HAL
open science

Intérêt d'un entrainement autour de la ligne numérique avec apport de stratégies explicites chez des sujets présentant un trouble des apprentissages mathématiques

Marie Sayegh

To cite this version:

Marie Sayegh. Intérêt d'un entrainement autour de la ligne numérique avec apport de stratégies explicites chez des sujets présentant un trouble des apprentissages mathématiques. Médecine humaine et pathologie. 2021. dumas-03285680

HAL Id: dumas-03285680

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-03285680v1

Submitted on 13 Jul 2021

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

UNIVERSITÉ CÔTE D'AZUR
FACULTÉ DE MÉDECINE

DON UNIVERSITÉ CÔTE D'AZUR
Département d'Orthophonie de Nice

MÉMOIRE présenté pour l'obtention du

CERTIFICAT DE CAPACITE D'ORTHOPHONISTE

ET DU GRADE DE MASTER 2 D'ORTHOPHONIE

Présenté et soutenu le 11 juin 2021 par

Marie SAYEGH

Né(e) le 24 septembre 1997 à Nice

INTERET D'UN ENTRAINEMENT AUTOUR DE LA LIGNE NUMERIQUE AVEC APPORT DE STRATEGIES EXPLICITES CHEZ DES SUJETS PRESENTANT UN TROUBLE DES APPRENTISSAGES MATHEMATIQUES

Directeur de Mémoire : Ludivine Lebel

Nice

2021

© Université Côte d'Azur – Faculté de Médecine - Ecole d'Orthophonie

Remerciements

Je tiens en premier lieu à remercier ma directrice de mémoire Ludivine Lebel, pour sa grande disponibilité, ses conseils si avisés et ses précieuses relectures.

Je remercie également les deux enfants qui ont accepté de réaliser cet entraînement auprès de moi pendant plusieurs semaines, ainsi que leurs parents respectifs, qui ont été très flexibles pour que toutes nos séances puissent se faire, mais également Laëtitia Marzo, qui en plus d'avoir été une maître de stage géniale, m'a aidée à recruter ces enfants pour mon étude.

Merci aussi à l'équipe d'HappyNeuron pour m'avoir permis d'utiliser librement pendant un an la batterie EXAmath ainsi que le logiciel de rééducation DéCaLigne dans le cadre de mes passations.

Je remercie mes parents et mon compagnon pour avoir cru en moi avant que je n'arrive à le faire. Merci à mon père pour ses relectures pertinentes, à ma mère pour son soutien inconditionnel, et à mon petit ami pour avoir effacé mes doutes toutes les fois où j'en avais.

Merci au reste de ma famille et à mes amis qui ont pris le temps de me relire et de me conseiller.

Merci à mes amies de promo pour ces cinq années d'entraide, de bonne humeur, de partages.

Enfin, je dédie ce mémoire à ma grand-mère, Cécile. Il n'en serait rien sans toi. Tu as ensoleillé mon quotidien pendant cinq ans et j'espère pouvoir réfléchir ces rayons vers toi aussi longtemps que je le pourrai.

Sommaire

Introduction 3
Partie théorique 4
CHAPITRE 1 : TROUBLE DES ACQUISITIONS MATHEMATIQUES ET LIGNE NUMERIQUE MENTALE 4
1 Sens du nombre et trouble des apprentissages mathématiques 4
1.1 Le sens du nombre 4
1.2 Troubles des apprentissages mathématiques (TAM) 4
2 Différentes hypothèses explicatives 5
3 Le concept de ligne numérique mentale 6
3.1 Définition et implications 6
3.2 Développement typique 6
3.3 Développement chez l'enfant TAM 7
4 Corrélation entre ligne numérique et habiletés mathématiques 8
4.1 Habiletés numériques de base 8
4.2 Performances arithmétiques et résolution de problèmes 8
CHAPITRE 2 : ÉVALUATION ET INTERVENTION SUR LA LIGNE NUMERIQUE 9
1. Evaluation de la ligne numérique 9
1.1 Tâches d'estimation sur ligne numérique 9
1.2 Outils d'évaluation 9
1.3 Evaluation des performances 10
2. Prédicteurs de réussite à la tâche d'estimation sur ligne numérique 10
3. Intervention sur ligne numérique 11
CHAPITRE 3 : STRATEGIES ET LIGNE NUMERIQUE 13
1. Transfert de stratégies explicites dans l'apprentissage 13
2. Stratégies et précision d'estimation sur ligne numérique 14
2.1 Les stratégies impliquées et leur corrélation avec la performance sur ligne numérique 14
2.2 Développement des stratégies chez l'enfant DT vs les TAM 15
2.3 Analyse des stratégies 15
3. Stratégies de calcul mental 16
3.1 Stratégies existantes et effet de taille 16
3.2 Développement des stratégies chez l'enfant 16
3.3 Utilisation des stratégies selon le type d'opération 17

Partie pratique 18
1. Problématique et objectifs 18
2. Matériel et méthode 19
2.1 Population 19
3. Résultats 24
3.1 Mathis 24
3.2 Cyrielle 28
Discussion 32
1. Interprétation des résultats 32
1.1 Hypothèse 1 *: amélioration des estimations de nombres sur ligne numérique entre le premier pré-test et le dernier post-test, par le biais des variables suivantes : PAE (pourcentage d'erreur absolu) et temps de réponse.* 32
1.2 Hypothèse 2 : *progrès en calcul mental et également en calcul sur ligne (score et temps de réponse pour le calcul sur ligne)* 33
1.3 Hypothèse 3 : *amélioration d'estimation de nombres sur ligne numérique entre T2 et T3, via le PAE et le temps de réponse* 35
1.4 Hypothèse 4 : *amélioration calcul sur ligne et mental entre T2 et T3* 35
1.5 Hypothèse 5 : *pas d'augmentation sur le positionnement structuré entre chaque test* 36
2. Limites de l'étude 37
Conclusions et Perspectives 38
Bibliographie 39
Annexes 53

INTRODUCTION

Actuellement, de plus en plus d'enfants sont suivis en orthophonie à la suite d'un diagnostic de trouble des apprentissages mathématiques (TAM). Ce trouble peut s'illustrer dans différents domaines mathématiques et de multiples hypothèses explicatives coexistent notamment celle d'un trouble cognitif numérique avec un déficit lié au sens du nombre mis en avant par de nombreux auteurs. La ligne numérique mentale est actuellement le principal modèle de représentation des quantités numériques. De nombreuses corrélations entre la précision d'estimation sur ligne numérique et les performances en arithmétique ont été montrées. Pourtant, encore peu d'entraînements sur la ligne numériques ont été effectués auprès d'enfants TAM. Par ailleurs, il a été démontré qu'un enseignement explicite de stratégies était particulièrement bénéfique chez les enfants avec troubles des apprentissages.

En ce sens, nous nous sommes demandés si une intervention individuelle et intensive, centrée sur le placement de nombres et le calcul sur ligne numérique, et couplée à un apport de stratégies explicites verbales, pouvait avoir une incidence positive sur la précision des représentations numériques et les capacités en calcul additif et soustractif chez deux enfants TAM. Notre principal objectif est d'évaluer l'effet d'une intervention de la ligne numérique sur la précision des représentations numériques chez deux patients TAM. Nous contrôlerons parallèlement la présence d'une amélioration des capacités en calcul chez ces enfants.

Pour ce faire, nous avons effectué auprès de deux jeunes patients un entraînement fractionné de six semaines portant sur le placement de nombres et le calcul sur ligne numérique : les trois premières semaines sans apport de stratégies et les trois autres avec transfert de stratégies explicites. Les performances des patients ont été évaluées avant, pendant et après l'entraînement.

Dans la partie théorique, nous définirons le trouble des apprentissages mathématiques et nous expliquerons le concept de ligne numérique en détaillant les liens que ceux-ci entretiennent. Ensuite, nous présenterons les modalités d'évaluation de la ligne numérique ainsi que les interventions déjà effectuées au travers de celle-ci. Enfin, nous parlerons de l'utilisation de stratégies, pour le placement de nombres sur ligne numérique d'une part, et lors de tâches de calcul mental d'autre part.

Dans la partie pratique, nous présenterons nos deux patients, puis nous détaillerons les épreuves utilisées ainsi que le déroulement et le contenu de l'intervention. Enfin, nous exposerons les résultats qui seront par la suite discutés et mis en regard des études sur la ligne numérique déjà effectuées.

PARTIE THEORIQUE

CHAPITRE 1 : TROUBLE DES ACQUISITIONS MATHEMATIQUES ET LIGNE NUMERIQUE MENTALE

1 Sens du nombre et trouble des apprentissages mathématiques

1.1 Le sens du nombre

Le « sens du nombre » (Dehaene, 1992 ; Dehaene et Cohen, 1995, 2000) décrit notre capacité à approximer et manipuler des quantités numériques. Il est, en d'autres termes, l'information sémantique des nombres. Celui-ci correspond à la représentation mentale de la magnitude et est logé au sein du code analogique. La représentation analogique (non-symbolique) est indispensable pour développer des compétences numériques et se compose de deux systèmes numériques distincts :

- le système numérique approximatif (SNA) permettant le traitement numérique approximatif des grandes quantités et mis en jeu dans l'estimation de collections, la comparaison de nombres ou encore le placement sur ligne numérique
- le système numérique précis (SNP), s'occupant du traitement immédiat et précis de petites quantités, inférieures ou égales à 4 selon les auteurs au cœur du processus de « subitizing »

Ainsi une atteinte du sens du nombre engendre alors un trouble des apprentissages numériques.

1.2 Troubles des apprentissages mathématiques (TAM)

Le DSM V considère la dyscalculie comme un trouble spécifique des apprentissages et plus précisément comme un trouble des apprentissages en mathématiques (TAM). Ce trouble peut engendrer des déficits concernant : le traitement des quantités numériques, la mémorisation des faits arithmétiques, les capacités arithmétiques ou encore le raisonnement mathématique. Pour répondre aux critères diagnostiques d'un TAM, le sujet doit présenter des aptitudes arithmétiques nettement en dessous du niveau scolaire attendu, rencontrer des

perturbations significatives dans sa scolarité et dans son quotidien depuis au minimum six mois, et enfin être exempt de tout déficit sensoriel.

Nombre de chercheurs s'intéressant au domaine des apprentissages mathématiques se sont penchés sur les hypothèses explicatives de ce trouble.

2 Différentes hypothèses explicatives

Les hypothèses explicatives du TAM sont nombreuses et il n'existe toujours pas de consensus dans la recherche quant aux origines de ce trouble.

Les hypothèses d'un trouble cognitif numérique sont aujourd'hui les plus répandues, comme l'hypothèse d'un déficit du sens du nombre : déficit du traitement des représentations non symboliques du nombre et altération des représentations numériques mentales, impliquant des difficultés à comparer, identifier et estimer des quantités, des difficultés à placer des nombres sur une ligne numérique, etc. (Wilson et Dehaene, 2007 ; Butterworth, 2005 ; Von Aster et Shalev, 2007) ou celle d'un déficit d'accès au sens du nombre via les codes symboliques (Noël et Rouselle 2011 ; Lafay, A., Saint-Pierre, M.-C., & Macoir, J., 2015) suggérant des difficultés à accéder au sens des quantités depuis les nombres arabes, mais des capacités préservées sur le traitement de quantités non symboliques.

Il existe en parallèle les hypothèses d'un trouble cognitif général : un déficit de la mémoire de travail (Geary, 1993, 2010 ; Geary, Nicholas, Li, & Sun, 2017) qui toucherait particulièrement les procédures de calcul, un déficit de raisonnement (Morsanyi et al., 2013) , d'apprentissage sériel (De Visscher, Szmalec, Van Der Linden, Noël, 2015) de la mémoire à long terme (Barrouillet, Fayol, & Lathulière, 1997), d'hypersensibilité à l'interférence (De Visscher, Noël, 2014) . D'autres hypothèses encore sont en lice comme celle d'un déficit aux causes multiples (Andersson et Östergren, 2012) ; Soares, Evans & Patel, 2018).

Notre étude s'intéresse davantage à l'hypothèse du trouble cognitif numérique et en particulier au déficit d'estimation de nombres sur une ligne numérique.

3 Le concept de ligne numérique mentale

3.1 Définition et implications

L'hypothèse d'une ligne numérique mentale en tant que support possible de représentation numérique est apparue à la fin des années 1960 avec Moyer et Landauer (1967), puis Restle (1970), qui utilisent cette métaphore pour décrire les représentations liées à l'estimation de quantités et emploient des tâches de comparaison et d'estimation rapide. La métaphore d'une ligne numérique mentale est ensuite évoquée par Dehaene (1997) : « tout se passe effectivement comme si les différents nombres étaient alignés mentalement sur une ligne où chaque position correspond à une certaine quantité. » Cette ligne numérique mentale est orientée de gauche à droite dans les cultures occidentales (Dehaene, Bossini et Giraux, 1993), orientation appuyée par l'effet SNARC (Spatial Numerical Association of Response Codes) correspondant à une association systématique entre le nombre et l'espace : ainsi, la performance est meilleure pour comparer une paire de nombres lorsque le petit nombre est situé à gauche plutôt qu'à droite.

L'implication de la ligne numérique au sein du développement de la cognition mathématique est majeure. Dehaene (1997) suggère que la ligne numérique mentale fournit une sensation intuitive des nombres et de leurs interrelations permettant une acquisition plus avancée des compétences mathématiques. Composante importante du *number sense* (Lafay, 2016) la ligne numérique s'élabore lors de l'étape la plus tardive du modèle de Von Aster et Shalev (2007) puisqu'elle résulte de l'intégration des différentes représentations du nombre et des positions ordinales de chacun. Avec la tâche de comparaison de magnitudes, l'épreuve d'estimation sur ligne numérique teste directement la représentation mentale des magnitudes.

La logique de construction et la progression de la ligne numérique mentale chez les enfants au développement typique ont largement été documentées par différents auteurs.

3.2 Développement typique

Avant 6-7 ans (correspondant à l'entrée à l'école primaire) ou en tout absence d'enseignement scolaire, la ligne numérique mentale suit les propriétés d'une fonction logarithmique. En effet, les représentations numériques mentales obéissent à la loi de Weber-Fechner, une compression logarithmique des représentations numériques est observée quand les quantités augmentent. Ainsi, le jugement des nombres est établi sur la base de leur similitude

(en termes de ratio), et non sur la distance qui les sépare (Siegler et Opfer, 2003). La précision numérique évolue positivement avec l'âge et le niveau scolaire. Grâce à l'association entre le code verbal d'une part et le code indo-arabe d'autre part, la représentation se linéarise progressivement à partir de 6-7 ans (Booth & Siegler, 2006 ; Geary, Hoard, Nugent & Byrd-Cravent, 2008) jusqu'à 8-9 ans pour les nombres de 0 à 100. Pour les nombres de 0 à 1000, la représentation devient linéaire dès le CE2 (Andersson & Östergren, 2012 ; Sella et al., 2013 ; van Viersen et al., 2013) ou dès 9-10 ans (Opfer & Siegler, 2007 ; Booth & Siegler, 2006) selon les auteurs.

Si le développement de la ligne numérique mentale est assez uniforme chez les enfants au développement typique, ceci est bien moins vrai chez les enfants TAM. Néanmoins, un net décalage chronologique est visible entre ces deux populations.

3.3 Développement chez l'enfant TAM

Selon plusieurs études, les enfants TAM n'accèdent à des représentations linéaires qu'après le CE2 sur une ligne numérique de 0 à 100 (Lafay et al., 2017b ; Landerl, Fussenegger, Moll et Willburger, 2009 ; Sella et al., 2013 ; Van Viersen et al., 2013).

Des études portant sur des enfants TAM entre 6 et 10 ans montrent que ceux-ci ont des représentations logarithmiques sur la ligne numérique alors que leurs pairs contrôles ont déjà des représentations linéaires (Geary et al ; 2008 ; Landerl, Fussenegger, Moll & Willburger, 2009). Selon une étude d'Andersson et Östergren (2012), les enfants dyscalculiques entre 10 et 12 ans ont des représentations des nombres arabes moins linéaires que celles de leurs pairs sans trouble.

Ce retard de maturation des représentations linéaires sur la ligne numérique peut avoir des répercussions sur d'autres habiletés numériques. En effet, la méta-analyse réalisée par Schneider et al. (2018) montre une corrélation significative (r=.443) entre les performances de placement de nombres sur une ligne numérique et les compétences mathématiques (épreuves de comptage, de calcul, et tests mathématiques standardisés).

