'écriture arabe des nombres à plusieurs chiffres et leur magnitude (Yuan et al., 2019). Ces compétences seraient unifiées à partir de 6 ans, puisqu'une telle corrélation est retrouvée chez des enfants entre 6 et 12 ans par Thompson et al. (2016). Il semble donc que le nombre à plusieurs chiffres se construise d'abord par le biais des symboles eux mêmes, avant d'être relié à la représentation interne de la magnitude. Ce lien entre symboles et magnitude est impacté, en totalité ou en partie par l'apprentissage explicite (Mix et al., 2014).

4.1.3. Quels manques peuvent être identifiés dans la littérature existante ?

Nous avons pu constater avec cette revue systématique que peu d'études existaient sur les processus cognitifs spécifiques au traitement des nombres à plusieurs chiffres. La diversité dans les sujets abordés fait que peu de résultats sont reproduits et confirmés. Nous constatons également qu'il existe peu d'études longitudinales dans ce domaine (3 sur 17 dans cette revue), notamment dans la tranche d'âge de 3 à 6 ans, où aucune étude n'est longitudinale. De telles études permettraient d'avoir une idée plus précise de la construction du nombre à plusieurs chiffres et des étapes par lesquelles passe cette construction. Une reproduction des études pourraient également permettre d'avoir plus de résultats concernant l'impact sur le mode de traitement des variations de stimuli, notamment en modifiant la proportion de paires intra-dizaines (Mann et al., 2011, 2012 ; Pixner et al., 2009)

Concernant les tâches, la comparaison est la tâche la plus utilisée, notamment dans les études s'intéressant au traitement décomposé séquentiel ou parallèle. Seule une étude (Chan et al., 2011) retrouve un effet de compatibilité lors d'une autre tâche, le stroop numérique, qui est aussi une forme de comparaison. On peut alors s'interroger sur les possibilités de mesurer l'effet de compatibilité, ou d'autres effets similaires, lors de tâches de désignation ou de lecture à haute voix, ou encore lors de tâches de production comme la dictée.

Enfin seules 6 études s'intéressent au traitement des nombres à trois chiffres, il est donc difficile d'extraire de réelles conclusions sur ce sujet. Il serait également intéressant d'étudier chez des enfants plus âgés, le développement du traitement des nombres supérieurs à 1000 et des séries de nombres comme les dates ou les heures par exemple.

4.2. Intérêts pour le soin en orthophonie

La cognition mathématique est un domaine appartenant au champ de compétences des orthophonistes sur lequel il existe moins de littérature scientifique que dans d'autres domaines de l'orthophonie, comme le langage oral, le langage écrit, ou la voix. Il est donc difficile pour les orthophonistes sur le terrain d'avoir accès aux dernières données de la recherche afin d'inscrire leur pratique dans une démarche d'*evidence-based practice* ou EBP.

Ce mémoire a pour but de permettre aux orthophonistes d'avoir accès à une synthèse des connaissances scientifiques actuelles sur le traitement cognitif des nombres à plusieurs chiffres chez l'enfant et sur la manière dont ce traitement spécifique se développe. Nous allons donc développer dans cette partie des pistes concernant les implications des travaux que nous avons synthétisés dans le domaine de l'orthophonie.

4.2.1. Dimension spatiale du traitement des nombres

Le traitement des nombres à plusieurs chiffres décrits dans les études retenues, qu'il soit séquentiel ou parallèle, montre que ces nombres ne sont pas traités comme un tout mais bien comme un ensemble d'informations contenues dans chaque chiffre composant le nombre. Pour chaque chiffre, l'enfant doit prendre en compte deux informations : la reconnaissance visuelle du chiffre, ou gnosie, et l'information visuo-spatiale de la position du chiffre dans le nombre. Dans le cas de difficultés à lire ou comparer des nombres écrits, il serait donc intéressant d'identifier à quel niveau intervient cette difficulté : si c'est la reconnaissance des chiffres ou l'identification de la position qui est déficitaire.

Il est également important lors d'un bilan pour des difficultés mathématiques de s'assurer du bon fonctionnement des compétences visuo-spatiales, de la mémoire de travail visuelle, et de la vision (bilan ophtalmologique mais aussi orthoptique). La composante visuo-spatiale du traitement numérique a également un impact sur les compétences mathématiques

chez les enfants atteints d'un trouble de la coordination (TDC), anciennement appelé dyspraxie. En effet les études portant sur les enfants ayant un TDC montrent des difficultés dans le traitement du nombre, à la fois dans des tâches de comparaison (Gomez et al., 2015) et de placement sur une ligne numérique (Gomez et al., 2017).

La prise en soin ne sera donc pas la même selon la source des difficultés. Pour des difficultés d'identification des chiffres, un travail sur l'écriture et la mémorisation des symboles pourrait être pertinent. Pour des difficultés visuo-spatiales, des outils d'aide comme des couleurs associées à chaque position, un gabarit ou un modèle permettant de placer les chiffres au bon endroit lors de leur écriture ou des feuilles à colonnes pour poser les opérations peuvent être mis en place.

4.2.2. Accès à la magnitude du nombre par le nombre écrit

Selon les données récoltées dans ce mémoire, il apparaît que dans un développement typique, les compétences non symboliques, relevant du code analogique, et les compétences symboliques, liées au code arabe, se développent séparément pendant les années de maternelle et sont ensuite intégrées dans une représentation globale du nombre, notamment grâce à l'apprentissage explicite. Une évaluation de la maîtrise du code arabe en lui-même serait donc pertinente en cas de difficulté d'accès à la magnitude du nombre, puisque cette maîtrise du code serait préalable à l'accès à la magnitude dans le développement typique.

En effet, l'étude de Mix et al. (2014) tend à montrer qu'un apprentissage centré sur le code en lui-même permet une meilleure progression dans les compétences de traitement des nombres à plusieurs chiffres qu'un apprentissage centré uniquement sur la manipulation. Cependant, cette revue n'ayant pas pour objectif d'évaluer les méthodes d'intervention dans le cadre de difficultés, il est difficile de conclure définitivement sur la méthode de rééducation à privilégier selon le type de difficulté.

4.2.3. Identification du mode de traitement des nombres

Il serait également intéressant, afin de savoir où en est l'enfant dans son développement, d'identifier le mode de traitement qu'il privilégie lorsqu'il est face à des nombres à plusieurs chiffres. Est-ce qu'il a bien acquis la capacité à traiter les chiffres séparément les uns des

autres afin d'avoir un traitement décomposé ? Est-ce qu'il se concentre principalement sur le chiffre de gauche, signe d'un traitement plutôt séquentiel, ou est-ce qu'il prend bien en compte tous les chiffres dans un traitement parallèle ? Il n'existe pas à ce jour d'outils spécifiques permettant d'évaluer ces distinctions dans les batteries d'évaluation utilisées en orthophonie, mais une analyse qualitative des résultats, notamment des erreurs en comparaison de nombres écrits et en placement sur une ligne numérique permet d'obtenir des informations. Par exemple, des difficultés à comparer, ou à placer séparément sur la ligne numérique, des nombres appartenant à la même dizaine ou la même centaine peut indiquer un traitement encore très séquentiel qui ne s'adapte pas aux stimuli comme observé dans un développement typique (Pixner et al., 2009 ; Mann et al., 2011).

4.2.4. Prévention chez le jeune enfant

Avant même le diagnostic d'un trouble des apprentissages mathématiques, les données recensées ici, notamment concernant la construction du nombre à plusieurs chiffres chez le jeune enfant, permettent de participer à la mission de prévention des orthophonistes. En effet, les travaux de Byrge et al. (2014), Mix et al. (2014) et Yuan et al. (2019) montrent que l'enfant acquiert des connaissances sur les nombres à plusieurs chiffres avant de bénéficier d'un apprentissage explicite de ceux-ci. Ces connaissances sont acquises par la généralisation de régularités dans les nombres à plusieurs chiffres rencontrés au quotidien.

Dans ce cadre, l'absence totale en fin de maternelle de connaissances sur les nombres à plusieurs chiffres, notamment les nombres courants, comme les nombres des dizaines, le nombre cent, et les nombres compris entre 10 et 20, doit, sans être alarmant, être un point de vigilance. Cette vigilance est d'autant plus nécessaire que les enfants ayant des difficultés de langage oral (Chinn, 2014, Bertrand & Camos, 2011) ou un trouble de l'attention (Luoni et al., 2023), qui sont des patients souvent suivis par les orthophonistes, sont plus à risque de présenter un trouble des apprentissages mathématiques.

Étant donné que les jeunes enfants acquièrent des connaissances en remarquant les régularités dans les nombres auxquels ils sont exposés, comme ils le font avec le langage, un

conseil à donner aux parents pourrait être d'attirer l'attention des enfants sur les nombres qui les entourent, comme les numéros de rue, l'heure, la date, les âges de leurs connaissances, etc.

4.3. Limites de la revue

Les résultats recensés ici sont à nuancer au vu du faible nombre d'études retenues. De plus, la diversité des modèles et des tranches d'âges étudiés rend difficile la comparaison entre ces différents résultats. De plus, le nombre réduit d'équipes de recherche s'intéressant au sujet entraîne une redondance dans les populations testées, notamment concernant les nationalités et les systèmes scolaires. Ce manque d'études peut également être expliqué par les critères d'éligibilité, particulièrement concernant le type d'études. L'exclusion des études de cas et études qualitatives, si elle permet un niveau de preuve plus élevé, entraîne une réduction dans la diversité des travaux retenus.

L'évaluation de la qualité méthodologique des études a également été limitée par l'absence d'outil adapté aux études en psychologie cognitive. Cette absence nous empêche de pouvoir quantifier la robustesse des études, ce qui nous aurait permis de comparer les études sur ce plan et de nuancer l'impact des résultats les uns par rapport aux autres.

Enfin, il est également important de rappeler le biais de publication, qui correspond à une surreprésentation des études ayant des résultats significatifs, au détriment des études n'ayant pas abouti à un résultat significatif.

Conclusion

L'objectif de cette revue systématique était de recenser les hypothèses théoriques existantes à ce jour sur le développement du traitement des nombres à plusieurs chiffres chez l'enfant sans trouble des apprentissages mathématiques. Cet objectif a été en partie atteint puisque la revue permet d'apporter des réponses aux problématiques posées. Nous avons pu dégager certains repères chronologiques dans l'émergence du traitement des nombres à plusieurs chiffres, notamment chez les jeunes enfants, décrire l'évolution du modèle décomposé de traitement du nombre au cours du développement, et dresser un état de lieu des sujets étudiés et des lacunes de la littérature existante. Cependant le faible nombre d'articles collectés ainsi que leur disparité n'ont pas permis d'établir un modèle dominant et global de traitement du nombre à plusieurs chiffres chez l'enfant.

Cette revue permet néanmoins aux orthophonistes francophones d'avoir accès aux données de la recherche actuelle dans ce domaine, afin d'avoir une meilleure compréhension des mécanismes sous-jacents de traitement du nombre, et des acquis observés en fonction de l'âge chez l'enfant au développement typique. Cela permet aux orthophonistes de comparer ce qu'elles observent chez leur patient à des repères établis et de préciser la nature des difficultés, afin d'adapter leur pratique au mieux à chaque enfant.

Enfin cette revue peut être le support de futurs mémoires dans le domaine de la cognition mathématique. Des mémoires bibliographiques tels que celui-ci pourront explorer des domaines adjacents au sujet que nous n'avons pas pu traiter ici, notamment le lien entre langue et traitement du nombre, ou les mécanismes cognitifs de traitement du nombre observés chez les enfants atteints de troubles des apprentissages mathématiques. Des mémoires plus cliniques pourront également s'intéresser à la création et la mise au point d'outils d'évaluation plus fins du traitement du nombre écrit, et d'outils de compensation pour les enfants ayant des difficultés à traiter les nombres, en lien avec les données scientifiques de cette revue, particulièrement concernant la dimension visuo-spatiale du traitement numérique.

Bibliographie

Barth, H., La Mont, K., Lipton, J., Dehaene, S., Kanwisher, N., & Spelke, E. (2006). Non-symbolic arithmetic in adults and young children. *Cognition*, 98(3), 199-222. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2004.09.011>

Berch, D. B., Foley, E. J., Hill, R. J., & Ryan, P. M. (1999). Extracting Parity and Magnitude from Arabic Numerals : Developmental Changes in Number Processing and Mental Representation. *Journal of Experimental Child Psychology*, 74(4), 286-308. <https://doi.org/10.1006/jecp.1999.2518>

Bertrand, R., & Camos, V. (2011). Impact des troubles langagiers et visuo-moteurs sur les capacités numériques : Émergence de patterns distincts au TEDI-MATH. *Développements*, 7(1), 5-18. <https://doi.org/10.3917/devel.007.0005>

Brannon, E. M., Wusthoff, C. J., Gallistel, C. R., & Gibbon, J. (2001). Numerical Subtraction in the Pigeon : Evidence for a Linear Subjective Number Scale. *Psychological Science*, 12(3), 238-243. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00342>

Braver, T. S. (2012). The variable nature of cognitive control : A dual mechanisms framework. *Trends in Cognitive Sciences*, 16(2), 106-113. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.12.010>

Brysbart, M. (1995). Arabic number reading : On the nature of the numerical scale and the origin of phonological recoding. *Journal of Experimental Psychology: General*, 124, 434-452. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.124.4.434>

Byrge, L., Smith, L. B., & Mix, K. S. (2014). Beginnings of Place Value : How Preschoolers Write Three-Digit Numbers. *Child Development*, 85(2), 437-443. <https://doi.org/10.1111/cdev.12162>

Chan, W. W. L., Au, T. K., & Tang, J. (2011). Exploring the developmental changes in automatic two-digit number processing. *Journal of Experimental Child Psychology*, 109(3), 263-274. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.01.010>

Chinn, S. (2014). *The Routledge International Handbook of Dyscalculia and Mathematical Learning Difficulties*. London: Routledge.

Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44(1), 1-42. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(92\)90049-N](https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90049-N)

Dehaene, S. (2003). The neural basis of the Weber–Fechner law : A logarithmic mental number line. *Trends in Cognitive Sciences*, 7(4), 145-147. [https://doi.org/10.1016/S1364-6613\(03\)00055-X](https://doi.org/10.1016/S1364-6613(03)00055-X)

Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, 122, 371-396. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.122.3.371>

Dehaene, S., & Cohen, L. (1997). Cerebral Pathways for Calculation : Double Dissociation between Rote Verbal and Quantitative Knowledge of Arithmetic. *Cortex*, 33(2), 219-250. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(08\)70002-9](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(08)70002-9)

Dehaene, S., Dupoux, E., & Mehler, J. (1990). Is numerical comparison digital? Analogical and symbolic effects in two-digit number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16(3), 626-641. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.16.3.626>

Dehaene, S., Izard, V., Spelke, E., & Pica, P. (2008). Log or linear? Distinct intuitions of the number scale in Western and Amazonian Indigene cultures. *Science*, 320, 1217-1220. <https://doi.org/10.1126/science.1156540>

Dietrich, J. F., Huber, S., Dackermann, T., Moeller, K., & Fischer, U. (2016). Place-value understanding in number line estimation predicts future arithmetic performance. *British Journal of Developmental Psychology*, 34(4), 502-517. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12146>

Downes, M. J., Brennan, M. L., Williams, H. C., & Dean, R. S. (2016). Development of a critical appraisal tool to assess the quality of cross-sectional studies (AXIS). *BMJ Open*, 6(12), e011458. <https://doi.org/10.1136/bmjopen-2016-011458>

Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307-314. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.05.002>

Fias, W., Brysbaert, M., Geypens, F., & d'Ydewalle, G. (1996). The Importance of Magnitude Information in Numerical Processing: Evidence from the SNARC Effect. *Mathematical Cognition*, 2(1), 95-110. <https://doi.org/10.1080/135467996387552>

Flavell, J. H. (1963). *The developmental psychology of Jean Piaget*. Princeton, NJ, US : D Van Nostrand.

Fuson, K. C. (1990). Conceptual Structures for Multiunit Numbers : Implications for Learning and Teaching Multidigit Addition, Subtraction, and Place Value. *Cognition and Instruction*, 7(4), 343-403. https://doi.org/10.1207/s1532690xci0704_4

Gallistel, C. R., & Gelman, I. (2000). Non-verbal numerical cognition : From reals to integers. *Trends in Cognitive Sciences*, 4(2), 59-65. [https://doi.org/10.1016/s1364-6613\(99\)01424-2](https://doi.org/10.1016/s1364-6613(99)01424-2)

Ganor-Stern, D., Pinhas, M., & Tzelgov, J. (2009). Short Article : Comparing Two-Digit Numbers: The Importance of being Presented Together. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 62(3), 444-452. <https://doi.org/10.1080/17470210802391631>

Ganor-Stern, D., Tzelgov, J., & Ellenbogen, R. (2007). Automaticity and two-digit numbers. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 33(2), 483-496. <https://doi.org/10.1037/0096-1523.33.2.483>

García-Orza, J., Estudillo, A. J., Calleja, M., & Rodríguez, J. M. (2017). Is place-value processing in four-digit numbers fully automatic? Yes, but not always. *Psychonomic Bulletin & Review*, 24(6), 1906-1914. <https://doi.org/10.3758/s13423-017-1231-x>

Gilmore, C., Attridge, N., De Smedt, B., & Inglis, M. (2014). Measuring the approximate number system in children: Exploring the relationships among different tasks. *Learning and Individual Differences*, 29, 50-58. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2013.10.004>

Gilmore, C. K., McCarthy, S. E., & Spelke, E. S. (2007). Symbolic arithmetic knowledge without instruction. *Nature*, 447(7144), 589-591. <https://doi.org/10.1038/nature05850>

Girelli, L., Lucangeli, D., & Butterworth, B. (2000). The Development of Automaticity in Accessing Number Magnitude. *Journal of Experimental Child Psychology*, 76(2), 104-122. <https://doi.org/10.1006/jecp.2000.2564>

Gomez, A., Piazza, M., Jobert, A., Dehaene-Lambertz, G., Dehaene, S., & Huron, C. (2015). Mathematical difficulties in developmental coordination disorder: Symbolic and nonsymbolic number processing. *Research in Developmental Disabilities*, 43-44, 167-178. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2015.06.011>

Gomez, A., Piazza, M., Jobert, A., Dehaene-Lambertz, G., & Huron, C. (2017). Numerical abilities of school-age children with Developmental Coordination Disorder (DCD): A behavioral and eye-tracking study. *Human Movement Science*, 55, 315-326. <https://doi.org/10.1016/j.humov.2016.08.008>

Halberda, J., & Feigenson, L. (2008). Developmental change in the acuity of the « number sense » : The approximate number system in 3-, 4-, 5-, and 6-year-olds and adults. *Developmental Psychology*, 44(5), 1457-1465. <https://doi.org/10.1037/a0012682>

Huber, S., Moeller, K., Nuerk, H.-C., & Willmes, K. (2013). A Computational Modeling Approach on Three-Digit Number Processing. *Topics in Cognitive Science*, 5(2), 317-334. <https://doi.org/10.1111/tops.12016>

Ito, Y., & Hatta, T. (2004). Spatial structure of quantitative representation of numbers : Evidence from the SNARC effect. *Memory & cognition*, 32, 662-673. <https://doi.org/10.3758/BF03195857>

Kallai, A. Y., & Tzelgov, J. (2012). The place-value of a digit in multi-digit numbers is processed automatically. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 38(5), 1221-1233. <https://doi.org/10.1037/a0027635>