4 Corrélation entre ligne numérique et habiletés mathématiques

4.1 Habiletés numériques de base

En relation directe avec le système de magnitude, les épreuves de ligne numériques sont corrélées aux habiletés numériques de base, comme les tâches d'estimation numérique (Booth & Siegler, 2006 ; Siegler & Booth, 2004), de comparaison de nombres (Sella, Berteletti, Lucangeli, & Zorzi, 2017) ou encore le comptage (Berteletti, Lucangeli, Piazza, Dehaene, & Zorzi, 2010 ; Fischer, Moeller, Bientzle, Cress, & Nuerk, 2011; Muldoon, Towse, Simms, Perra, & Menzies, 2013 ; Ostergren & Traff, 2013).

Les performances d'estimation sur ligne numérique sont également corrélées à des performances mathématiques allant au-delà des habiletés numériques.

4.2 Performances arithmétiques et résolution de problèmes

Le placement sur ligne numérique est également corrélé aux performances arithmétiques (Berteletti et al., 2010; Booth & Siegler, 2006, 2008; Halberda, Mazzocco, & Feigenson, 2008; LeFevre et al., 2013; Siegler & Booth, 2004; Siegler & Ramani, 2009) telles que le calcul approximatif (Gunderson et al, 2012 ; Sella, Sader, Lolliot, & Cohen Kadosh, 2016), mental (Booth & Newton 2012, Laski & Yu 2014), écrit (Torbeyns, Schneider, Xin, & Siegler, 2015), mais également la récupération des faits arithmétiques (Fabbri, 2011 ; Siegler & Ramani, 2009 ; Östergren & Träff, 2013). Selon Siegler et Ramani (2009) une ligne numérique développée et précise encourage l'acquisition et le stockage des faits arithmétiques autour des magnitudes des nombres, ce qui développe l'habileté à retrouver rapidement les faits arithmétiques depuis la mémoire à long terme. Booth et Siegler (2008) affirment que la précision d'estimation sur ligne numérique facilite l'apprentissage de l'arithmétique en limitant un ensemble de réponses possibles à celles d'une numérosité à peu près correcte, ce qui réduit la possibilité d'erreurs de calcul.

Plusieurs auteurs trouvent des corrélations significatives entre le positionnement sur ligne numérique et la résolution de problèmes mathématiques (Berch, 2005 ; Halberda et Feigenson, 2008 ; Locuniak et Jordan, 2007 ; Zhu, Cai et Leung, 2017).

Néanmoins, les corrélations entre les performances à la tâche de placement de nombres sur ligne numérique et les habiletés numériques peuvent être différentes selon l'âge. Zhu, Cai

et Leung (2017), montrent que l'estimation sur ligne numérique est significativement corrélée à la fluence en calcul ($p < 0.05$) en classe de CE1, alors qu'en classe de CM1, l'estimation sur ligne numérique est significativement corrélée à la résolution de problèmes mathématiques (Zhu, Cai & Leung, 2017) mais pas à la fluence en calcul (Träff, 2013).

CHAPITRE 2 : ÉVALUATION ET INTERVENTION SUR LA LIGNE NUMERIQUE

1. Evaluation de la ligne numérique

1.1 Tâches d'estimation sur ligne numérique

La plupart du temps, on propose au sujet une ligne numérique bornée (début et fin) et un nombre arabe. Il s'agit alors de positionner le curseur sur la ligne à partir d'un nombre (arabe), c'est la tâche de nombre-position. Cette tâche peut être complétée par la tâche position-nombre consistant à estimer oralement le nombre à partir d'un trait vertical déjà placé sur la ligne (position-nombre).

Très peu d'études pratiquent l'estimation sur ligne numérique avec des stimuli non symboliques **:** Fazio et al. (2014) présentent des patterns de points et Vogel et al (2013) des nuances de gris. Peu d'études utilisent une ligne non bornée, même si celle-ci est la mesure la plus pure de l'estimation des représentations numériques. (Cohen and Blanc-Goldhammer, 2011 ; Reinert et al., 2019)

Ces tâches d'estimation sur ligne numérique sont proposées par plusieurs outils actuels d'évaluation des apprentissages mathématiques.

1.2 Outils d'évaluation

Il existe plusieurs outils d'évaluation de la ligne numérique, la plupart du temps intégrés dans des batteries, à l'exception de DéCaLigne (Helloin & Lafay, 2018), outil de rééducation intégrant des lignes de base préliminaires à l'entraînement.

Certains bilans comme le Zareki-R (Dellatolas & Von Aster, 2006) ou le Numerical (Gaillard, 2000) proposent des placements de nombres sur ligne numérique verticale, bien que

la ligne numérique soit habituellement horizontale dans la littérature (Gevers, Lammertyn, Notebaert, Verguts et Fias, 2006 ; Ito et Hatta, 2004). Les différents outils d'évaluation proposent des lignes de 0-10, 0-20 (MathEval, DécaLigne), 0-100 (Zareki-R, MathEval, Numerical, EXAmath (Lafay & Helloin, 2016) , DéCaLigne), 0-200 (« compteur de vitesse » du Zareki-R) et 0-1000 (EXAmath, DéCaLigne). Tous proposent des nombres arabes et des nombres oraux, à l'exception du MathEval, proposant uniquement des nombres arabes. EXAmath et DéCaLigne explorent plus exhaustivement le SNA, d'une part en présentant 10 et 9 nombres respectivement pour chaque échelle de grandeur et chaque modalité, et d'autre part en proposant des grands nombres (0-1000). Ces derniers, informatisés, ont également l'avantage de comptabiliser le temps de réponse moyen (ms) du sujet par item.

1.3 Evaluation des performances

Les performances du sujet au placement de nombres sur ligne numérique sont généralement mesurées en fonction du PAE (pourcentage absolu d'erreur) se calculant comme tel : valeur absolue [position estimée par l'enfant – position attendue] / longueur de la ligne. Plus ce pourcentage est réduit, plus le placement est précis. L'autre indicateur de mesure est la linéarité de la représentation graphique des réponses (R^2) (nombre cible en abscisse et position estimée en ordonnée) : plus la représentation graphique correspond à une fonction linéaire, plus la précision numérique est bonne.

Parallèlement aux indicateurs de précision numérique, le temps de réponse est comptabilisé, notamment dans les bilans informatisés, et traduit l'automatisation de l'accès aux numérosités.

2. Prédicteurs de réussite à la tâche d'estimation sur ligne numérique

La représentation mentale des quantités numériques est le facteur principal qui influence l'estimation sur ligne numérique (Yuan et al. 2020).

Bien d'autres facteurs déterminent les performances individuelles sur la tâche de ligne numérique tels que le degré de connaissance des nombres (Booth & Siegler, 2006 ; Siegler & Opfer, 2003), la catégorisation du langage (Landy, Charlesworth, & Ottmar, 2016), l'attention et utilisation de stratégies (White & Szucs, 2012), ou encore le raisonnement proportionnel (Barth & Paladino, 2011 ; Slusser et al., 2013).

Desoete et al. (2013) ont montré une corrélation entre le pourcentage d'erreur sur la ligne numérique d'une part et plusieurs habiletés mathématiques : les compétences mathématiques précoces (notamment la connaissance du sens du nombre et la numération), le calcul procédural et conceptuel et les performances aux épreuves logiques de Piaget (sériation et classification).

3. Intervention sur ligne numérique

Plusieurs résultats d'études d'entraînements expérimentaux montrent que jouer à des jeux de plateaux sur la ligne numérique peut améliorer les compétences mathématiques (Ramani & Siegler, 2008 ; Siegler & Ramani, 2009 ; Whyte & Bull, 2008). Siegler et Ramani (2008) ont donc créé un entraînement sous forme de jeu de plateau linéaire comportant les nombres de 1 à 10 à destination d'enfants de 4-5 ans de faible niveau socio-économique. Des améliorations sont visibles concernant l'appariement nombres /espace, le comptage, la compréhension des quantités numériques et leur identification, la comparaison de deux quantités et l'estimation sur une ligne numérique.

Les entraînements de la ligne numérique basés sur des déplacements du corps sont testés et soutenus par plusieurs auteurs dans la littérature : Link, Moeller, Huber, Fischer et Nuerk (2013) comparent un entraînement sur tablette numérique versus un entraînement où l'enfant se déplace en marchant sur une ligne numérique au sol. Les performances de ces derniers s'avèrent meilleures que celles du groupe sur tablette. Les résultats de Dejonckerre et al. (2015) vont dans le même sens, ceux-ci entraînent des enfants sur la ligne numérique via deux modalités différentes : un groupe est assigné à la modalité pointage sur tablette numérique et le second à la modalité saut en déplaçant eux-mêmes une petite grenouille jusqu'à la position cible. L'entraînement « saut » est plus efficient que celui avec « pointage ».

Ces dernières années, plusieurs programmes informatisés ont été développés. L'ordinateur représente un médiateur d'apprentissage attractif (Kulik and Kulik, 1991 ; Schoppek and Tulis, 2010). De plus, beaucoup de programmes sont adaptés aux enfants et ces derniers les perçoivent davantage comme un jeu que comme un apprentissage (Lenhard et al., 2011). Concernant les enfants en difficulté d'apprentissage, un entraînement informatisé offre des avantages significatifs (Räsänen et al., 2015, 2019). En effet, les programmes virtuels présentent un environnement d'apprentissage détaché de la pression de performance et offrent un cadre moins stressant pour explorer les mathématiques (Käser et al., 2013). Les interventions sur interfaces numériques seraient particulièrement efficaces pour améliorer l'estime de soi et la motivation

des enfants (Dempsey et al, 1994 ; Ritchie & Dodge, 1992 cités par Sylvia Benavides-Varela, 2020).

Le premier logiciel développé pour les enfants avec difficultés d'apprentissages mathématiques est la Course aux Nombres (Wilson et al., 2006) : testé avec des enfants de 7 à 9 ans, il a été conçu pour entraîner les comparaisons numériques et améliorer les représentations des quantités. Kucian et al.(2011) ont comparé les performances d'enfants dyscalculiques et non dyscalculiques de 9 à 11 ans sur un entraînement de la ligne numérique mentale avec le programme à ce moment appelé « Rescue Calcularis » sur une période de 5 semaines à raison de 5 entraînements hebdomadaires de 15 minutes. Les résultats montrent des améliorations en arithmétiques et de meilleurs représentations spatiales numériques. Käser et al. (2013 ; 2016) reprennent les éléments principaux de « Rescue Calcularis » et en font une version plus complète « Calcularis » : 54 enfants entre 7 et 11 ans sont entraînés sur 24 sessions de 20 minutes pendant 6 à 8 semaines. Des améliorations significatives aux tâches d'estimation sur ligne numériques et en soustractions sont relevées par rapport aux groupes contrôle et entraînement alternatif.

L'étude de Marcon & Lafay (2020), portant sur un entraînement individualisé de la ligne numérique et du calcul chez deux jeunes (8 et 15 ans) à raison de 3 séances hebdomadaires de 30 minutes pendant 4 semaines démontre chez les deux sujets une amélioration de leur précision numérique et de leurs capacités de calcul (avec et sans ligne numérique).

Enfin, Kohn et al. (2020) déploient un entraînement pour 34 enfants dyscalculiques entre 7 et 11 ans pendant 13 semaines à raison de 42 sessions de 20 minutes. Une diminution du PAE et une augmentation significative de la linéarité sont observés pour les enfants du groupe entraîné.

CHAPITRE 3 : STRATEGIES ET LIGNE NUMERIQUE

1. Transfert de stratégies explicites dans l'apprentissage

Le terme de stratégie se réfère aux comportements mis en place par une personne pour s'aider à résoudre un problème. On distingue deux types de stratégies, les stratégies cognitives qui facilitent la résolution d'un problème, comme comparer, souligner les informations pertinentes, paraphraser, et les stratégies métacognitives qui permettent de contrôler les stratégies utilisées et leurs effets. (Bosson, MS., Hessels, MGP., Hessels-schlatter, C. (2009)).

Barak Rosenshine, professeur de psychologie cognitive dans l'Illinois, a mis en évidence par des recherches empiriques qu'un enseignement explicite et systématique comportait de nombreux avantages, pour un certain nombre de disciplines différentes, et divers publics d'élèves. L'efficacité de la démarche d'enseignement explicite a notamment été démontrée auprès d'élèves en difficulté d'apprentissage dans les travaux de Swanson (*Journal of learning disabilities,* 1999, 2000 et 2003) et plus récemment dans ceux de Zheng, Flynn et Swanson (2013). L'enseignement explicite préconise la formalisation d'une stratégie d'enseignement structurée en étapes séquencées et fortement intégrées. Ainsi, de nombreux auteurs ont développé des modèles d'enseignement explicite en différentes étapes ordonnées (Bissonnette & Richard, 2001; Gauthier, 2007; Büchel, 2007).

À partir des trois étapes de l'enseignement explicite décrites initialement par Bissonnette et Richard en 2001 (modelage, pratique guidée, pratique autonome), Falardeau & Gagné (2012) conçoivent un protocole d'enseignement explicite des stratégies de compréhension en lecture, en six étapes : 1) Définir la stratégie : l'enseignant nomme et détaille la stratégie à l'apprenant, 2) Modelage : il s'agit ici de rendre le processus de réflexion transparent en explicitant son raisonnement à voix haute 3) Pratique guidée/étayage : pratique conjointe de l'apprenant et de l'enseignant, 4) Pratique autonome, 5) Rétroactions et questionnements : feedbacks sur la pratique de l'élève et sur sa progression 6) Réinvestissement : l'enseignant démontre à l'apprenant tout ce qu'il a appris en vue d'une généralisation à d'autres contextes de pratiques.

Dignath, Büttner et Langfeldt (2008) affirment que l'entraînement de stratégies est plus efficace s'il est accompagné d'une réflexion métacognitive (prise de conscience de sa propre activité stratégique et de ses effets) et d'un travail sur différentes variables motivationnelles.

Notre recherche tend à transposer les modèles d'enseignement explicite de stratégies aux épreuves de placement de nombres sur ligne numérique.

2. Stratégies et précision d'estimation sur ligne numérique

2.1 Les stratégies impliquées et leur corrélation avec la performance sur ligne numérique

Les enfants et adultes présentant un développement typique (DT) ont habituellement recours au comptage, à l'utilisation de points de références et aux stratégies de raisonnement proportionnel lors d'une tâche d'estimation sur ligne numérique (Peeters, Degrande, Ebersbach, Verschaffel, & Luwel, 2016; Siegler & Opfer, 2003). Dans les stratégies de comptage, on compte par exemple trois unités de gauche à droite pour trouver le nombre cible « 3 ». La stratégie des points de référence correspond à l'utilisation de points de repère sur la ligne comme par exemple le centre ou les trois-quarts de celle-ci. Enfin, les personnes utilisant un raisonnement proportionnel trouvent la position cible sur la ligne en traduisant une proportion numérique (75 = ¾ de 100) en une proportion visuo-spatiale (3/4 de la ligne bornée de 0 à 100). (Schneider, M., Thompson, C., & Rittle-Johnson, B., 2018).

Plusieurs auteurs ont récemment montré que l'amélioration d'estimation sur la ligne numérique était corrélée avec une utilisation accrue de stratégies tel que l'usage de points de référence sur la ligne (Ashcraft et Moore, 2012 ; Link et al., 2014 ; Peeters et al., 2016). Aussi, Peeters et al., (2016) montrent que la fréquence d'utilisation de stratégies basées sur les points de repère est significativement corrélée aux performances mathématiques et légèrement moins à la précision d'estimation. Toutefois, tous les points de repère ne sont pas efficaces : dans l'étude de Siegler & Thompson (2014), les repères externes qui divisent un nombre 0-1 en dixièmes, quarts ou cinquièmes ont conduit à des estimations moins précises que l'absence de référence ou d'un point de référence au milieu.

Van't Noordende, van Hoogmoed, Schot et Kroesbergen (2016) proposent ainsi d'explorer des méthodes possibles pour entraîner l'utilisation des stratégies efficaces.

Plusieurs stratégies de placement ont été répertoriées et certaines sont plus efficaces que d'autres. Toutefois, le développement de ces stratégies efficaces est très progressif et celles-ci

ne se développent pas de la même manière chez un enfant au développement mathématique typique et chez celui avec trouble des apprentissages mathématiques.

2.2 Développement des stratégies chez l'enfant DT vs les TAM

En première année de primaire, les enfants sans trouble utilisent les stratégies de comptage et de point de repère puis se basent de plus en plus vers les stratégies de point de référence et de proportion avec l'âge (Petitto, 1990; Schneider et al., 2008; Siegler & Opfer, 2003; Sullivan, Juhasz, Slattery, & Barth, 2011).