Knops, A., Nuerk, H.-C., Sparing, R., Foltys, H., & Willmes, K. (2006). On the functional role of human parietal cortex in number processing : How gender mediates the impact of a ‘virtual lesion’ induced by rTMS. *Neuropsychologia*, 44(12), 2270-2283. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2006.05.011>

Kolkman, M. E., Kroesbergen, E. H., & Leseman, P. P. M. (2013). Early numerical development and the role of non-symbolic and symbolic skills. *Learning and Instruction*, 25, 95-103. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2012.12.001>

Kong, M. N. K., & Chan, W. W. L. (2021). Automatic Processing of Place-Value in Kindergarteners. *European Journal of Developmental Psychology*, 18(3), 446-458. <https://doi.org/10.1080/17405629.2020.1854216>

Korvorst, M., & Damian, M. F. (2008). The differential influence of decades and units on multidigit number comparison. *Quarterly Journal of Experimental Psychology*, 61(8), 1250-1264. <https://doi.org/10.1080/17470210701503286>

Lai, M., Zax, A., & Barth, H. (2018). Digit identity influences numerical estimation in children and adults. *Developmental Science*, 21(5), e12657. <https://doi.org/10.1111/desc.12657>

Luoni, C., Scorza, M., Stefanelli, S., Fagiolini, B., & Termine, C. (2023). A Neuropsychological Profile of Developmental Dyscalculia: The Role of Comorbidity. *Journal of Learning Disabilities*, 56(4), 310-323. <https://doi.org/10.1177/00222194221102925>

Macizo, P., & Herrera, A. (2008). The effect of number codes in the comparison task of two-digit numbers. *Psicológica*, 29(1), Article 1.

Macizo, P., & Herrera, A. (2010). Two-digit number comparison: Decade-unit and unit-decade produce the same compatibility effect with number words. *Canadian Journal of Experimental Psychology / Revue canadienne de psychologie expérimentale*, 64(1), 17-24. <https://doi.org/10.1037/a0015803>

Macizo, P., & Herrera, A. (2013). The processing of Arabic numbers is under cognitive control. *Psychological Research*, 77(5), 651-658. <https://doi.org/10.1007/s00426-012-0456-6>

Magnin, L., & Poncet, S. (2012). *Evolution des champs de comptences en orthophonie : Analyse historique à travers la presse spécialisée*. Lyon.

Mann, A., Moeller, K., Pixner, S., Kaufmann, L., & Nuerk, H.-C. (2011). Attentional strategies in place-value integration: A longitudinal study on two-digit number comparison. *Zeitschrift für Psychologie/Journal of Psychology*, 219, 42-49. <https://doi.org/10.1027/2151-2604/a000045>

Mann, A., Moeller, K., Pixner, S., Kaufmann, L., & Nuerk, H.-C. (2012). On the development of Arabic three-digit number processing in primary school children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 113(4), 594-601. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2012.08.002>

McCloskey, M. (1992). Cognitive mechanisms in numerical processing : Evidence from acquired dyscalculia. *Cognition*, 44(1), 107-157. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(92\)90052-J](https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90052-J)

Meijer, A.-M., Aben, B., Reynvoet, B., & Van den Bussche, E. (2022). Reactive and proactive cognitive control as underlying processes of number processing in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 215. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2021.105319>

Mix, K. S., Prather, R. W., Smith, L. B., & Stockton, J. D. (2014). Young children's interpretation of multidigit number names : From emerging competence to mastery. *Child Development*, 85, 1306-1319. <https://doi.org/10.1111/cdev.12197>

Moeller, K., Huber, S., Nuerk, H.-C., & Willmes, K. (2011). Two-digit number processing : Holistic, decomposed or hybrid? A computational modelling approach. *Psychological Research*, 75(4), 290-306. <https://doi.org/10.1007/s00426-010-0307-2>

Moeller, K., Pixner, S., Kaufmann, L., & Nuerk, H.-C. (2009). Children's early mental number line : Logarithmic or decomposed linear? *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(4), 503-515. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.02.006>

Moyer, R. S., & Landauer, T. K. (1967). Time required for judgements of numerical inequality. *Nature*, 215, 1519-1520. <https://doi.org/10.1038/2151519a0>

Mussolin, C., & Noël, M.-P. (2007). The nonintentional processing of Arabic numbers in children. *Journal of Clinical and Experimental Neuropsychology*, 29(3), 225-234. <https://doi.org/10.1080/13803390600629759>

Mussolin, C., & Noël, M.-P. (2008). Automaticity for numerical magnitude of two-digit Arabic numbers in children. *Acta Psychologica*, 129(2), 264-272. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2008.08.001>

Nuerk, H.-C., Kaufmann, L., Zopoth, S., & Willmes, K. (2004). On the Development of the Mental Number Line: More, Less, or Never Holistic With Increasing Age? *Developmental Psychology*, 40, 1199-1211. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.40.6.1199>

Nuerk, H.-C., Moeller, K., Klein, E., Willmes, K., & Fischer, M. H. (2015). Extending the Mental Number Line. *Zeitschrift für Psychologie*, 219(1), 3-22. <https://doi.org/10.1027/2151-2604/a000041>

Nuerk, H.-C., Weger, U., & Willmes, K. (2001). Decade breaks in the mental number line? Putting the tens and units back in different bins. *Cognition*, 82(1), B25-B33. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(01\)00142-1](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(01)00142-1)

Nuerk, H.-C., Weger, U., & Willmes, K. (2002). A unit-decade compatibility effect in German number words. *Current Psychology Letters: Behaviour, Brain & Cognition*, 7, 19-38.

Nuerk, H.-C., Wood, G., & Willmes, K. (2005). The Universal SNARC Effect. *Experimental Psychology*, 52(3), 187-194. <https://doi.org/10.1027/1618-3169.52.3.187>

Piazza, M., Facoetti, A., Trussardi, A. N., Berteletti, I., Conte, S., Lucangeli, D., Dehaene, S., & Zorzi, M. (2010). Developmental trajectory of number acuity reveals a severe impairment in developmental dyscalculia. *Cognition*, 116(1), 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.03.012>

Pica, P., Lemer, C., Izard, V., & Dehaene, S. (2004). Exact and Approximate Arithmetic in an Amazonian Indigene Group. *Science*, 306(5695), 499-503. <https://doi.org/10.1126/science.1102085>

Pixner, S., Moeller, K., Zuber, J., & Nuerk, H.-C. (2009). Decomposed but parallel processing of two-digit numbers in 1st graders. *The Open Psychology Journal*, 2. <https://doi.org/10.2174/1874350100902010040>

Pixner, S., Zuber, J., Heřmanová, V., Kaufmann, L., Nuerk, H.-C., & Moeller, K. (2011). One language, two number-word systems and many problems : Numerical cognition in the Czech language. *Research in Developmental Disabilities*, 32(6), 2683-2689. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2011.06.004>

Ratinckx, E., Nuerk, H.-C., van Dijck, J.-P., & Willmes, K. (2006). Effects of Interhemispheric Communication on Two-Digit Arabic Number Processing. *Cortex*, 42(8), 1128-1137. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(08\)70225-9](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(08)70225-9)

Restle, F. (1970). Speed of adding and comparing numbers. *Journal of Experimental Psychology*, 83, 274-278. <https://doi.org/10.1037/h0028573>

Santens, S., & Gevers, W. (2008). The SNARC effect does not imply a mental number line. *Cognition*, 108(1), 263-270. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.01.002>

Siegler, R. S., & Opfer, J. E. (2003). The development of numerical estimation : Evidence for multiple representations of numerical quantity. *Psychological Science*, 14, 237-243. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.02438>

Starkey, P., & Cooper, R. G. (1980). Perception of Numbers by Human Infants. *Science*, 210(4473), 1033-1035. <https://doi.org/10.1126/science.7434014>

Starkey, P., Spelke, E. S., & Gelman, R. (1990). Numerical abstraction by human infants. *Cognition*, 36(2), 97-127. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(90\)90001-Z](https://doi.org/10.1016/0010-0277(90)90001-Z)

Strauss, M. S., & Curtis, L. E. (1981). Infant Perception of Numerosity. *Child Development*, 52(4), 1146-1152. <https://doi.org/10.2307/1129500>

Tain, L. (2016). *Langage, genre et profession : Le métier d'orthophoniste*. EHESP.

Thomas, M., & Morwitz, V. (2005). Penny Wise and Pound Foolish : The Left-Digit Effect in Price Cognition. *Journal of Consumer Research*, 32(1), 54-64. <https://doi.org/10.1086/429600>

Thomas, M., & Morwitz, V. G. (2009). The Ease-of-Computation Effect : The Interplay of Metacognitive Experiences and Naive Theories in Judgments of Price Differences. *Journal of Marketing Research*, 46(1), 81-91. <https://doi.org/10.1509/jmkr.46.1.81>

Thompson, C. A., Ratcliff, R., & McKoon, G. (2016). Individual differences in the components of children's and adults' information processing for simple symbolic and non-symbolic numeric decisions. *Journal of Experimental Child Psychology*, 150, 48-71. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2016.04.005>

Verguts, T., & De Moor, W. (2005). Two-digit Comparison. *Experimental Psychology*, 52(3), 195-200. <https://doi.org/10.1027/1618-3169.52.3.195>

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

Williams, K., Zax, A., Patalano, A. L., & Barth, H. (2022). Left Digit Effects in Numerical Estimation across Development. *Journal of Cognition and Development*, 23(2), 188-209. <https://doi.org/10.1080/15248372.2021.1984243>

Wood, G., Nuerk, H.-C., Moeller, K., Geppert, B., Schnitker, R., Weber, J., & Willmes, K. (2008). All for one but not one for all : How multiple number representations are recruited in one numerical task. *Brain Research*, 1187, 154-166. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2007.09.094>

Wood, G., Nuerk, H.-C., & Willmes, K. (2006). Crossed Hands and the Snarc Effect : A failure to Replicate Dehaene, Bossini and Giraux (1993). *Cortex*, 42(8), 1069-1079. [https://doi.org/10.1016/S0010-9452\(08\)70219-3](https://doi.org/10.1016/S0010-9452(08)70219-3)

Xu, F., & Spelke, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74(1), B1-B11. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(99\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(99)00066-9)

Yuan, L., Prather, R. W., Mix, K. S., & Smith, L. B. (2019). Preschoolers and multi-digit numbers : A path to mathematics through the symbols themselves. *Cognition*, 189, 89-104. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2019.03.013>

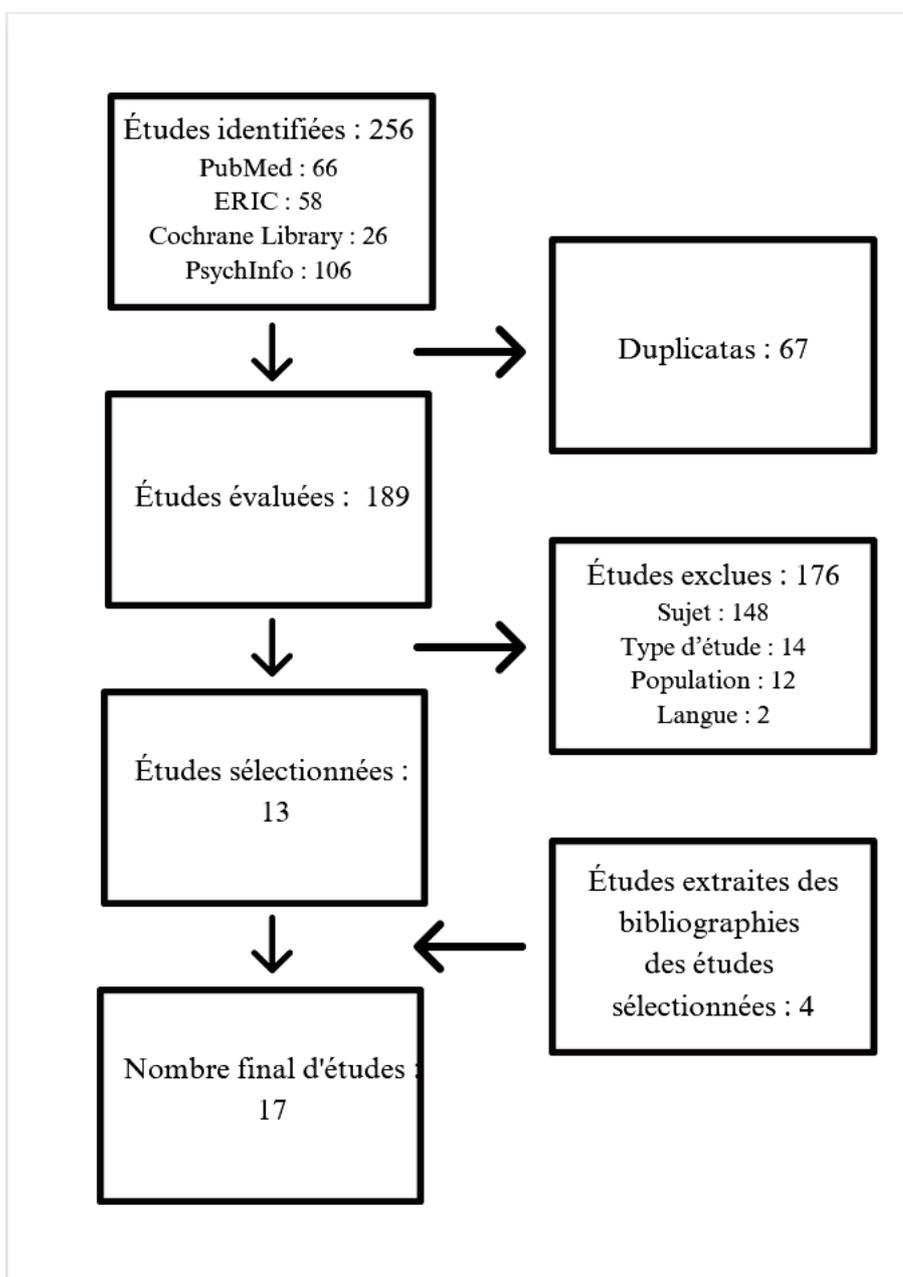
Zuber, J., Pixner, S., Moeller, K., & Nuerk, H.-C. (2009). On the language specificity of basic number processing : Transcoding in a language with inversion and its relation to working memory capacity. *Journal of Experimental Child Psychology*, 102(1), 60-77. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.04.003>