Plusieurs auteurs qui ont étudié les stratégies des enfants TAM sur ligne numérique ont observé que ces derniers usaient de stratégies d'estimations peu fonctionnelles (Schot et al., 2015; Van't Noordende & Kolkman, 2013; Van Viersen et al., 2013). Van Viersen et al., (2013) ont relevé chez une fillette TAM des stratégies d'estimation dysfonctionnelles dans 26% des items versus 8% chez les enfants DT. De plus, les enfants avec TAM n'adapteraient pas leur estimation au nombre qui doit être estimé (Van't Noordende et Kolkman, 2013). Van't Noordende, van Hoogmoed, Schot et Kroesbergen (2016) montrent que les enfants TAM utilisent moins de points de références que leurs pairs sans trouble, qu'ils s'appuient systématiquement sur le milieu de la ligne et que leurs points de repère sont plus éloignés du nombre cible que ceux qu'utilisent les enfants DT.

Schot et al. (2015) ont réalisé une étude de cas avec deux enfants atteints de dyscalculie développementale et ont trouvé que leurs fixations étaient à la fois plus dispersées sur la ligne des nombres et plus éloignées du nombre cible et de la réponse que dans le groupe de contrôle.

Depuis peu, quelques chercheurs ont essayé d'inventorier les stratégies de placement sur ligne numérique, à travers des procédés d'analyse différents.

2.3 Analyse des stratégies

Le relevé des stratégies sur ligne numérique peut être pratiqué via la technique d'eye-tracking (Van Viersen et al. (2013) ; Van't Noordende, van Hoogmoed, Schot et Kroesbergen (2016) ; Van der Weijden, Kamphorst, Willemsen et al. (2018)) qui analyse les mouvements et fixations oculaires, et qui peut être combinée à la technique qualitative dite « CRR » (cued restrospective reports) dans laquelle on montre rétrospectivement au patient ce qu'il a produit grâce aux enregistrements de ses mouvements (souris, clavier et fixations oculaires) et à qui on demande de verbaliser les stratégies utilisées. Peeters, Degrande, Ebersbach, Verschaffel, &

Luwel, (2016) ont, eux, eu systématiquement recours à la technique d'auto-report verbal en demandant à l'enfant après chaque essai comment il avait placé son curseur sur la ligne.

Notre étude s'intéresse à la fois aux stratégies de placement, relatives à l'estimation sur ligne numérique, mais également aux stratégies liées au calcul mental, corrélées au calcul sur ligne numérique.

3. Stratégies de calcul mental

3.1 Stratégies existantes et effet de taille

Les stratégies de calcul mental ont été étudiées par de nombreux auteurs, notamment depuis les travaux de Mark Ashcraft dans les années 70.

Dans les tâches dites de production, on distingue deux stratégies principales : la stratégie procédurale, dans laquelle on peut citer le comptage ou bien la décomposition en termes plus petits, et la stratégie de récupération, où le résultat est rappelé à partir de la mémoire à long terme. La sélection d'une stratégie dépend de la magnitude des opérandes : la résolution de petits problèmes avec la stratégie de récupération, alors que les grands problèmes sont principalement résolus avec des stratégies procédurales (LeFevre et al., 1996). Selon LeFevre et.al, il existe un effet de taille du problème seulement lors de l'utilisation de stratégies procédurales, quasi-absent lors de la récupération depuis la mémoire à long terme.

Les stratégies procédurales et de récupération maturent progressivement en fonction du développement arithmétique de l'enfant.

3.2 Développement des stratégies chez l'enfant

La performance de jeunes enfants en arithmétique est d'abord basée sur des stratégies procédurales et ces procédures sont progressivement remplacées par la récupération directe de la mémoire (Ashcraft, 1992 ; Barrouillet & Fayol, 1998 ; Lemaire, Barrett, Fayol, & Abdi, 1994 ; Widaman, Little, Geary, & Cormier, 1992). C'est au niveau du CE2 que les enfants passent d'une stratégie où le comptage domine à une autre marquée par le recours fréquent à la récupération en mémoire à long terme (Ashcraft, 1982 ; Ashcraft et Fierman, 1982). Les associations en mémoire à long terme du problème et de son résultat constituent ce qu'on appelle les faits arithmétiques. Néanmoins, il existe de grandes différences individuelles dans

l'utilisation des stratégies arithmétiques chez les enfants (par exemple, Dowker, 2005). Selon Barouillet et Lépine (2005), les enfants avec une faible mémoire de travail présenteraient un effet de taille du calcul plus important que les enfants avec une grande capacité de mémoire de travail.

Les stratégies de calcul se développent progressivement en fonction des particularités de chaque enfant, mais leur usage est différent selon le type d'opération effectué.

3.3 Utilisation des stratégies selon le type d'opération

Les additions peuvent être résolues à la fois par le biais de la récupération des faits en mémoire et par la manipulation des quantités (i.e., procédures de calcul) (Dehaene et al., 2003). Chez l'enfant, la première stratégie de calcul additif est la stratégie MIN consistant à compter sur le plus grand des deux opérandes par le nombre indiqué par le plus petit des opérandes (Carr & Jessup, 1995 ; Siegler & Crowley, 1994). Lorsque la stratégie de récupération est utilisée en calcul additif, le sujet n'a pas besoin de se représenter les magnitudes pour résoudre l'opération.

Concernant les soustractions, les chercheurs sont arrivés à la conclusion que les problèmes soustractifs sont essentiellement résolus par stratégies procédurales (Dehaene & Cohen, 1997 ; Thevenot & Barrouillet, 2006), excepté pour les problèmes impliquant de petits nombres (Seyler, Kirk et Ashcraft, 2003) où les courts temps de latence et le faible taux d'erreurs signeraient une récupération en mémoire à long terme.

PARTIE PRATIQUE

1. Problématique et objectifs

La première partie de cette étude a permis de préciser le rôle que jouait la ligne numérique dans le développement des habiletés numériques et de la représentation des magnitudes chez l'enfant. Nous avons également montré que l'apport de stratégies tant en placement sur ligne qu'en calcul pouvait être un vecteur d'amélioration dans ces domaines-ci. Le logiciel Décaligne, développé récemment par C.Helloin et A.Lafay (2018) s'inscrit dans les recherches actuelles autour de la ligne numérique en proposant des entraînements spécifiques de placement et de calcul basés sur l'utilisation de celle-ci. Au vu des résultats très encourageants de l'étude de L. Marcon et A. Lafay (2020) consistant en une intervention intensive sur ce logiciel, nous avons décidé de mener à notre tour une intervention, couplée à un transfert explicite de stratégies verbales. Nous nous sommes donc demandé : est-ce qu'une intervention individuelle et intensive, centrée sur le placement de nombres et le calcul sur ligne numérique, et couplée à un apport de stratégies explicites verbales, peut avoir une incidence positive sur la précision des représentations numériques et les capacités en calcul additif et soustractif chez deux enfants TAM ?

Cette étude aura pour **objectif principal** d' évaluer l'effet d'un protocole d'intervention de la ligne numérique sur la précision des représentations numériques chez deux enfants TAM.

Nous nous sommes intéressés à quatre autres objectifs secondaires afin d'approfondir l'analyse des effets de ces entraînements. **Premièrement**, il s'agira de contrôler s'il y a une amélioration conjointe significative des capacités d'addition et de soustraction chez ces enfants. **Deuxièmement**, nous chercherons à contrôler s'il existe une corrélation entre l'explicitation de stratégies de placement et la précision des représentations numériques sur la ligne. **Troisièmement**, nous vérifierons si l'explicitation de stratégies de calcul a permis une amélioration supplémentaire en capacités de calcul. **Enfin**, nous examinerons si ce protocole d'intervention est spécifique et ne permet pas de s'améliorer sur des compétences non ciblées (test du positionnement structuré).

Selon notre 1ère hypothèse, nous espérons une amélioration des estimations de nombres sur ligne numérique entre le premier pré-test et le dernier post-test, par le biais des variables suivantes : PAE (pourcentage d'erreur absolu) et temps de réponse.

Selon notre 2nde hypothèse, nous attendons des progrès en calcul mental et également en calcul sur ligne pour les deux patients. Pour le calcul sur ligne, nous espérons une amélioration du score et du temps de réponse.

Selon notre 3ème hypothèse, nous espérons voir une amélioration d'estimation de nombre sur ligne numérique entre T2 et T3, via le PAE et le temps de réponse.

Selon notre 4ème hypothèse, nous attendons également une amélioration sur le calcul mental et le calcul sur ligne entre T2 et T3, à travers les variations du score et du temps de réponse.

Selon notre 5ème et dernière hypothèse, nous espérons que le score de chaque patient au test de positionnement structuré n'augmente pas entre T0, T1, T2 et T3.

2. Matériel et méthode

2.1 Population

2.1.1 Sélection et recrutement des participants

Les deux patients qui ont participé à cette étude ont été recrutés au sein de la patientèle d'une orthophoniste libérale exerçant dans le département du Var.

Tableau 1 : critères de sélection

Critères d'inclusion	*Critères d'exclusion*
- trouble spécifique des apprentissages en mathématiques diagnostiqué - suivi en orthophonie depuis plus de 6 mois - âgé entre 8 et 15 ans (étalonnages batterie examath)	- présence d'un handicap mental ou neurologique - présence d'un handicap sensoriel non pris en charge

Une explication écrite détaillée a été donnée aux parents de chaque patient afin de les informer des modalités de l'entraînement et des intérêts de ce dernier pour leur enfant.

2.1.2 Présentation des deux sujets

Mathis est un jeune garçon né en janvier 2012. Agé de 9 ans au moment des passations, il est scolarisé en CE2 et n'a jamais redoublé de classe. Il est suivi en langage oral et écrit depuis d'octobre 2018 (classe de CP) , suite au diagnostic d'un trouble phonologique, impactant l'entrée dans le langage écrit. Depuis octobre 2019, Mathis bénéficie également d'une prise en soin pour la cognition mathématique et le raisonnement logique, suite à un tableau très hétérogène à l'EXAmath et la B-LM, avec notamment des scores pathologiques aux habiletés numériques de base et plusieurs structures logiques immatures. Après d'importants progrès en langage écrit, Mathis ne nécessite plus qu'une rééducation de la cognition mathématique actuellement, à raison de deux fois par semaine.

Cyrielle est une adolescente née en janvier 2006. Agée de 15 ans, elle est scolarisée en classe de 4ème et a redoublé la classe de CE1. Le diagnostic d'un trouble développemental du langage a été évoqué dès l'âge de trois ans, puis confirmé lorsqu'elle était encore en maternelle. Dès lors, Cyrielle a bénéficié d'un suivi orthophonique et les diagnostics de trouble du langage écrit ainsi que trouble des apprentissages mathématiques ont également été posés par la suite, durant l'école primaire. Actuellement, Cyrielle est suivie en cognition mathématique et en langage écrit, à raison de deux séances hebdomadaires.

2.2 Procédure

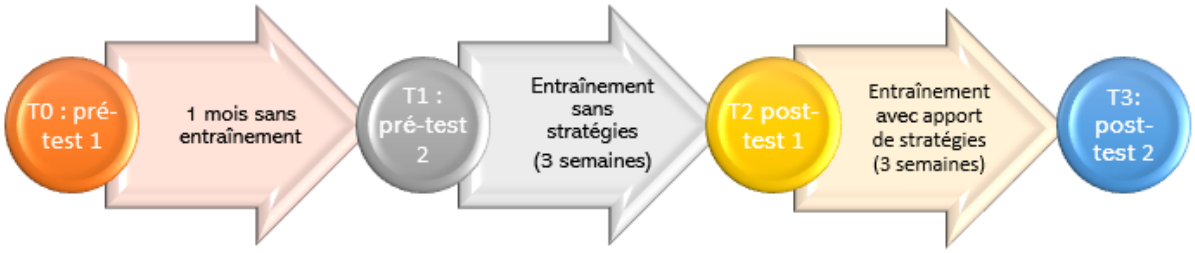


Figure 1 : Déroulement de l'intervention

Les deux patients ont d'abord effectué deux pré-tests (T0 et T1) à un mois d'intervalle sans entraînement spécifique entre ceux-ci (voir liste épreuves en annexe). Immédiatement après le second pré-test (T1), le premier entraînement individuel a commencé pour chaque patient, d'une durée approximative de 25 minutes et à raison de trois fois par semaine. Pour Mathis, l'entraînement s'est déroulé à son domicile, tandis que les séances ont été faites en

visioconférence avec Cyrielle, pour des raisons de garde parentale partagée. Au bout de trois semaines, un premier post-test a été effectué au domicile de chacun (T2). Après les vacances scolaires d'hiver (2 semaines), un deuxième entraînement avec apport de stratégies explicites a débuté, avec des modalités identiques au premier. A l'issue de cette seconde intervention, un dernier post-test (T3) a été proposé à chacun, comportant les mêmes épreuves que le premier pré-test (T0).

2.3 Matériel

L'ensemble des séances d'entraînement ont été réalisées sur un ordinateur portable avec souris filaire (ces conditions ont été identiques lors des séances en visioconférence avec Cyrielle qui possédait son propre ordinateur).

Lors du premier pré-test (T0) et du dernier post-test (T3) uniquement, nous avons utilisé certaines épreuves du logiciel de bilan informatisé EXAmath (Lafay & Helloin, 2016) édité depuis 2016 chez HappyNeuron et étalonné chez les sujets de 8 à 15 ans. Le test de dépistage Numeracy Screener (Nosworthy et Ansari) version papier-crayon a également été passé en complément d'EXAmath, afin d'apprécier les représentations analogiques et symboliques sans la composante exécutive d'un logiciel informatisé.

Pour l'ensemble des pré et post-tests, les lignes de base du logiciel DéCaLigne (Helloin & Lafay, 2018) ont été proposées aux deux patients (voir détail des épreuves en annexe). Nous avons également paramétré l'activité « opérations » présente dans la partie rééducation de DéCaLigne, afin que celle-ci fasse office de ligne de base pour évaluer les progrès en calcul sur ligne de chaque patient. Il a également été administré à chaque temps, en tant qu'épreuve « neutre », le test du Positionnement Structuré (issu de la NEPSY (Korkman, 1997)) consistant à relier au crayon des points par des traits droits en une minute, afin de s'assurer de la spécificité des entraînements.

2.4 Entraînement

Chaque séance a été découpée en deux parties distinctes : un temps dédié au placement de nombres sur une ligne numérique (activité « nombres ») puis du calcul sur ligne (additions/soustractions) via l'activité « opérations ».

Pour l'activité « nombres », nous avons choisi d'entraîner Mathis sur les lignes 0-10, 0-20, 0-100 et Cyrielle sur 0-100 et 0-1000. L'activité « nombre » se présente sous la forme d'une ligne numérique bornée sur laquelle il faut placer un nombre affiché sur l'écran (modalité arabe) ou entendu (modalité orale).

Quant à la partie de calcul sur ligne (additions et soustractions), entraînée via l'activité « opérations », nous avons proposé à Mathis les amplitudes 0-10, 0-20, 0-100 et 0-20, 0-100 et 0-1000 (addition seulement) pour Cyrielle.

Pour chaque activité, il est possible de paramétrer manuellement les modalités de l'exercice : amplitude de la ligne, points de repères, graduations, mode de déplacement, nombre d'items par activité.

La progression (amplitude, mode de déplacement, repères, graduations numériques) s'est faite de manière personnalisée par rapport à l'évolution et aux difficultés du patient. La progression générale du mode de déplacement a été celle-ci : déplacement par flèches (séance 1), puis saut (séance 2) et enfin pointage (séance 3). Les modalités de déplacement par flèches ainsi que la modalité de saut sont celles qui permettent le mieux de ressentir le déplacement. Pour le placement sur ligne, la progression des repères de graduations a été la suivante : tous repères, repères central puis aucun repère. En ce qui concerne le calcul sur ligne, tous les repères ont été conservés (sans quantité numérique inscrite sous les graduations).

Au début de chaque exercice, Mathis a apprécié pouvoir choisir son personnage et changer le décor de l'interface, cela a contribué au maintien de sa motivation pendant la séance. Cyrielle, plus âgée, ne ressentait pas l'envie de varier l'affichage.

Pour chaque réponse, différents feedbacks sont présents (mouvement du personnage choisi, couleur et affichage du résultat pouvant apparaître sous les modalités analogique, arabe ou nombres écrits en lettres). Mathis et Cyrielle ont été tous deux très sensibles aux feedbacks, particulièrement à la couleur de ceux-ci (vert si cible identique ou très proche, jaune si cible un peu éloignée, gris si cible trop éloignée).

Durant les trois semaines du premier entraînement, aucun indice verbal ou écrit extérieur au logiciel n'a été fourni au patient pendant qu'il effectuait les différentes tâches.

Le deuxième entraînement a consisté à fournir des stratégies orales (parfois écrites) en complément des modalités de l'entraînement initial, sur les activités « nombres » et « opérations ».