Annexes

Annexe A : Combinaisons de mots-clés

	Critère 1	Critère 2	Critère 3
Anglais	« number* »	« multi-digit » OR « two-digit » OR « three-digit »	« development » OR « developmental » OR « child* »
Français	« nombre* »	« plusieurs chiffres » OR « deux chiffres » OR « trois chiffres »	« développement » OR « développementa* » OR « enfant* »

Annexe B : Diagramme de flux



Annexe C : Tableau de synthèse

Année	Auteurs	Titre	Participants	Tâche(s)	Résultats et conclusions
2014	Byrge, Lisa; Smith, Linda B.; Mix, Kelly S.	Beginnings of place value: how preschoolers write three-digit numbers	172 participants : 41 de 4 ans ; 72 de 5 ans ; 59 de 6 ans	Dictee de nombres à 3 chiffres	Les jeunes enfants tentent de produire des nombres à plusieurs chiffres sans apprentissage explicite. L'ajout de zéro est une approche fréquente et normale dans le développement de l'écriture du nombre.
2011	Chan, Winnie Wai Lan, Au, Terry K.; Tang, Joey	Exploring the developmental changes in automatic two-digit number processing	390 participants : 90 CP ; 81 CE1 ; 78 CE2 ; 63 CM1 ; 78 CM2	Stroop numérique, nombres à 2 chiffres	Le traitement automatique des nombres à plusieurs chiffres est observé dès le CP. L'effet de congruence est modulé par la compatibilité des paires de nombres chez les enfants à partir du CE2. Ce traitement est similaire aux résultats obtenus chez l'adulte dès le CM2, soit un traitement décomposé parallèle.
2016	Dietrich, Julia F.; Huber, Stefan; Dackermann, Tanja; Moeller, Korbinian; Fischer, Ursula	Place-value understanding in number line estimation predicts future arithmetic performance	43 participants en CP	Placement sur une LN 0-10 Placement sur une LN 0-20 Dictee de nombres à 2 chiffres	Les tâches 0-20, 0-100 et transcodage sont une mesure fiable de la compréhension du système positionnel chez l'enfant, contrairement à la tâche 0-10. La corrélation entre les tâches de LN et les performances en arithmétiques est liée à la compréhension du système de positionnement nécessaire aux deux tâches.
2021	Kong, Michelle Nga Ki; Chan, Winnie Wai Lan	Automatic processing of place-value in kindergarteners	187 participants : 74 MSM ; 97 GSM	Stroop numérique modifié (type XX6 vs X6X)	L'effet de congruence montre un traitement automatisé de la magnitude pour des écarts de position supérieurs à 2 chez les enfants en maternelle, sans apprentissage explicite du système de position.
2018	Lai, Maxine; Zax, Alexandra, Barth, Hilary	Digit identity influences numerical estimation in children and adults	118 participants dont 75 enfants : 17 de 7 ans ; 18 de 8 ans ; 20 de 9 ans ; 20 de 10 ans 120 participants dont 96 enfants : 16 de 7 ans ; 21 de 8 ans ; 19 de 9 ans ; 20 de 10 ans ; 20 de 11 ans	Étude 1 : Placement sur LN 0-1000 avec contrainte temporelle Étude 2 : Placement sur LN 0-1000	L'effet du nombre le plus à gauche est observé à partir de 7 ans pour les nombres à 3 chiffres. Les enfants de 7 et 8 ans utilisent uniquement le chiffre des centaines pour placer les chiffres sur la ligne numérique.
2011	Mann, Anne; Moeller, Korbinian; Pixner, Silvia; Kaufmann, Liane; Nuerk, Hans-Christoph	Attentional strategies in place-value integration: A longitudinal study on two-digit number comparison	72 participants du CE1 au CM1	Comparaison de nombres à 2 chiffres	L'effet de compatibilité simple et inverse est présent à tous les âges et augmente avec l'âge. L'effet de compatibilité est accentué par la présence de comparaisons intradizaines, ce qui montre une adaptation des stratégies attentionnelles. Cette adaptation augmente avec l'âge. La majorité (70 %) des enfants garde le même mode de traitement pendant toute l'étude. Les enfants changeant de traitement évolue en majorité du séquentiel vers le parallèle. Il existe en majorité une évolution vers d'un traitement décomposé séquentiel vers un traitement parallèle des nombres.

2012	Maenn, Anne; Moeller, Korbinian; Pixner, Silvia; Kaufmann, Liane; Nuerk, Hans-Christoph	On the development of Arabic three-digit number processing in primary school children	78 participants en CE1, CE2 puis CMI	Comparaison de nombres à 3 chiffres	Il existe un traitement parallèle des nombres à trois chiffres observable de manière significative à partir du CE2. La fréquence de l'effet de compatibilité unité-centaine augmente avec la classe, ce qui n'est pas le cas de l'effet dizaine-centaine. Le traitement des centaines et des unités seraient donc plus parallèle, alors que le traitement des dizaines serait mixte (parallèle et séquentiel).
2022	Meijer, Anne-Merel; Aben, Bart; Reynvoet, Bert; Van den Busche, Eva	Reactive and proactive cognitive control as underlying processes of number processing in children	168 participants , dont 127 enfants : 38 CE1 ; 42 CMI ; 47 6e	Comparaison de nombre à 2 chiffres	On observe un passage du contrôle réactif au contrôle proactif en situation de traitement du nombre chez l'enfant. Ce passage dépend de la proportion de comparaison intra-dizaine dans le stimuli. L'utilisation de ces stratégies st présente à tous les âges évalués.
2014	Mix, Kelly S.; Prather, Richard W.; Smith, Linda B.; Stoekton, Jerri DaSha	Young children's interpretation of multidigit number names: From emerging competence to mastery	Étude 1 : 91 participants : 31 maternelle ; 25 CP ; 35 CE1 Étude 2 : 92 participants : 26 de 3 ans ; 32 de 4 ans ; 34 de 5ans Étude 3 : 24 participants en GSM	Étude 1 : Identification parmi 2 nombres à 2 chiffres Comparaison de nombres à 2 chiffres Identification parmi 2 ensemble de points Comparaison de 2 ensembles de points Identification parmi 2 ensembles de blocs Comparaison parmi 2 ensembles de blocs Étude 2 : Mêmes tâches que l'étude 1 Étude 3 : Mêmes tâches que l'étude 1, avant et après un apprentissage explicite des nombres	Les jeunes enfants ont des connaissances sur les nombres à plusieurs chiffres sans apprentissage explicite. Un apprentissage explicite permet des progrès plus importants des performances.
2009	Moeller, Korbinian; Pixner, Silvia; Kaufmann, Liane; Nuerk, Hans-Christoph	Children's early mental number line: logarithmic or decomposed linear?	130 participants en CP	Placement sur une ligne numérique 0-10 Placement sur un LN 0-100	L'évolution d'un modèle semblant logarithmique à un modèle linéaire au cours du développement serait expliqué par un modèle linéaire double correspondant à un traitement séparé des nombres à un ou plusieurs chiffres.
2007	Mussolin, Christophe; Noël, Marie-Pascale	The nonintentional processing of Arabic numbers in children	60 participants : 20 CE1 ; 20 CE2 ; 20 CMI	Comparaison de nombre à 2 chiffres Stroop numérique, nombres à 2 chiffres	Il existe un traitement automatique des nombres à 2 chiffres chez les enfants dès le CE1, lorsque les enfants sont exposés aux chiffres avant de devoir juger le critère de taille.
2008	Mussolin, Christophe; Noël, Marie-Pascale	Automaticity for numerical magnitude of two-digit Arabic numbers in children	58 participants : 20 CE1 ; 20 CE2 ; 18 CMI	Comparaison de nombre à 2 chiffres Stroop numérique, nombres à 2 chiffres	Les résultats suggèrent un traitement mixte (holistique et séquentiel) chez l'enfant. Il existe un traitement automatique de la magnitude chez l'enfant à partir du CE2, qui dépend de l'âge et de la magnitude des nombres traités. L'absence d'automatisme chez certains enfants est lié à la différence de temps de traitement entre la magnitude et le critère de taille.

2004	Nuerk, Hans-Christoph; Kaufmann, Liane; Zoppoth, Sabine; Willmes, Klaus	On the Development of the Mental Number Line: More, Less, or Never Holistic With Increasing Age?	80 participants : 20 CE1 ; 20 CE2 ; 18 CM1 ; 22 CM2	Comparaison de nombres à 2 chiffres	L'effet de compatibilité simple est présent à tous les âges pour le temps de réponse. Pour le nombre d'erreurs, l'effet de compatibilité est inversé chez les CE1, variable chez les CE2 et CM1, simple chez les CM2. Cela correspond à une évolution du traitement des nombres à plusieurs chiffres avec l'âge, d'un modèle séquentiel à un modèle parallèle, avec une période de transition au niveau des classes de CE2 et CM1.
2009	Pixner, S.; Moeller, K.; Zuber, J.; Nuerk, H.-C.	Decomposed but parallel processing of two-digit numbers in 1st graders	128 participants en CP	Comparaison de nombres à 2 chiffres	L'effet de compatibilité est présent à tous les âges. Une adaptation des stratégies de traitement au stimuli est observable dès le CP. Le traitement parallèle semble majoritaire lorsque le stimuli contient des comparaison intra-dizaine.
2016	Thompson, Clarissa A.; Ratcliff, Roger; McKeon, Gail	Individual differences in the components of children's and adults' information processing for simple symbolic and non-symbolic numeric decisions	91 participants : 19 CP ; 26 CE1/CE2 ; 27 CM1/CM2 ; 19 6e/5e	Comparaison d'ensemble de points Comparaison de nombre à 2 chiffres	Il existe un effet de distance chez l'enfant lors de tâches de comparaison symbolique mais aussi non symbolique. Les performances en comparaison symbolique sont corrélées aux performances en comparaison non symbolique.
2022	Williams, Katherine; Zax, Alexandra; Patalano, Andrea L.; Barth, Hilary	Left Digit Effects in Numerical Estimation across Development	Étude 1 : 73 participants : 11 de 5 ans ; 21 de 6 ans ; 20 de 7 ans ; 21 de 8 ans Étude 2 : 27 participants : 7 de 9 ans ; 8 de 10 ans ; 12 de 11 ans	Étude 1 : Placement sur une ligne de 0-100 Étude 2 : Même tâche que l'étude 1	Il existe un effet du nombre le plus à gauche, donc un traitement individuel des chiffres dans les nombres à deux chiffres à partir de 8 ans. L'effet du chiffre des dizaines est absent chez les enfants de moins de 8 ans Cette absence est expliquée par une imprécision globale qui ne permet pas de voir une différence entre les nombres proches du changement de dizaine et les nombres dans une dizaine.
2019	Yuan, Lei; Prather, Richard W.; Mix, Kelly S.; Smith, Linda B.	Preschoolers and multi-digit numbers: A path to mathematics through the symbols themselves	Étude 1 : 176 participants : 44 de 3 ans ; 43 de 4 ans ; 45 de 5 ans ; 44 de 6 ans Étude 2 : 54 participants : 15 de 3 ans ; 13 de 4 ans ; 13 de 5 ans ; 13 de 6 ans Étude 3 : 129 participants : 32 de 3 ans ; 36 de 4 ans ; 31 de 5 ans ; 31 de 6 ans	Étude 1 : Identification parmi 2 ensembles de points Identification parmi 2 ou 3 chiffres Étude 2 : Mêmes tâches que l'étude 1 avec retest Étude 3 : Comparaison entre 2 nombres à 2 ou 3 chiffres Comparaison entre 2 ensembles de points Étude 4 : Mêmes tâches que l'étude 3 Étude 5 : Identification parmi 2 nombres à 2 ou 3 chiffres Comparaison entre 2 nombres à 2 ou 3 chiffres	En identification, les performances aux tâches non symboliques sont inférieures au hasard, les performances aux tâches symboliques sont supérieures au hasard à partir de 6 ans et augmentent avec l'âge. Les performances aux tâches symboliques augmentent plus après un retest. Les performances en comparaison sont supérieures au hasard dans les deux modalités, et augmentent avec l'âge. Les performances non symboliques et symboliques ne sont pas corrélées.