Tableau 2 : Stratégies utilisées pour l'estimation de nombres et le calcul sur ligne numérique

Stratégies utilisées pour le ***placement de nombres sur ligne numérique***	*Stratégies utilisées pour le* ***calcul sur ligne :***
- comptage - points de référence (borne minimale, borne maximale, point central) - raisonnement proportionnel	- stratégie min : compter à partir du plus grand nombre - décomposition - faits arithmétiques (compléments à 10, doubles)

Un protocole de transfert explicite de stratégies a été appliqué pour chaque séance :

1) Définition explicite de la stratégie utilisée
2) Exemple concret avec modelage : réflexion à voix haute pour que le patient puisse reproduire la même stratégie
3) Pratique guidée (étayage) accompagnée d'un questionnement métacognitif
4) Pratique autonome du patient
5) Rétroactions et questions (feedback constructif sur ce qu'a fait l'enfant pour l'aider à s'améliorer ou lui faire prendre confiance en ses capacités)

3. Résultats

3.1 Mathis

3.1.1 Résultats répondant à l'hypothèse n°1 : estimation sur ligne numérique (PAE, temps)

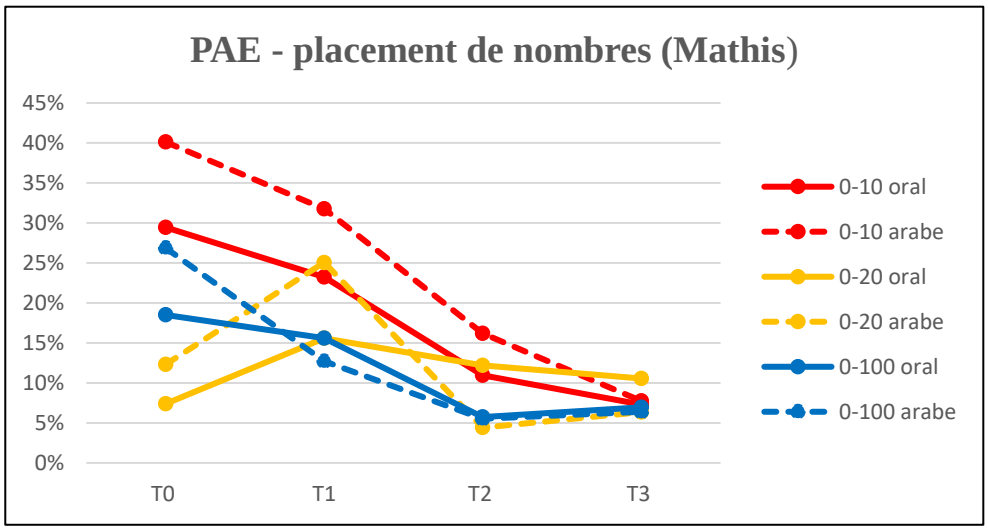


Figure 1 : Pourcentage d'erreur absolu au placement de nombres sur ligne numérique

La figure 1 illustre la tendance générale d'une diminution du pourcentage absolu d'erreur entre le premier pré test (T0) et le dernier post-test (T3) sur toutes les amplitudes de ligne, malgré la présence de fluctuations aléatoires entre T0 et T1. En d'autres termes, les erreurs de placement que produit Mathis sont de moins en moins importantes, ce qui signifie que sa précision de placement augmente entre T0 et T3.

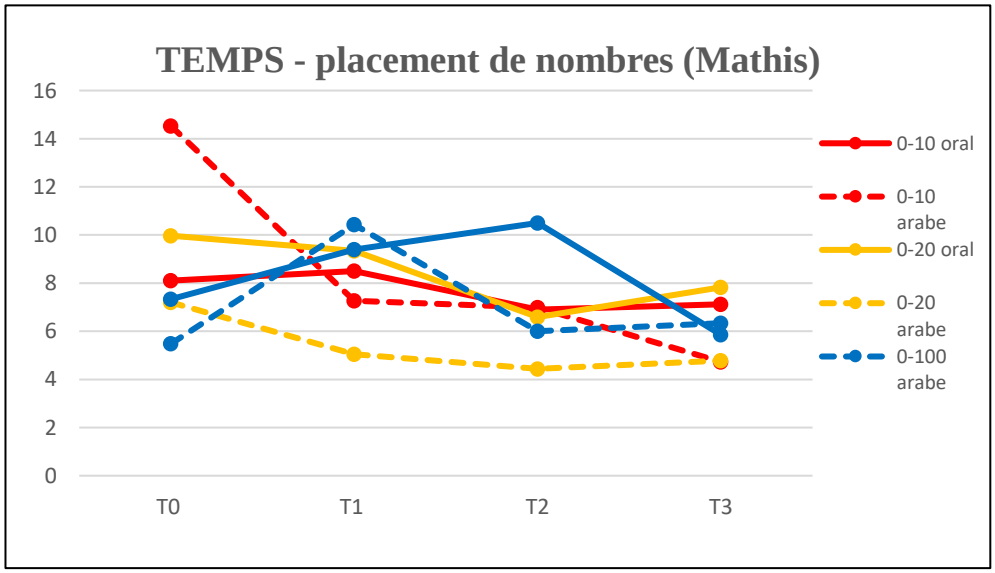


Figure 2 : Temps (en secondes) au placement de nombres sur ligne numérique

La figure 2 montre l'hétérogénéité de l'évolution de la variable temps. On observe une diminution globale du temps de placement sur les lignes 0-10 (arabe et oral) et 0-20 (arabe et oral). Quant aux lignes 0-100 (arabe et oral), les résultats en temps de placement sont très fluctuants : on observe néanmoins une diminution importante du temps sur la ligne 0-100 arabe entre T1 et T2 ainsi qu'une diminution sur la ligne 0-100 oral entre T2 et T3.

3.1.2 Résultats répondant à l'hypothèse n°2 : calcul sur ligne et calcul mental (objectif secondaire 1)

3.1.2.1 Calcul sur ligne

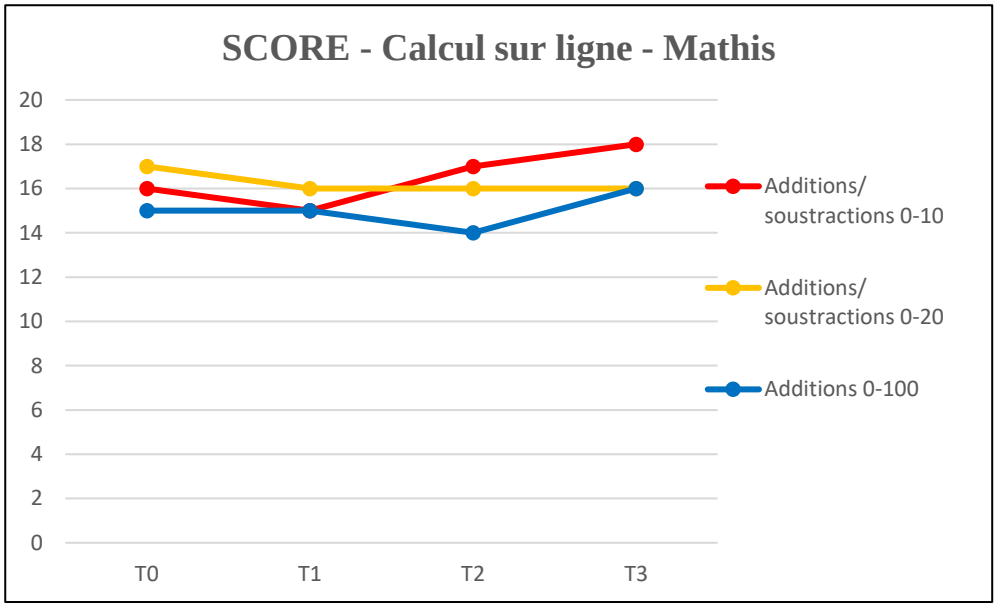


Figure 3 : Score au calcul sur ligne numérique – Mathis

Nous observons à travers la figure 3 une tendance générale d'augmentation sur les scores d'additions et soustractions sur 0-10, entre T1 (15/20) et T2 (17/20) puis entre T2 et T3 (18/20).

Toutefois, il n'apparaît pas de nette évolution pour les amplitudes 0-20 et 0-100. Pour la ligne 0-20, le score en additions/soustractions se maintient à 16/20 de T1 à T3 alors que pour les additions sur la ligne 0-100, le score diminue d'un point après la première phase d'entraînement (T2), puis augmente de deux points à l'issue de la seconde phase (T3).

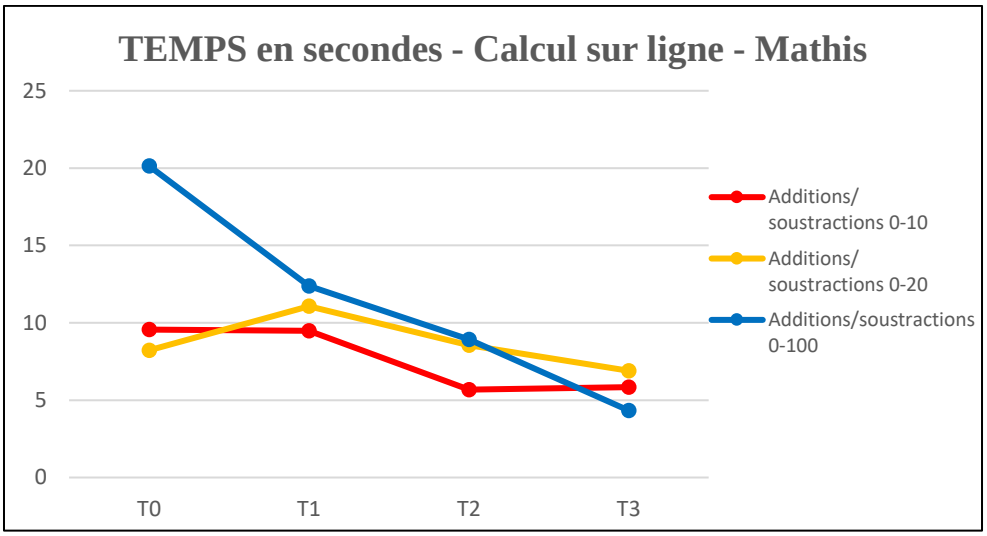


Figure 4 : Temps (en secondes) au calcul sur ligne numérique - Mathis

La figure 4 illustre une tendance générale de diminution du temps de calcul sur l'ensemble des lignes 0-10, 0-20 et 0-100. Entre T2 et T3, le temps continue à diminuer pour les calculs sur 0-100 alors qu'il stagne relativement sur 0-10 et 0-20.

3.1.2.2 Calcul simple

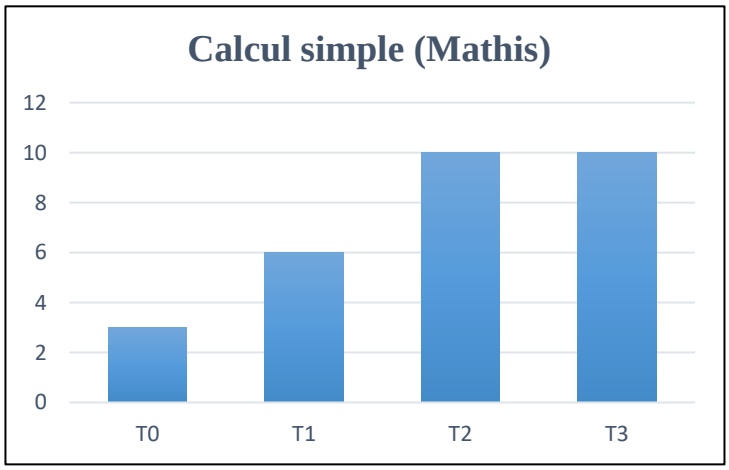


Figure 5 Score en calcul simple – Mathis

D'après la figure 5, le score de Mathis augmente de 3 points entre T0 et T1 (pas d'entraînement). Il augmente de nouveau de 4 points entre T1 et T2 puis stagne à 10/12 en T3.

3.1.3 Résultats répondant à l'hypothèse n°3 : amélioration de précision d'estimation entre T2 et T3 (objectif secondaire 2)

Nous voulions voir, à travers notre second objectif secondaire, si la précision d'estimation de nombres sur ligne numérique était plus importante en T3 qu'en T2, après le transfert de stratégies explicites de placement. Nous constatons (figure 1) que le pourcentage d'erreur (PAE) est meilleur (plus bas) en T3 qu'en T2 pour les lignes 0-10 (modalités arabe et oral) et la ligne 0-20 en modalité orale. Pour les autres lignes, on observe une stagnation du PAE, avec une évolution inférieure à 2%.

3.1.4 Résultats répondant à l'hypothèse n°4 (objectif secondaire 3)

3.1.4.1 Calcul sur ligne

Notre troisième objectif secondaire consistait à constater si le score obtenu en calcul sur ligne était plus élevé en T3 qu'en T2. D'après la figure 3, le score en calcul sur ligne augmente entre T2 et T3 pour les additions/soustractions sur 0-10 ainsi que pour les additions sur 0-100. Pour le calcul sur 0-20, le score se maintient à 16/20.

3.1.4.2 Calcul simple

Nous voulions voir si le score de calcul simple augmentait entre T2 et T3 avec l'apport de stratégies de calcul sur ligne numérique. D'après la figure 5, le score se maintient à 10/12 entre T2 et T3, sans varier.

3.1.5 Résultats répondant à l'hypothèse n°5 (objectif secondaire 4)

Nous voulions ici vérifier si les entraînements effectués permettaient d'améliorer spécifiquement les compétences ciblées.

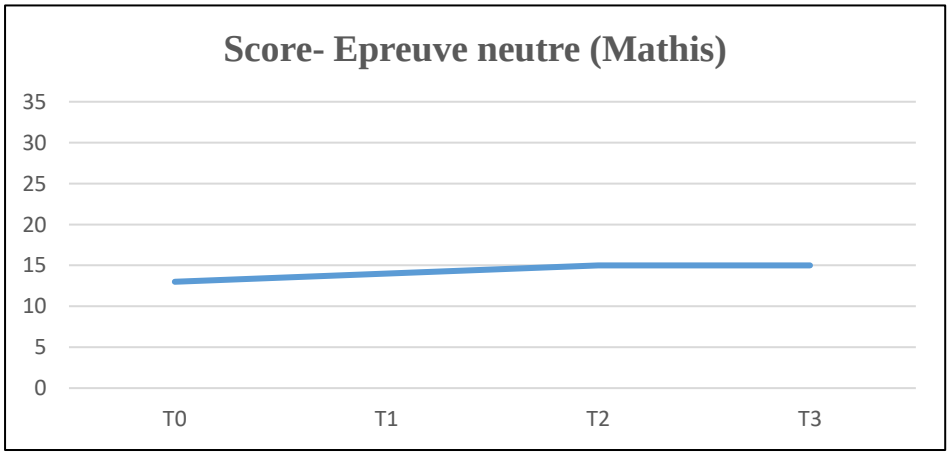


Figure 6 Score au test du positionnement structuré - Mathis

Le nombre de motifs réalisés passe de 13 à 14 pendant l'intervalle sans entraînement (T0 à T1) et de 14 à 15 entre T1 et T2, pour se maintenir ensuite à 15 jusqu'en T3. On note donc une

légère évolution entre T0 et T3 sans que cela ne soit pour autant interprétable comme significatif.

3.2 Cyrielle

3.2.1 Résultats répondant à l'hypothèse n°1 : estimation sur ligne numérique (PAE, temps, score)

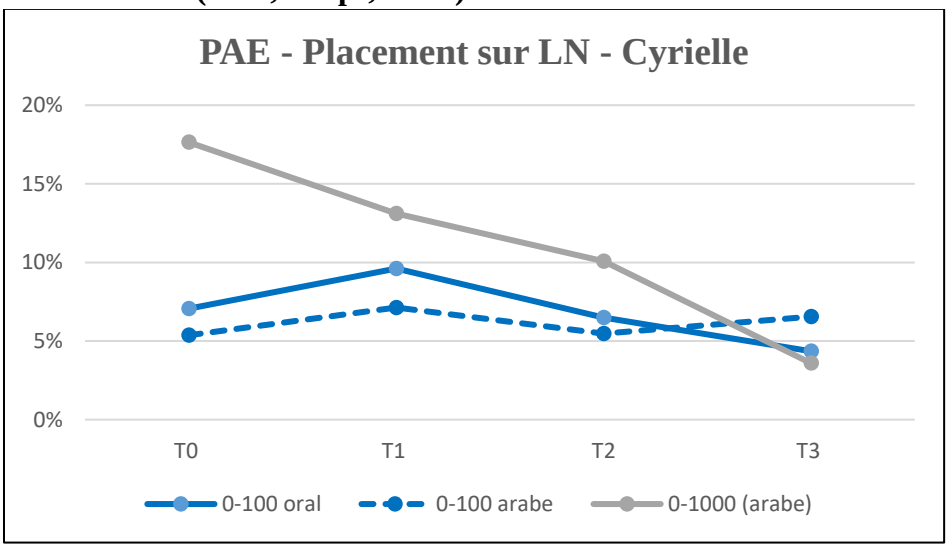


Figure 7 : Pourcentage absolu d'erreur au placement de nombres sur ligne - Cyrielle

La figure 7 illustre une diminution générale du pourcentage absolu d'erreur sur la ligne 0-100 en modalité orale et la ligne 0-1000. Quant à la ligne 0-100 en modalité arabe, on observe une tendance générale de stagnation, le PAE initial étant déjà assez bas.