Annexe D : Appraisal tool for Cross-Sectional Studies (AXIS)

Appraisal of Cross-sectional Studies

	Question	Yes	No	Don't know/ Comment
Introduction				
1	Were the aims/objectives of the study clear?			
Methods				
2	Was the study design appropriate for the stated aim(s)?			
3	Was the sample size justified?			
4	Was the target/reference population clearly defined? (Is it clear who the research was about?)			
5	Was the sample frame taken from an appropriate population base so that it closely represented the target/reference population under investigation?			
6	Was the selection process likely to select subjects/participants that were representative of the target/reference population under investigation?			
7	Were measures undertaken to address and categorise non-responders?			
8	Were the risk factor and outcome variables measured appropriate to the aims of the study?			
9	Were the risk factor and outcome variables measured correctly using instruments/measurements that had been trialled, piloted or published previously?			
10	Is it clear what was used to determined statistical significance and/or precision estimates? (e.g. p-values, confidence intervals)			
11	Were the methods (including statistical methods) sufficiently described to enable them to be repeated?			
Results				
12	Were the basic data adequately described?			
13	Does the response rate raise concerns about non-response bias?			
14	If appropriate, was information about non-responders described?			
15	Were the results internally consistent?			
16	Were the results presented for all the analyses described in the methods?			
Discussion				
17	Were the authors' discussions and conclusions justified by the results?			
18	Were the limitations of the study discussed?			
Other				
19	Were there any funding sources or conflicts of interest that may affect the authors' interpretation of the results?			
20	Was ethical approval or consent of participants attained?			

Annexe E : Diaporama de présentation

Sommaire

- 1 Rappels théoriques
- 2 Méthode
- 3 Résultats principaux
- 4 Perspectives

Rappels théoriques

Triple code (Dehaene, 1992)

Ligne Numérique Mentale (Moyer & Landauer, 1967)

Traitement du nombre à plusieurs chiffres

- Effets spécifiques
 - Effet de compatibilité (Nuerk et al., 2001) : 23 vs 46 / 29 vs 46
 - Effet du chiffre le plus à gauche (Thomas & Morwitz, 2005) : 29 vs 31
- Différents modes de traitement

'456'	'4' > '5' > '6'	'4' + '5' + '6'
Mode holistique	Mode Décomposé Séquentiel	Mode Décomposé Parallèle
Dehaene et al., 1990	Knops et al., 2006	Nuerk et al., 2001, 2002

Méthode

Problématique : Quelles hypothèses théoriques existent à l'heure actuelle pour rendre compte du développement du traitement des nombres à plusieurs chiffres ?

Mots-clés : ('multi-digit' OR 'two-digit' OR 'three-digit') AND 'number' AND ('development' OR 'developmental' OR 'children')

Base de données : PsycInfo, ERIC, Cochrane, PubMed

Critères d'éligibilité : Sujet de l'étude, Type d'étude, Population, Langue

Résultats

Résultats au regard de l'orthophonie

- Repères chronologiques d'acquisition (Miy et al., 2014; Yuan et al., 2019; Byrge et al., 2014)
- Lien entre les différentes représentations (Yuan et al., 2019; Thompson et al., 2016)
- Compétences sous-jacentes (Musolin & Noël, 2008; Pomer et al., 2009; Moeller et al., 2008)
- Connaissance des mécanismes de traitement (Nuerk et al., 2004; Pomer et al., 2009; Marin et al., 2011, 2012; Chan et al., 2011; Williams et al., 2012)

Limites

- Nombre d'études retenues
- Nombre d'équipes de recherche
- Absence d'analyse quantitative

Perspectives de recherche

- Données sur les enfants atteints de troubles des apprentissages mathématiques
- Création d'outils d'évaluation ciblant les mécanismes cognitifs
- Développement d'outils de compensation
- Lien avec le langage et la langue maternelle

Titre du Mémoire : Quelles hypothèses théoriques existent à l'heure actuelle pour rendre compte du développement du traitement des nombres à plusieurs chiffres ? Revue systématique de littérature

RÉSUMÉ

La cognition mathématique est un domaine dans lequel il existe peu de littérature scientifique, en particulier à destination des orthophonistes. Cette revue de littérature se propose de dresser une synthèse des connaissances existantes à l'heure actuelle sur un sujet précis de la cognition mathématique : le développement des mécanismes cognitifs du traitement des nombres à plusieurs chiffres chez l'enfant. En appliquant une méthode de recherche systématique par mots-clés dans quatre bases de données dans différentes disciplines (médecine, psychologie et sciences de l'éducation), ce mémoire a permis de sélectionner 17 articles, publiés entre 2004 et 2022, étudiant le traitement des nombres à plusieurs chiffres par le biais d'études de groupe sur des enfants tout-venants de 3 à 12 ans. Ces études ont ensuite fait l'objet d'une synthèse dont l'objectif est de répondre à trois principales problématiques : quels sont les modèles théoriques principaux de ce traitement, quels sont les repères développementaux d'acquisition du nombre à plusieurs chiffres, et quelles sont les lacunes dans la littérature à ce sujet ? Les résultats de cette synthèse ont ensuite été discutés afin d'émettre des pistes d'utilisation des données récoltées dans l'évaluation et la rééducation de la cognition mathématique par les orthophonistes.

MOTS-CLÉS

Cognition mathématique - Développement numérique - Nombres à plusieurs chiffres - Revue de littérature - Traitement du nombre

ABSTRACT

Mathematical cognition is an area in which there is little scientific literature, particularly aimed at speech and language therapists. The goal of this literature review is to provide an overview of what is currently known about a specific aspect of mathematical cognition: the development of multi-digit numbers processing in children. By applying a systematic review method, using a combination of different keywords in four databases covering different disciplines (medicine, psychology and educational science), this dissertation selected 17 articles - published between 2004 and 2022 – which studied multi-digit numbers processing using group studies on typically developing children aged 3 to 12. These studies were then summarised with the aim of answering three main questions: what are the main theoretical models of multi-digit numbers processing, what are the developmental benchmarks concerning the acquisition of multi-digit numbers, and what are the gaps in the existing literature on this subject? The results of this summary were then discussed in order to suggest ways in which the data collected could be used in the evaluation and rehabilitation of mathematical cognition by speech and language therapists.

KEY WORDS

Literature review - Mathematical cognition - Multi-digits numbers - Number processing - Numerical development