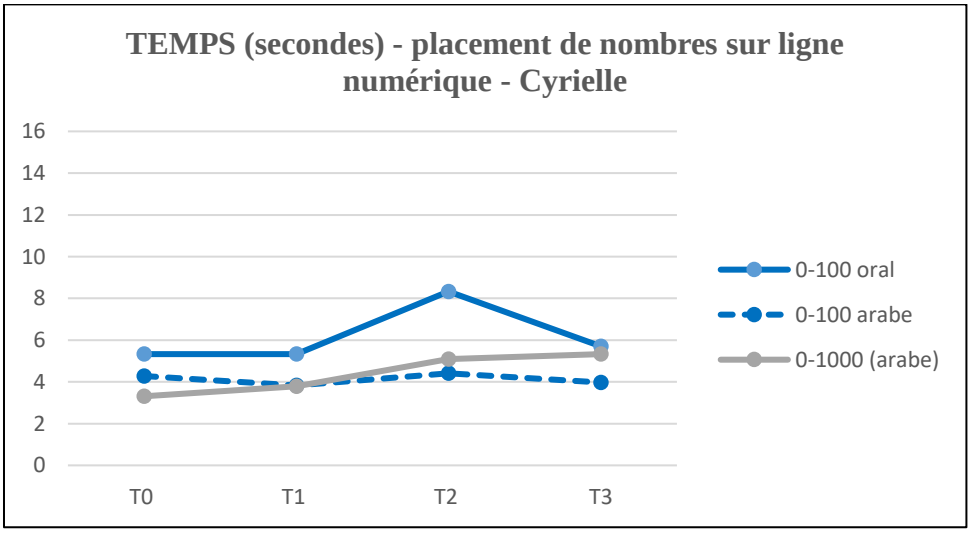


Figure 8 : Temps (en secondes) au placement de nombres sur ligne numérique - Cyrielle

La figure 8 montre, pour la ligne 0-1000, une augmentation constante de la variable temps.

Pour les lignes 0-100 (arabe et oral), les temps en T0 et en T3 varient de moins d'une seconde (modalité arabe : 5,33 sec T0 > 5,71 sec en T3 ; modalité orale : 4,28 sec en T0 > 3,97 sec en T3).

3.2.2 Résultats répondant à l'hypothèse n°2

3.2.2.1 Calcul sur ligne

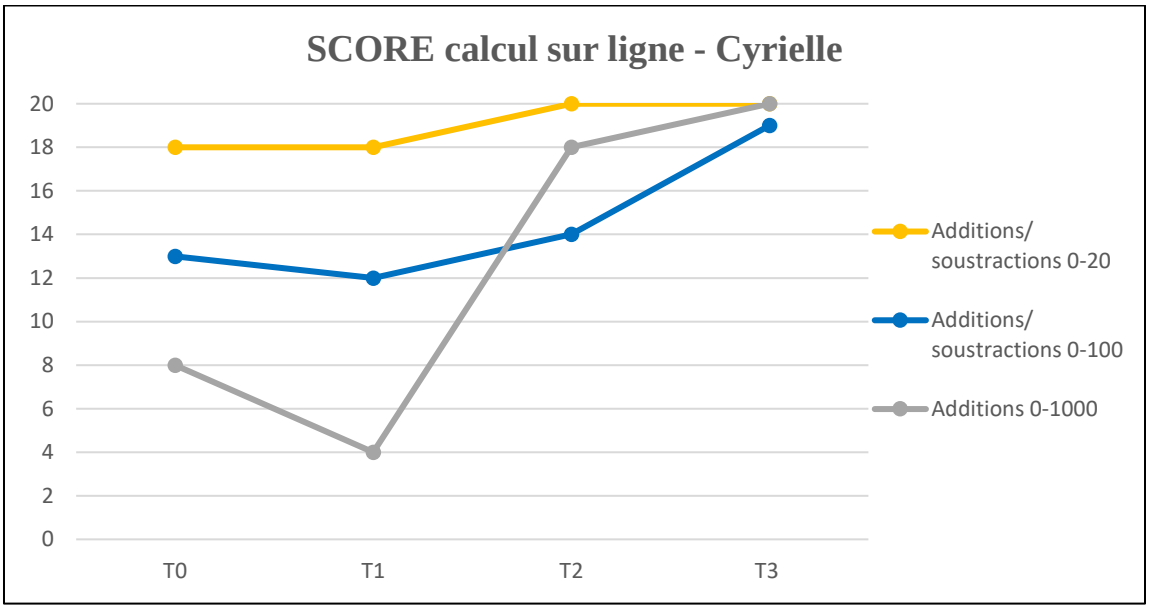


Figure 9 : Score au calcul sur ligne - Cyrielle

Nous observons, d'après la figure 9, une augmentation du score sur toutes les amplitudes entre T1 et T3. Le score d'additions/soustractions sur 0-20 plafonne dès T2 et se maintient en T3. C'est sur les additions sur 0-1000 que le score de Cyrielle évolue le plus en passant de 4/20 (T1) à 18/20 (T2).

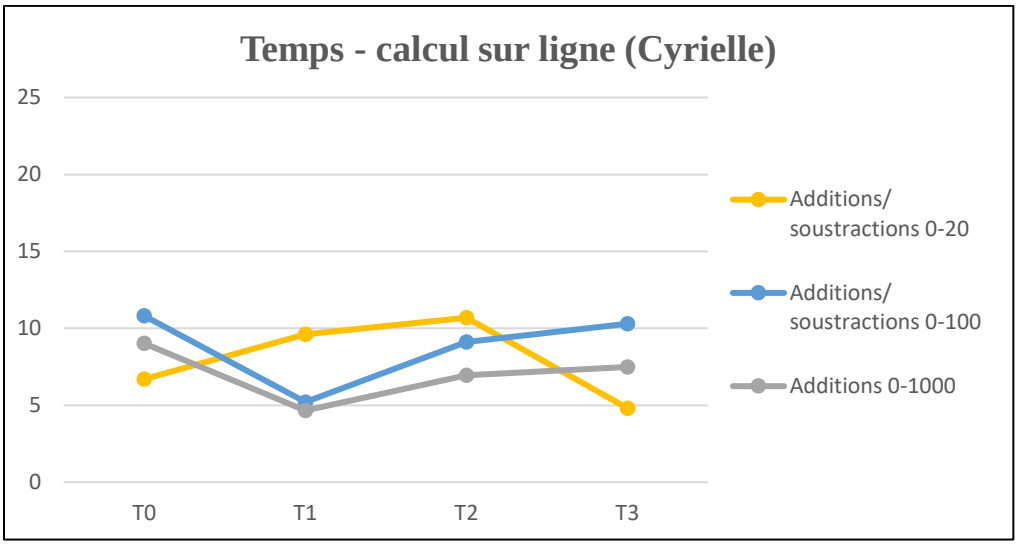


Figure 10 : temps au calcul sur ligne - Cyrielle

Pour le calcul sur 0-20, la figure 10 illustre une légère augmentation du temps entre T1 et T2 (1,08 secondes) puis une diminution de celui-ci entre T2 et T3 (10,69 sec > 4,81 sec). D'autre part, on relève une augmentation constante de la variable temps pour le calcul sur les lignes 0-100 et 0-1000 entre T1 et T3.

3.2.2.2 Calcul simple et calcul complexe

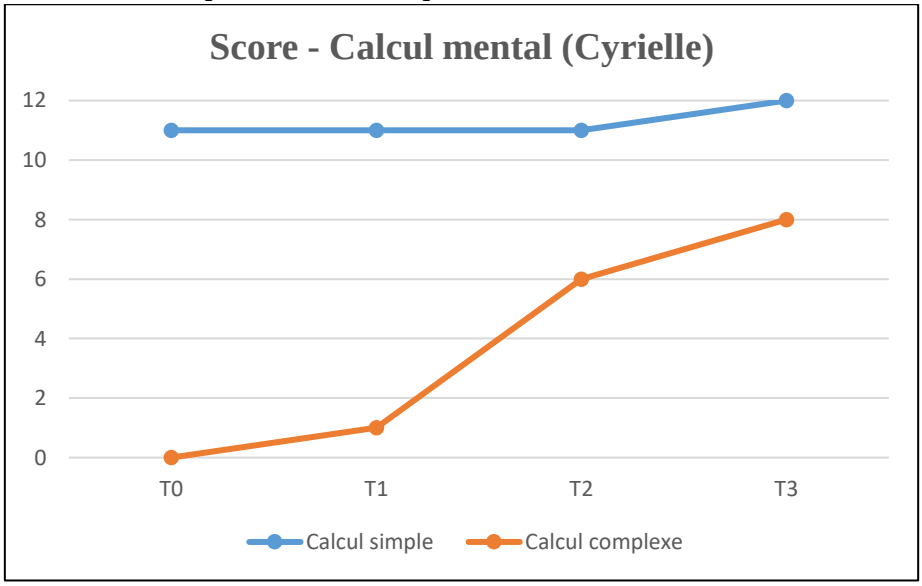


Figure 11 : score obtenu à l'épreuve de calcul mental - Cyrielle

D'après la figure 11, tout d'abord en ce qui concerne le *calcul simple*, le score est stable (11/12) entre T0 et T2 et atteint 12/12 en T3. Quant au *calcul complexe*, le score de Cyrielle passe de 1/12 à 6/12 entre T1 et T2 (premier entraînement) puis de 6/12 à 8/12 entre T2 et T3 (second entraînement). Ces résultats traduisent donc une amélioration progressive du calcul simple et complexe entre T0 et T3.

3.2.3 Résultats répondant à l'hypothèse n°3

D'après la figure 7, le PAE diminue entre T2 et T3 pour la ligne 0-100 oral (5,48 % > 4,35 %) et la ligne 0-1000 (10,08 % > 3,59 %). Cela signifie que la précision d'estimation de Cyrielle augmente entre ces deux temps de test pour les lignes énoncées.

3.2.4 Résultats répondant à l'hypothèse n°4

3.2.4.1 Calcul sur ligne

D'après la figure 9, le score de calcul sur ligne est plus élevé en T3 qu'en T2 pour les additions/soustractions sur 0-100 (14/20 en T2 ; 19/20 en T3) et les additions sur 0-1000 (18/20 en T2 ; 20/20 en T3). Pour les opérations sur 0-20, le score était déjà maximal en T2, et s'est maintenu à l'identique en T3.

3.2.4.2 Calcul mental

D'après la figure 11, le score en calcul simple passe de 11/12 à 12/12 entre T2 et T3 et celui de calcul complexe de 6/12 à 8/12 pour la même période. On relève donc une augmentation du calcul simple et complexe entre T2 et T3.

3.2.5 Résultats répondant à l'hypothèse 5

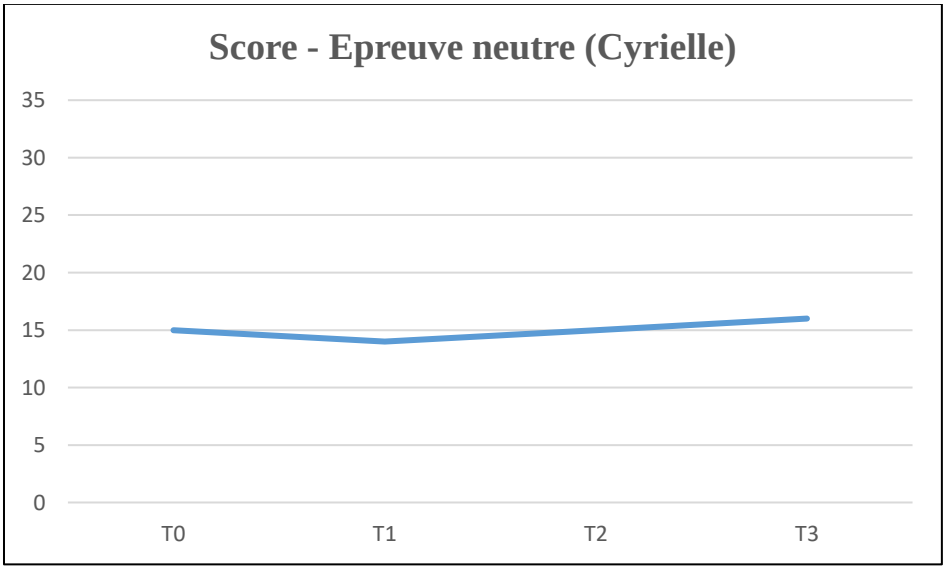


Figure 12 : score obtenu à l'épreuve neutre - Cyrielle

Le score de Cyrielle au test de positionnement structuré varie entre 14 et 16 (sur un total de 35) sur l'ensemble des temps de test et n'augmente pas de plus d'un point entre chaque test. La figure 12 illustre une régression entre T0 et T1 puis une augmentation réduite mais constante de T1 à T3.

DISCUSSION

Les données actuelles de la littérature dans le domaine de la cognition mathématique convergent pour dire que la précision de la ligne numérique est prédictive des aptitudes arithmétiques futures de l'enfant (Booth & Siegler, 2006 ; Siegler & Ramani, 2009 ; Berteletti et al., 2010). De ce fait, il semble justifié d'envisager des remédiations cliniques focalisées autour de la ligne numérique, celles-ci étant encore peu répandues. A partir de cet état des lieux, Marcon & Lafay (2020) ont mené un entraînement spécifique sur ligne numérique à partir du logiciel Décaligne (Lafay & Helloin, 2018), ciblant les compétences d'estimation de nombres et de calcul sur ligne numérique. Aussi, nous avons voulu mener à notre tour un entraînement ciblé de la ligne numérique sur ce même logiciel, en intégrant, de manière complémentaire, l'apport de stratégies explicites de placement sur ligne et de calcul mental. Nous avons donc posé la question suivante : est-ce qu'une intervention individuelle et intensive, centrée sur le placement de nombres et le calcul sur ligne numérique, et couplée à un apport de stratégies explicites verbales, peut avoir une incidence positive sur la précision des représentations numériques et les capacités en calcul additif et soustractif chez deux enfants TAM ?

Notre objectif principal est d' évaluer l'effet d'un protocole d'intervention de la ligne numérique sur la précision des représentations numériques chez deux enfants TAM. Nous analysons séparément les résultats en regard de chaque hypothèse, afin d'accéder à une interprétation la plus pertinente possible.

1. Interprétation des résultats

1.1 <u>Hypothèse 1</u> *: amélioration des estimations de nombres sur ligne numérique entre le premier pré-test et le dernier post-test, par le biais des variables suivantes : PAE (pourcentage d'erreur absolu) et temps de réponse.*

1.1.1 Mathis

L'hypothèse **n'est pas intégralement validée** en ce qui concerne la précision, mesurée par le pourcentage absolu d'erreur. Pour les lignes 0-10 (modalité orale et arabe), 0-20 (modalité arabe) et 0-100 (modalité arabe et orale), la diminution du PAE montre une meilleure précision d'estimation de nombres sur ligne numérique entre T0 et T3. Seul le PAE de la ligne 0-20 en modalité orale ne diminue pas par rapport à T0 mais décroît

seulement à partir de T1. Ceci peut être expliqué par un effet de fluctuation aléatoire entre T0 et T1.

Concernant la variable temps, **l'hypothèse est également partiellement validée**. On observe une diminution globale du temps de placement pour les lignes 0-10 et 0-20. Quant aux lignes 0-100, les résultats en temps sont très fluctuants donc peu interprétables. Nous pouvons voir une augmentation du temps sur la ligne 0-100 (oral) entre T1 et T2, ce qui pourrait traduire le fait que Mathis ait privilégié la précision par rapport à la rapidité, sur une ligne lui demandant plus de concentration, étant de plus grande amplitude que les deux autres. Néanmoins, le temps de placement sur cette même ligne diminue fortement entre T2 et T3, traduisant peut-être un début d'automatisation.

1.1.2 Cyrielle

L'hypothèse est **partiellement validée** concernant la précision, mesurée par le PAE. Celui-ci diminue pour les lignes 0-100 (oral) et plus fortement pour la ligne 0-1000, sur laquelle la précision de placement ne cesse d'augmenter tout au long des différents temps de test. Nous remarquons une stagnation du PAE sur la ligne 0-100 en modalité arabe, la précision de placement étant déjà assez élevée dès T0 sur cette ligne avec 5,37% d'erreur absolue, ce qui laisse peu de progression possible par la suite.

Par rapport au temps de placement, **l'hypothèse n'est pas validée**. Sur les lignes où Cyrielle a augmenté sa précision (0-100 en modalité orale et 0-1000), le temps de placement a également augmenté. Nous pourrions attribuer cette augmentation à l'application de stratégies qui ne sont pas encore bien automatisées. Quant au temps sur la ligne 0-100 en modalité arabe, celui-ci est également comparable au PAE, puisqu'il ne varie presque pas en T0 et T3.

1.2 <u>Hypothèse 2</u> : *progrès en calcul mental et également en calcul sur ligne (score et temps de réponse pour le calcul sur ligne)*

1.2.1 Mathis

L'hypothèse **n'est pas complètement validée** quant au score au calcul sur ligne. Le score de calcul sur 0-10 est le seul à augmenter entre les deux périodes d'entraînement (T1 à T2, T2 à T3). Cela peut traduire une automatisation progressive des compléments à 10. Le score de calcul sur 0-20, déjà élevé de base, se maintient à l'identique durant toute la durée de l'entraînement,

quant au score de calcul sur 0-100, il augmente surtout après le second entraînement (de T2 à T3), intégrant l'apport de stratégies de calcul.

Concernant la variable temps au calcul sur ligne, **l'hypothèse est validée**. Le temps de placement diminue entre T0 et T3 sur l'ensemble des lignes entraînées 0-10, 0-20 et 0-100, ce qui peut suggérer une automatisation des processus liés au placement sur ligne numérique. Les résultats concernant cette variable corroborent ceux de Marcon & Lafay (2020).

Concernant le score de calcul mental (calcul simple), **l'hypothèse est validée**. Le score de Mathis passe à 10/12 après le premier entraînement et se maintient au même niveau après la seconde intervention. Ces résultats corroborent les corrélations mises en évidence entre ligne numérique et calcul mental (Booth & Newton, 2012 ; Laski & Yu, 2014).

1.2.2 Cyrielle

L'hypothèse est **validée** concernant le score au calcul sur ligne. Cyrielle atteint même le score maximal sur deux lignes sur trois (additions/soustractions 0-20 et additions 0-1000). Cela est en accord avec les études démontrant une amélioration des performances en calcul grâce à un entraînement de la ligne numérique (Kucian et al., 2011 ; Link et al., 2013 ; Siegler & Ramani, 2008).

Pour le temps au *calcul sur ligne*, **l'hypothèse n'est que partiellement validée**. Le temps de placement ne diminue que pour le calcul sur la ligne 0-20, celle de plus faible amplitude, traduisant une automatisation des procédures de calcul et de placement sur cette ligne. Pour le calcul sur les lignes 0-100 et 0-1000, le temps augmente entre T1 et T3, ce qui peut traduire une focalisation plus importante de la part de Cyrielle sur sa précision et l'intégration des stratégies apportées, ces dernières n'étant pas encore automatisées.

Concernant le *calcul mental*, **l'hypothèse est validée** à la fois pour le calcul simple et le calcul complexe. Cyrielle atteint, pour le calcul simple, le score maximal à l'issue du dernier entraînement. Quant au calcul complexe, le score augmente entre chaque temps de test, ce qui traduit une mise en place progressive de stratégies efficientes.

1.3 <u>Hypothèse 3</u> : *amélioration d'estimation de nombres sur ligne numérique entre T2 et T3, via le PAE et le temps de réponse*

1.3.1 Mathis

L'hypothèse **n'est pas intégralement validée**. Le PAE diminue entre T2 et T3 sur les lignes 0-10 (orale et arabe) et sur la ligne 0-20 en modalité orale. Ceci peut être expliqué par le fait que Mathis a eu le temps d'automatiser et de s'approprier les stratégies apportées sur les magnitudes les plus réduites seulement. La diminution du pourcentage d'erreur sur ces lignes-ci confirme qu'une utilisation accrue de stratégies de placement peut améliorer la précision d'estimation sur ligne numérique (Peeters et al., 2016, Link et al., 2014).

L'hypothèse est **partiellement validée** pour la variable temps entre T2 et T3.

1.3.2 Cyrielle

L'hypothèse est **partiellement validée** : le PAE diminue entre T2 et T3 sur les lignes 0-100 (oral) et 0-1000. Comme nous l'avons dit précédemment, le PAE sur la ligne 0-100 arabe était déjà assez bas dès le départ donc l'apport de stratégies n'a pas été nécessaire pour l'amélioration de sa précision.

Concernant le temps de placement entre T2 et T3, l'hypothèse est validée pour les lignes 0-100 oral et arabe, mais pas pour la ligne 0-1000. En effet, Cyrielle a réussi à automatiser l'utilisation de ses stratégies sur une étendue de magnitudes allant jusqu'à 100, mais elle n'a pas eu le temps d'automatiser ses stratégies sur une plus grande échelle.

1.4 <u>Hypothèse 4</u> : *amélioration calcul sur ligne et mental entre T2 et T3*

1.4.1 Mathis

L'hypothèse quant au score en *calcul sur ligne* est **partiellement validée**. Mathis progresse en calcul sur les lignes 0-10 et 0-100. L'amélioration sur la ligne 0-10 est surement due à l'appropriation de stratégies telles que les doubles ou les compléments à 10. Quant à l'amélioration sur la ligne 0-100, celle-ci est peut-être davantage due à une meilleure représentation spatiale de la ligne 0-100.

L'hypothèse de temps est **partiellement validée** : une diminution est observée pour les lignes 0-20 et 0-100. Quant à la ligne 0-10, le temps de calcul était déjà assez bas en T2, donc la marge de progression était assez limitée.

Concernant le score au *calcul mental*, celui-ci se maintient à 10/12 entre T2 et T3.

1.4.2 Cyrielle

Concernant le score, **l'hypothèse est validée**. Score déjà maximal sur 0-20 et augmentation des scores sur les lignes 0-100 et 0-1000 entre T2 et T3.

Quant à la variable temps, l'hypothèse est validée sur 0-100 (arabe et oral) mais pas pour 0-1000. On peut formuler l'hypothèse que, la ligne 0-1000 étant de plus grande amplitude que 0-100, les stratégies acquises sur cette ligne sont plus longues à automatiser.

L'hypothèse posée pour le *calcul mental* est **validée**. Cyrielle atteint le score maximal en calcul simple entre T2 et T3 et en calcul complexe le score continue d'augmenter entre T2 et T3. Ces résultats sont en faveur d'une automatisation de stratégies efficaces de calcul.

1.5 <u>Hypothèse 5</u> : *pas d'augmentation sur le positionnement structuré entre chaque test*

1.5.1 Mathis

L'hypothèse est **partiellement validée** : le score augmente très légèrement (un pont) entre chaque temps sauf entre T2 et T3 où il se maintient à la même valeur. L'augmentation d'un point du score entre T0 et T1 et entre T1 et T2 peut être éventuellement expliquée par une meilleure compréhension de la consigne et donc une vitesse d'exécution plus importante par rapport à chaque passation précédente. Cette épreuve contrôle ayant été passée à des temps de test rapprochés, il était probable qu'il y ait des fluctuations minimes du score.

1.5.2 Cyrielle

L'hypothèse n'est là aussi que **partiellement validée**, le score augmentant d'un point entre T1 et T2 puis T2 et T3. Cette augmentation pourrait être également due aux mêmes raisons évoquées pour Mathis ci-dessus.

2. Limites de l'étude

Cette étude comporte toutefois plusieurs limites.

Tout d'abord, le design même de l'étude (étude de cas multiples) ne permettait pas de généraliser nos résultats, en raison de l'absence d'analyse statistique. Des études plus puissantes et à plus grande échelle permettraient d'appréhender la significativité des progrès.

De plus, il est à garder en tête que certaines fluctuations au niveau des résultats, notamment entre T0 et T1 (période sans entraînement) sont surement influencés par les prises en soin orthophoniques qui ont été poursuivies pour chacun en parallèle des entraînements. Il serait utile de prendre en compte ce biais pour des études avec de plus grandes cohortes.

Quant aux tests utilisés, il aurait été judicieux de proposer une épreuve neutre plus précisément interprétable, de manière à pouvoir juger avec fiabilité de la spécificité des entrainements proposés.

Par rapport à l'intervention clinique, il aurait pu être plus pertinent, en regard des recherches actuelles sur l'Evidence Based-Practise, de proposer un entraînement plus intensif, à raison de cinq fois par semaine au lieu de trois. A ce moment-là, la première partie de l'entraînement (sans stratégies), aurait pu être fait en autonomie à domicile. Pour cela, il eût été utile de disposer sur Decaligne d'une version manuellement paramétrable pour l'envoi des exercices par courriel aux patients.

CONCLUSIONS ET PERSPECTIVES

L'une des principales hypothèses explicatives du trouble des apprentissages mathématiques serait un trouble cognitif numérique, en particulier dû à un déficit d'estimation sur ligne numérique. La ligne numérique est un des vecteurs principaux de l'accès aux magnitudes et, de ce fait, aux performances arithmétiques ultérieures. A travers notre étude, nous avons donc cherché à déterminer si une intervention individuelle et intensive, centrée sur le placement de nombres et le calcul sur ligne numérique, et couplée à un apport de stratégies explicites verbales, pouvait avoir une incidence positive sur la précision des représentations numériques et les capacités en calcul additif et soustractif chez deux enfants TAM. Afin de répondre au mieux à cette interrogation, nous avons recruté deux enfants avec dyscalculie primaire. Nous leur avons fait passer deux entraînements successifs de placement de nombres et de calcul sur ligne avec le logiciel DéCaLigne, l'un sans apport de stratégies et le second avec.

Nos résultats ont mis en évidence que, globalement, les deux jeunes patients avaient amélioré leurs performances en estimation de nombres sur ligne numérique et en calcul additif et soustractif. Sur les tâches où une marge de progression était possible, la précision s'est améliorée entre les pré- et post-tests et le temps de réponse s'est davantage amélioré chez le patient le plus jeune. De plus, les apports de stratégies ont permis d'observer des progrès supplémentaires à ces mêmes épreuves, tant sur le score que sur le temps de réponse. Pour finir, les faibles fluctuations du score de l'épreuve contrôle traduisent que nos entraînements seraient spécifiques.

Pour de futures recherches, il serait intéressant d'investiguer à plus grande échelle l'apport de stratégies explicites pour le placement sur ligne numérique, afin d'objectiver s'il en ressort un bénéfice significatif pour des patients avec trouble des apprentissages mathématiques.

Notre étude corrobore, à son échelle, les corrélations entre ligne numérique et calcul, déjà mises en exergue dans plusieurs recherches antérieures et actuelles. De plus, ce travail offre de nouvelles pistes de remédiation dans le cadre de la pratique clinique orthophonique.

BIBLIOGRAPHIE

American Psychiatric Association, American Psychiatric Association, & DSM-5 Task Force. (2013). *Diagnostic and statistical manual of mental disorders : DSM-5*. American Psychiatric Association.

Ashcraft, M. H. (1982). The development of mental arithmetic : A chronometric approach. *Developmental Review*, *2*(3), 213-236. https://doi.org/10.1016/0273-2297(82)90012-0

Ashcraft, M. H. (1992). Cognitive arithmetic : A review of data and theory. *Cognition*, *44*(1-2), 75-106. https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90051-I

Ashcraft, M. H., & Fierman, B. A. (1982). Mental addition in third, fourth, and sixth graders. *Journal of Experimental Child Psychology*, *33*(2), 216-234. https://doi.org/10.1016/0022-0965(82)90017-0

Aulet, L. S., & Lourenco, S. F. (2018). The Developing Mental Number Line : Does Its Directionality Relate to 5- to 7-Year-Old Children's Mathematical Abilities? *Frontiers in Psychology*, *9*, 1142. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01142

Barrouillet, P., & Fayol, M. (1998). From algorithmic computing to direct retrieval : Evidence from number and alphabetic arithmetic in children and adults. *Memory & Cognition*, *26*(2), 355-368. https://doi.org/10.3758/BF03201146

Barrouillet, P., Fayol, M., & Lathulière, E. (1997). Selecting between Competitors in Multiplication Tasks : An Explanation of the Errors Produced by Adolescents with Learning Difficulties. *International Journal of Behavioral Development*, *21*(2), 253-275. https://doi.org/10.1080/016502597384857

Barrouillet, P., & Lépine, R. (2005). Working memory and children's use of retrieval to solve addition problems. *Journal of Experimental Child Psychology*, *91*(3), 183-204. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2005.03.002

Barth, H., Slusser, E., Cohen, D., & Paladino, A. (2011). A sense of proportion : Commentary on Opfer, Siegler and Young. *Developmental Science*, *14*(5), 1205-1206. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2011.01081.x

Benavides-Varela, S., Zandonella Callegher, C., Fagiolini, B., Leo, I., Altoè, G., & Lucangeli, D. (2020). Effectiveness of digital-based interventions for children with mathematical learning difficulties : A meta-analysis. *Computers & Education*, *157*, 103953. https://doi.org/10.1016/j.compedu.2020.103953

Berch, D. B. (2005). Making Sense of Number Sense : Implications for Children With Mathematical Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, *38*(4), 333-339. https://doi.org/10.1177/00222194050380040901

Booth, J. L., & Siegler, R. S. (2006). Developmental and individual differences in pure numerical estimation. *Developmental Psychology*, *42*(1), 189-201. https://doi.org/10.1037/0012-1649.41.6.189

Bosson, M., Hessels, M., & Hessels-Schlatter, C. (2009). Le développement de stratégies cognitives et métacognitives chez des élèves en difficulté d'apprentissage. *Développements*, *1*, 14-20. https://doi.org/10.3917/devel.001.0014

Büchel, F. (2007). *L'intervention cognitive en éducation spéciale. Deux programmes métacognitifs*.

Butterworth, B. (2005). The development of arithmetical abilities. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, *46*(1), 3-18. https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2004.00374.x

Carr, M., & Jessup, D. L. (1995). Cognitive and metacognitive predictors of mathematics strategy use. *Learning and Individual Differences*, *7*(3), 235-247. https://doi.org/10.1016/1041-6080(95)90012-8

Cohen, D. J., & Blanc-Goldhammer, D. (2011). Numerical bias in bounded and unbounded number line tasks. *Psychonomic Bulletin & Review*, *18*(2), 331-338. https://doi.org/10.3758/s13423-011-0059-z

De Visscher, A., & Noël, M.-P. (2014). Arithmetic facts storage deficit : The hypersensitivity-to-interference in memory hypothesis. *Developmental Science*, *17*(3), 434-442. https://doi.org/10.1111/desc.12135

De Visscher, A., Szmalec, A., Van Der Linden, L., & Noël, M.-P. (2015). Serial-order learning impairment and hypersensitivity-to-interference in dyscalculia. *Cognition*, *144*, 38-48. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2015.07.007

De Weerdt, F., Desoete, A., & Roeyers, H. (2013). Working Memory in Children With Reading Disabilities and/or Mathematical Disabilities. *Journal of Learning Disabilities*, *46*(5), 461-472. https://doi.org/10.1177/0022219412455238

Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, *44*(1-2), 1-42. https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90049-N

Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and number magnitude. *Journal of Experimental Psychology: General*, *122*(3), 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

Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). THREE PARIETAL CIRCUITS FOR NUMBER PROCESSING. *Cognitive Neuropsychology*, *20*(3-6), 487-506. https://doi.org/10.1080/02643290244000239

DehaeneCohen_TripleCodeModelNumberProcessing_MathCognition1995.pdf. (s. d.). Consulté 16 février 2021, à l'adresse http://www.unicog.org/publications/DehaeneCohen_TripleCodeModelNumberProcessing_MathCognition1995.pdf

Dignath, C., Buettner, G., & Langfeldt, H.-P. (2008). How can primary school students learn self-regulated learning strategies most effectively? *Educational Research Review*, *3*(2), 101-129. https://doi.org/10.1016/j.edurev.2008.02.003

Dowker, A. (2005). Early Identification and Intervention for Students With Mathematics Difficulties. *Journal of Learning Disabilities*, *38*(4), 324-332. https://doi.org/10.1177/00222194050380040801

Fazio, L. K., Bailey, D. H., Thompson, C. A., & Siegler, R. S. (2014). Relations of different types of numerical magnitude representations to each other and to mathematics achievement. *Journal of Experimental Child Psychology*, *123*, 53-72. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2014.01.013

Fischer, U., Moeller, K., Bientzle, M., Cress, U., & Nuerk, H.-C. (2011). Sensori-motor spatial training of number magnitude representation. *Psychonomic Bulletin & Review*, *18*(1), 177-183. https://doi.org/10.3758/s13423-010-0031-3

Gauthier, C. (2013). *Enseignement explicite et reussite des eleves : La gestion des apprentissages*. De Boeck Universite.

Geary, D. C. (1993). Mathematical disabilities : Cognitive, neuropsychological, and genetic components. *Psychological Bulletin*, *114*(2), 345-362. https://doi.org/10.1037/0033-2909.114.2.345

Geary, D. C., Hoard, M. K., Nugent, L., & Byrd-Craven, J. (2008). Development of Number Line Representations in Children With Mathematical Learning Disability. *Developmental Neuropsychology*, *33*(3), 277-299. https://doi.org/10.1080/87565640801982361

Geary, D. C., Nicholas, A., Li, Y., & Sun, J. (2017). Developmental change in the influence of domain-general abilities and domain-specific knowledge on mathematics achievement : An eight-year longitudinal study. *Journal of Educational Psychology*, *109*(5), 680-693. https://doi.org/10.1037/edu0000159

Gevers, W., Verguts, T., Reynvoet, B., Caessens, B., & Fias, W. (2006). Numbers and space : A computational model of the SNARC effect. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, *32*(1), 32-44. https://doi.org/10.1037/0096-1523.32.1.32

Gonsalves, N., & Krawec, J. (2014). Using Number Lines to Solve Math Word Problems : A Strategy for Students with Learning Disabilities: NUMBER LINES. *Learning Disabilities Research & Practice*, *29*(4), 160-170. https://doi.org/10.1111/ldrp.12042

Gunderson, E. A., Ramirez, G., Beilock, S. L., & Levine, S. C. (2012). The relation between spatial skill and early number knowledge : The role of the linear number line. *Developmental Psychology*, *48*(5), 1229-1241. https://doi.org/10.1037/a0027433

Halberda, J., Mazzocco, M. M. M., & Feigenson, L. (2008). Individual differences in non-verbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature*, *455*(7213), 665-668. https://doi.org/10.1038/nature07246

Heremans, M. (s. d.). *MathEval*.

Hessels, M. G. P., Hessels-Schlatter, C., Bosson, M. S., & Balli, Y. (2009). Metacognitive Teaching in a Special Education Class. *Journal of Cognitive Education and Psychology*, *8*(2), 182-201. https://doi.org/10.1891/1945-8959.8.2.182

Ito, Y., & Hatta, T. (2004). Spatial structure of quantitative representation of numbers : Evidence from the SNARC effect. *Memory & Cognition*, *32*(4), 662-673. https://doi.org/10.3758/BF03195857

Jung, S., Roesch, S., Klein, E., Dackermann, T., Heller, J., & Moeller, K. (2020). The strategy matters : Bounded and unbounded number line estimation in secondary school children. *Cognitive Development*, *53*, 100839. https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2019.100839

Käser, T., Baschera, G.-M., Kohn, J., Kucian, K., Richtmann, V., Grond, U., Gross, M., & von Aster, M. (2013). Design and evaluation of the computer-based training program Calcularis for enhancing numerical cognition. *Frontiers in Psychology*, *4*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00489

Kohn, J., Rauscher, L., Kucian, K., Käser, T., Wyschkon, A., Esser, G., & von Aster, M. (2020). Efficacy of a Computer-Based Learning Program in Children With Developmental Dyscalculia. What Influences Individual Responsiveness? *Frontiers in Psychology*, *11*, 1115. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01115

Kucian, K., Grond, U., Rotzer, S., Henzi, B., Schönmann, C., Plangger, F., Gälli, M., Martin, E., & von Aster, M. (2011). Mental number line training in children with developmental dyscalculia. *NeuroImage*, *57*(3), 782-795. https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2011.01.070

Kulik, C.-L. C., & Kulik, J. A. (1991). Effectiveness of computer-based instruction : An updated analysis. *Computers in Human Behavior*, *7*(1-2), 75-94. https://doi.org/10.1016/0747-5632(91)90030-5

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

Lafay, Anne, Saint-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (2015). Revue narrative de littérature relative aux troubles cognitifs numériques impliqués dans la dyscalculie développementale : Déficit du sens du nombre ou déficit de l'accès aux représentations numériques mentales? *Canadian Psychology/Psychologie Canadienne*, *56*(1), 96-107. https://doi.org/10.1037/a0037264

Lafay, Anne, St-Pierre, M.-C., & Macoir, J. (2017). The Mental Number Line in Dyscalculia : Impaired Number Sense or Access From Symbolic Numbers? *Journal of Learning Disabilities*, *50*(6), 672-683. https://doi.org/10.1177/0022219416640783

Landerl, K., Fussenegger, B., Moll, K., & Willburger, E. (2009). Dyslexia and dyscalculia : Two learning disorders with different cognitive profiles. *Journal of Experimental Child Psychology*, *103*(3), 309-324. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.03.006

Laski, E. V., & Yu, Q. (2014). Number line estimation and mental addition : Examining the potential roles of language and education. *Journal of Experimental Child Psychology*, *117*, 29-44. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.08.007

LeFevre, J.-A., Jimenez Lira, C., Sowinski, C., Cankaya, O., Kamawar, D., & Skwarchuk, S.-L. (2013). Charting the role of the number line in mathematical development. *Frontiers in Psychology*, *4*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00641

LeFevre, J.-A., Sadesky, G. S., & Bisanz, J. (1996). Selection of procedures in mental addition : Reassessing the problem size effect in adults. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *22*(1), 216-230. https://doi.org/10.1037/0278-7393.22.1.216

Lemaire, P., Barrett, S. E., Fayol, M., & Abdi, H. (1994). Automatic Activation of Addition and Multiplication Facts in Elementary School Children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *57*(2), 224-258. https://doi.org/10.1006/jecp.1994.1011

Lenhard, A., Lenhard, W., Schug, M., & Kowalski, A. (2011). Computerbasierte Mathematikförderung mit den „Rechenspielen mit Elfe und Mathis I" : Vorstellung und Evaluation eines Computerprogramms für Erst- bis Drittklässler. *Zeitschrift für Entwicklungspsychologie und Pädagogische Psychologie*, *43*(2), 79-88. https://doi.org/10.1026/0049-8637/a000037

Link, T., Moeller, K., Huber, S., Fischer, U., & Nuerk, H.-C. (2013). Walk the number line – An embodied training of numerical concepts. *Trends in Neuroscience and Education*, *2*(2), 74-84. https://doi.org/10.1016/j.tine.2013.06.005

Marcon, L., & Lafay, A. (2019). *Trouble des apprentissages en mathématiques et ligne numérique : Revue systématique de la littérature*.

Marcon, L., & Lafay, A. (2020). *Intervention mathématique à l'aide du logiciel informatique DéCaLigne ciblant la ligne numérique et le calcul chez les enfants ayant un trouble des apprentissages en mathématiques. 128*, 27-52.

Meyer, M. L., Salimpoor, V. N., Wu, S. S., Geary, D. C., & Menon, V. (2010). Differential contribution of specific working memory components to mathematics achievement in 2nd and 3rd graders. *Learning and Individual Differences*, *20*(2), 101-109. https://doi.org/10.1016/j.lindif.2009.08.004

Moeller, K., Fischer, U., Nuerk, H.-C., & Cress, U. (2015). Computers in mathematics education – Training the mental number line. *Computers in Human Behavior*, *48*, 597-607. https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.01.048

Morsanyi, K., Devine, A., Nobes, A., & Szűcs, D. (2013). The link between logic, mathematics and imagination : Evidence from children with developmental dyscalculia and mathematically gifted children. *Developmental Science*, *16*(4), 542-553. https://doi.org/10.1111/desc.12048

Moyer, R. S., & Landauer, T. K. (1967). Time required for Judgements of Numerical Inequality. *Nature*, *215*(5109), 1519-1520. https://doi.org/10.1038/2151519a0

Muldoon, K., Towse, J., Simms, V., Perra, O., & Menzies, V. (2013). A longitudinal analysis of estimation, counting skills, and mathematical ability across the first school year. *Developmental Psychology*, *49*(2), 250-257. https://doi.org/10.1037/a0028240

Namkung, J. M., & Fuchs, L. S. (2012). Early Numerical Competencies of Students with Different Forms of Mathematics Difficulty. *Learning disabilities research & practice : a publication of the Division for Learning Disabilities, Council for Exceptional Children*, *27*(1), 2-11. https://doi.org/10.1111/j.1540-5826.2011.00345.x

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

Östergren, R., & Träff, U. (2013). Early number knowledge and cognitive ability affect early arithmetic ability. *Journal of Experimental Child Psychology*, *115*(3), 405-421. https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.03.007

Peeters, D., Degrande, T., Ebersbach, M., Verschaffel, L., & Luwel, K. (2016). Children's use of number line estimation strategies. *European Journal of Psychology of Education*, *31*(2), 117-134. https://doi.org/10.1007/s10212-015-0251-z

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

Räsänen, P., Laurillard, D., Käser, T., & von Aster, M. (2019). Perspectives to Technology-Enhanced Learning and Teaching in Mathematical Learning Difficulties. In A. Fritz, V. G. Haase, & P. Räsänen (Éds.), *International Handbook of Mathematical Learning Difficulties* (p. 733-754). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-97148-3_42

Rauscher, L., Kohn, J., Käser, T., Mayer, V., Kucian, K., McCaskey, U., Esser, G., & von Aster, M. (2016). Evaluation of a Computer-Based Training Program for Enhancing Arithmetic Skills and Spatial Number Representation in Primary School Children. *Frontiers in Psychology*, *7*. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00913

Reinert, R. M., Hartmann, M., Huber, S., & Moeller, K. (2019). Unbounded number line estimation as a measure of numerical estimation. *PLOS ONE*, *14*(3), e0213102. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0213102

Restle, F. (1970). Speed of adding and comparing numbers. *Journal of Experimental Psychology*, *83*(2, Pt.1), 274-278. https://doi.org/10.1037/h0028573

Salminen, J., Koponen, T., Räsänen, P., & Aro, M. (2015). Preventive Support for Kindergarteners Most At-Risk for Mathematics Difficulties : Computer-Assisted Intervention. *Mathematical Thinking and Learning*, *17*(4), 273-295. https://doi.org/10.1080/10986065.2015.1083837

Schneider, M., Merz, S., Stricker, J., De Smedt, B., Torbeyns, J., Verschaffel, L., & Luwel, K. (2018). Associations of Number Line Estimation With Mathematical Competence : A Meta-analysis. *Child Development*, *89*(5), 1467-1484. https://doi.org/10.1111/cdev.13068

Schneider, M., Thompson, C., & Rittle-Johnson, B. (2018). *Associations of magnitude comparison and number line estimation with mathematical competence : A comparative review* (p. 100-119).

Schoppek, W., & Tulis, M. (2010). Enhancing Arithmetic and Word-Problem Solving Skills Efficiently by Individualized Computer-Assisted Practice. *The Journal of Educational Research*, *103*(4), 239-252. https://doi.org/10.1080/00220670903382962

Sella, F., Berteletti, I., Lucangeli, D., & Zorzi, M. (2017). Preschool children use space, rather than counting, to infer the numerical magnitude of digits : Evidence for a spatial mapping principle. *Cognition*, *158*, 56-67. https://doi.org/10.1016/j.cognition.2016.10.010

Sella, F., Sader, E., Lolliot, S., & Cohen Kadosh, R. (2016). Basic and advanced numerical performances relate to mathematical expertise but are fully mediated by visuospatial skills. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *42*(9), 1458-1472. https://doi.org/10.1037/xlm0000249

Seyler, D. J., Kirk, E. P., & Ashcraft, M. H. (2003). Elementary subtraction. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *29*(6), 1339-1352. https://doi.org/10.1037/0278-7393.29.6.1339

Siegler, Robert S. (2016). Magnitude knowledge : The common core of numerical development. *Developmental Science*, *19*(3), 341-361. https://doi.org/10.1111/desc.12395

Siegler, Robert S., & Opfer, J. E. (2003). The Development of Numerical Estimation : Evidence for Multiple Representations of Numerical Quantity. *Psychological Science*, *14*(3), 237-250. https://doi.org/10.1111/1467-9280.02438

Siegler, Robert S., & Ramani, G. B. (2008). Playing linear numerical board games promotes low-income children's numerical development. *Developmental Science*, *11*(5), 655-661. https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00714.x

Siegler, Robert S., & Ramani, G. B. (2009). Playing linear number board games—But not circular ones—Improves low-income preschoolers' numerical understanding. *Journal of Educational Psychology*, *101*(3), 545-560. https://doi.org/10.1037/a0014239

Siegler, R.S., & Crowley, K. (1994). Constraints On Learning in Nonprivileged Domains. *Cognitive Psychology*, *27*(2), 194-226. https://doi.org/10.1006/cogp.1994.1016

Slusser, E. B., Santiago, R. T., & Barth, H. C. (2013). Developmental change in numerical estimation. *Journal of Experimental Psychology: General*, *142*(1), 193-208. https://doi.org/10.1037/a0028560

Stanescu-Cosson, R., Pinel, P., van de Moortele, P.-F., Le Bihan, D., Cohen, L., & Dehaene, S. (2000). Understanding dissociations in dyscalculia. *Brain*, *123*(11), 2240-2255. https://doi.org/10.1093/brain/123.11.2240

Thevenot, C., & Barrouillet, P. (2006). Encoding numbers : Behavioral evidence for processing-specific representations. *Memory & Cognition*, *34*(4), 938-948. https://doi.org/10.3758/BF03193439

Torbeyns, J., Schneider, M., Xin, Z., & Siegler, R. S. (2015). Bridging the gap : Fraction understanding is central to mathematics achievement in students from three different continents. *Learning and Instruction*, *37*, 5-13. https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2014.03.002

van der Weijden, F. A., Kamphorst, E., Willemsen, R. H., Kroesbergen, E. H., & van Hoogmoed, A. H. (2018). Strategy use on bounded and unbounded number lines in typically developing

adults and adults with dyscalculia : An eye-tracking study. *Journal of Numerical Cognition*, *4*(2), 337-359. https://doi.org/10.5964/jnc.v4i2.115

van't Noordende, J. E., van Hoogmoed, A. H., Schot, W. D., & Kroesbergen, E. H. (2016). Number line estimation strategies in children with mathematical learning difficulties measured by eye tracking. *Psychological Research*, *80*(3), 368-378. https://doi.org/10.1007/s00426-015-0736-z

von Aster, M., & Dellatolas, G. (2005). *Zareki-R : Batterie pour l'évaluation du traitement des nombres et du calcul chez l'enfant*.

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

White, S. L., & Szucs, D. (2012). Representational change and strategy use in children's number line estimation during the first years of primary school. *Behavioral and Brain Functions*, *8*(1), 1. https://doi.org/10.1186/1744-9081-8-1

Whyte, J. C., & Bull, R. (2008). Number games, magnitude representation, and basic number skills in preschoolers. *Developmental Psychology*, *44*(2), 588-596. https://doi.org/10.1037/0012-1649.44.2.588

Widaman, K. F., Little, T. D., Geary, D. C., & Cormier, P. (1992). Individual differences in the development of skill in mental addition : Internal and external validation of chronometric models. *Learning and Individual Differences*, *4*(3), 167-213. https://doi.org/10.1016/1041-6080(92)90002-V

Wilson, A. J., Dehaene, S., Pinel, P., Revkin, S. K., Cohen, L., & Cohen, D. (2006). An open trial assessment of « The Number Race », an adaptive computer game for remediation of dyscalculia. *Behavioral and Brain Functions*, *2*(1), 19. https://doi.org/10.1186/1744-9081-2-19

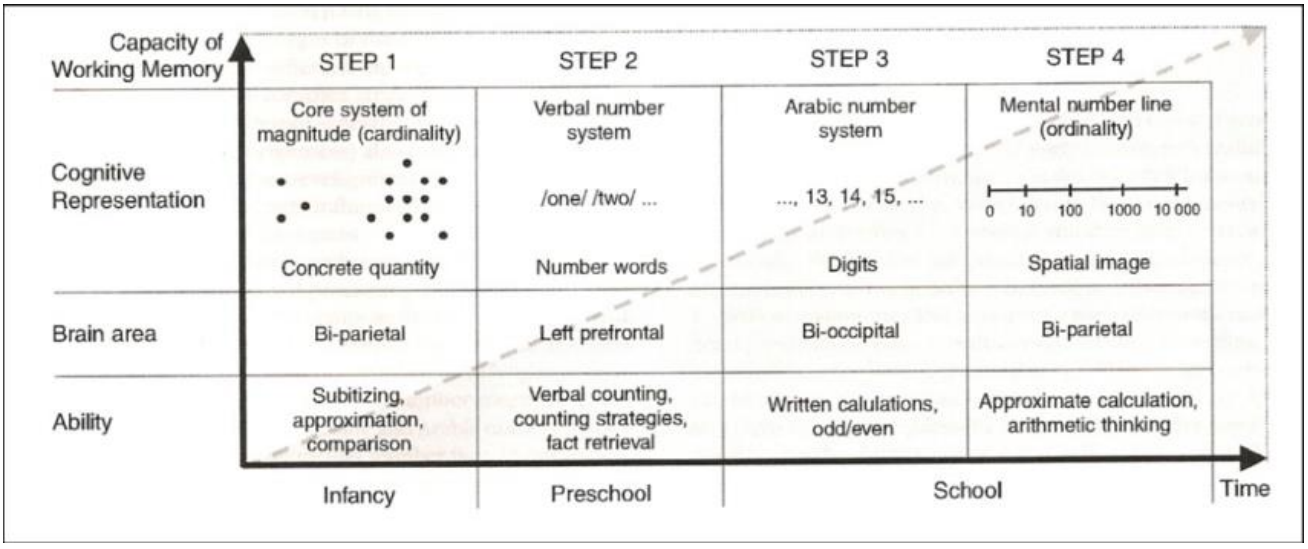
Yuan, L., Prather, R., Mix, K. S., & Smith, L. B. (2020). Number Representations Drive Number-Line Estimates. *Child Development*, *91*(4), e952-e967. https://doi.org/10.1111/cdev.13333

Zhang, D., Stecker, P., & Beqiri, K. (2017). Strategies Students With and Without Mathematics Disabilities Use When Estimating Fractions on Number Lines. *Learning Disability Quarterly*, *40*(4), 225-236. https://doi.org/10.1177/0731948717704966

Zheng, X., Flynn, L. J., & Swanson, H. L. (2013). Experimental Intervention Studies on Word Problem Solving and Math Disabilities : A Selective Analysis of the Literature. *Learning Disability Quarterly*, *36*(2), 97-111. https://doi.org/10.1177/0731948712444277

Zhu, M., Cai, D., & Leung, A. W. S. (2017). Number Line Estimation Predicts Mathematical Skills : Difference in Grades 2 and 4. *Frontiers in Psychology*, *8*, 1576. https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01576

ANNEXES



Annexe 1 : Modèle développemental de la cognition numérique à quatre paliers (Von Aster et Shalev, 2007)

	MATHIS				CYRIELLE			
	T0	T1	T2	T3	T0	T1	T2	T3
EXAMATH								
Comparaison analogique	X			X	X			X
Comparaison arabe/analogique	X			X	X			X
Comparaison oral/analogique	X			X	X			X
Fluence arithmétique	X			X	X			X
Numeracy Screener	X			X	X			X
DECALIGNE lignes de base et « opérations »								
Ligne 0-10	X	X	X	X				
Ligne 0-20	X	X	X	X				
Ligne 0-100	X	X	X	X	X	X	X	X
Ligne 0-1000					X	X	X	X
Calcul simple	X	X	X	X	X	X	X	X
Calcul complexe					X	X	X	X
Calcul sur ligne 0-10	X	X	X	X				
Calcul sur ligne 0-20	X	X	X	X	X	X	X	X
Calcul sur ligne 0-100	X	X	X	X	X	X	X	X
Calcul sur ligne 0-1000 (additions)					X	X	X	X
Test du positionnement structuré	X	X	X	X	X	X	X	X

Annexe 2 : Détail des épreuves administrées en fonction des patients et des temps de test T

OPERATIONS SUR LIGNE - CYRIELLE				
SCORE	T0	T1	T2	T3
Additions/ soustractions 0-20	18/20	18/20	20/20	20/20
Additions/ soustractions 0-100	13/20	12/20	14/20	19/20
Additions 0-1000	4/10	2/10	9/10	10/10
TEMPS	T0	T1	T2	T3
Additions/ soustractions 0-20	6,70	9,61	10,69	4,81
Additions/ soustractions 0-100	10,81	5,21	9,11	10,29
Additions 0-1000	9,02	4,66	6,95	7,49
PEA	T0	T1	T2	T3
Additions/ soustractions 0-20	4,13 %	4,76 %	1,83 %	1,90 %
Additions/ soustractions 0-100	11,41 %	19,48 %	9,8 %	6,58 %
Additions 0-1000	19,58 %	33 %	7,69 %	3,84 %

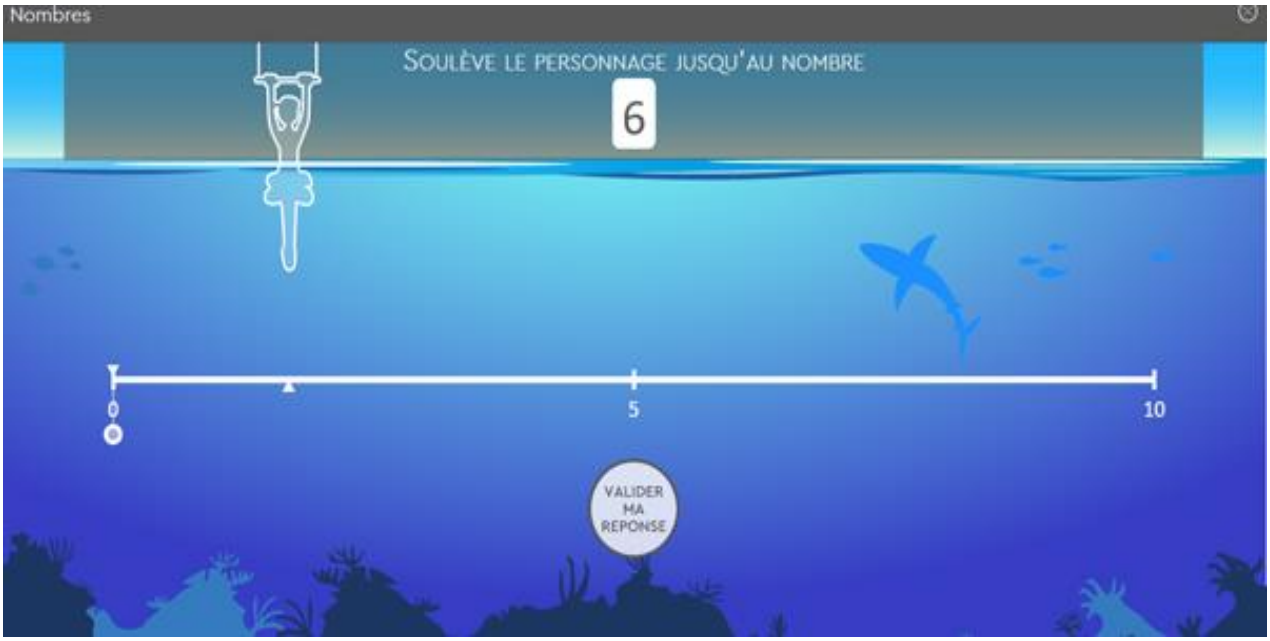
OPERATIONS SUR LIGNE - MATHIS				
SCORE	T0	T1	T2	T3
Additions/ soustractions 0-10	16/20	15/20	17/20	18/20
Additions/ soustractions 0-20	17/20	16/20	16/20	16/20
Additions 0-100	15/20	15/20	14/20	16/20
TEMPS	T0	T1	T2	T3
Additions/ soustractions 0-10	9,56	9,48	5,68	5,85
Additions/ soustractions 0-20	8,23	11,07	8,55	6,90
Additions/soustractions 0-100	20,14	12,38	8,92	4,33
PEA	T0	T1	T2	T3
Additions/ soustractions 0-10	8,59 %	7,55 %	6,01 %	4,82 %
Additions/ soustractions 0-20	3,85 %	4,20 %	9,05 %	6,10 %
Additions 0-100	6,67 %	7,65 %	9,11 %	6,21%

Annexe 3 : score, temps et PEA (pourcentage absolu d'erreur) - opérations sur ligne numérique – Cyrielle et Mathis

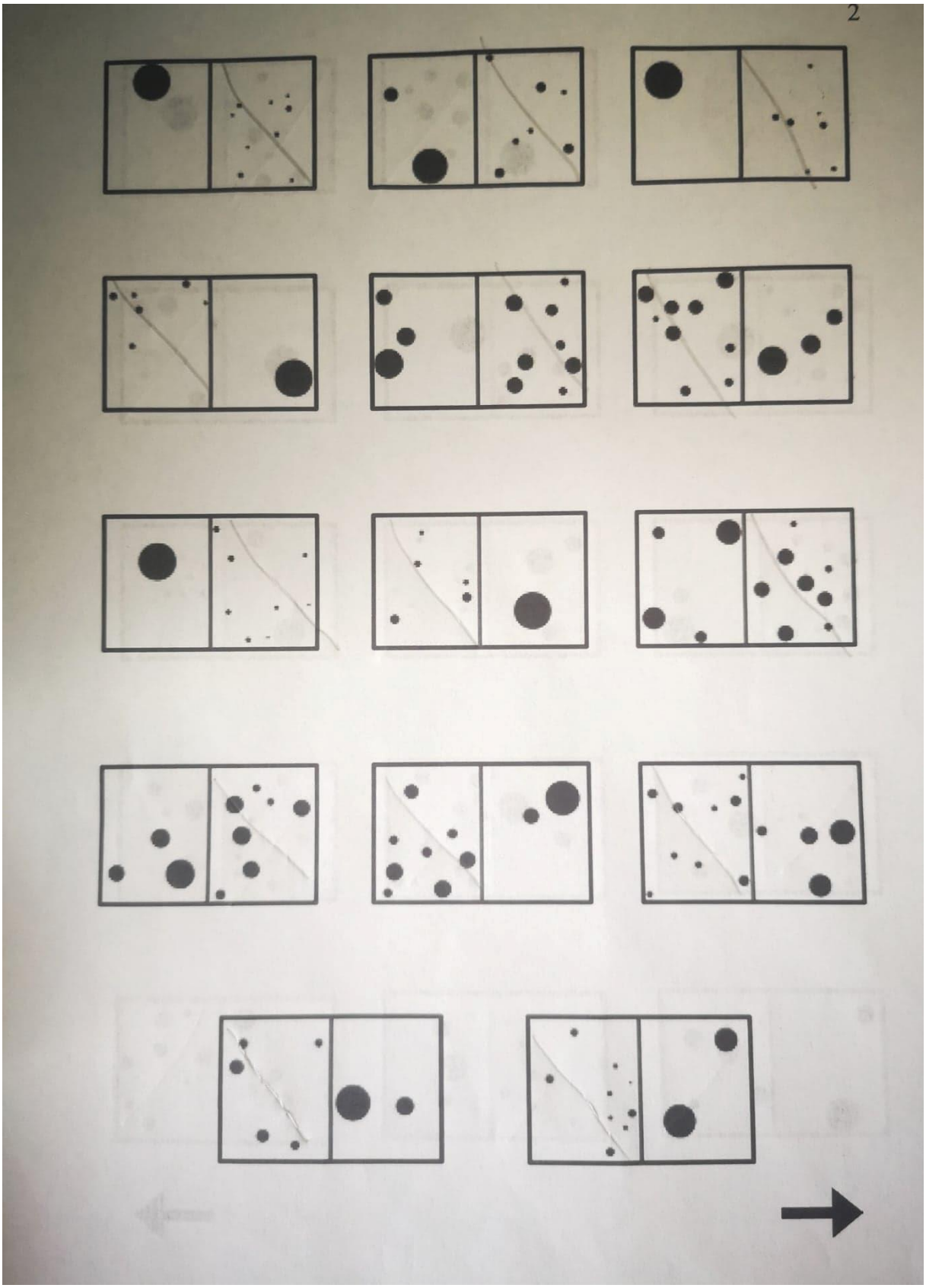
SCORES BRUTS PRE TEST (T0) VS POST TEST (T3) : MATHIS		
NUMERACY SCREENER		
NON SYMBOLIQUE	34/56	40/56
SYMBOLIQUE	22/56	40/56
EXAMATH		
Comparaison analogique	**Score** : 13/24 - **NB E.T** : -2.33 - **Percentile** : P5 - **Moyenne** : 18.92	**Score** : 12/24 - **NB E.T** : -2.73 - **Percentile** : P5 - **Moyenne** : 18.92
Arabe/analogique	**Score** : 27/48 - **NB E.T** : -3.26 - **Percentile** : P5 - **Moyenne** : 40.07	**Score** : 30/48 - **NB E.T** : -2.51 - **Percentile** : P5 - **Moyenne** : 40.07
Oral/analogique	**Score** : 25/48 - **NB E.T** : -4.93 - **Percentile** : P5 - **Moyenne** : 41.28	**Score** : 39/48 - **NB E.T** : -0.69 - **Percentile** : Med. - **Moyenne** : 41.28
Fluence arithmétique	**Score** : 12/40 - **NB E.T.** : -2.06 - **Percentile** : P5 - **Moyenne** : 18.36	**Score** : 15/40 - **NB E.T.** : -1.09 - **Percentile** : Q1 - **Moyenne** : 18.36

SCORES BRUTS PRE TEST (T0) VS POST-TEST (T3) : CYRIELLE		
NUMERACY SCREENER		
NON SYMBOLIQUE	**40/56**	**52/56**
SYMBOLIQUE	**50/56**	**51/56**
EXAMATH		
Comparaison analogique	**Score** : 21/24 - **NB E.T** : -0.26 - **Percentile** : Med. - **Moyenne** : 21.54	**Score** : 21/24 - **NB E.T** : -0.26 - **Percentile** : Med. - **Moyenne** : 21.54
Arabe/analogique	**Score** : 43/48 - **NB E.T** : -0.04 - **Percentile** : Med. - **Moyenne** : 43.12	**Score** : 38/48 - **NB E.T** : -1.71 - **Percentile** : P10 - **Moyenne** : 43.12
Oral/analogique	**Score** : 45/48 - **NB E.T** : -0.01 - **Percentile** : Med. - **Moyenne** : 45.02	**Score** : 47/48 - **NB E.T** : 0.87 - **Percentile** : P90 - **Moyenne** : 45.02
Fluence arithmétique	**Score** : 12/40 - **NB E.T.** : -1.95 - **Percentile** : P10 - **Moyenne** : 21.44	**Score** : 21/40 - **NB E.T.** : -1.38 - **Percentile** : P10 - **Moyenne** : 26.53

Annexe 4 : Scores bruts obtenus aux pré et post-tests (T0 vs T3)



Annexe 5 : Capture d'écran de l'activité « nombres » issue du logiciel DéCaLigne



Annexe 6 : page exemple du Numeracy Screener en modalité non-symbolique

Sayegh Marie

Intérêt d'un entrainement autour de la ligne numérique avec apport de stratégies explicites chez des sujets présentant un trouble des apprentissages mathématiques

Résumé

Parmi les différentes hypothèses explicatives du trouble des apprentissages mathématiques figure le trouble cognitif numérique et plus particulièrement un déficit d'estimation des nombres sur la ligne numérique. De plus, différentes études ont mis en avant des corrélations significatives entre les performances de placement sur ligne numérique et les habiletés arithmétiques. L'objectif principal de notre étude était d'évaluer l'effet d'une intervention de la ligne numérique sur la précision des représentations numériques chez deux patients TAM. Nos objectifs secondaires étaient de contrôler la présence d'une amélioration conjointe des capacités de calcul chez ces enfants, de vérifier s'il existe une corrélation entre l'explicitation de stratégies de placement et la précision des représentations numériques sur la ligne, de vérifier si l'explicitation de stratégies de calcul a permis une amélioration supplémentaire en capacités de calcul et enfin d'examiner si notre intervention est spécifique. Pour répondre à ces objectifs, nous avons entraîné deux jeunes sujets durant six semaines sur du placement et du calcul sur ligne numérique, en réalisant une première intervention de trois semaines sans apport de stratégies, puis une seconde intervention de même durée avec apport de stratégies explicites. Nous avons évalué chaque patient avant, pendant et après l'entraînement. Nos résultats ont mis en évidence que les deux jeunes sujets avaient globalement amélioré leurs performances en estimation de nombres sur ligne numérique et en calcul. Sur les tâches où une marge de progression était possible, la précision s'est améliorée entre les pré- et post-tests et le temps de réponse s'est davantage amélioré chez le patient le plus jeune. De plus, les apports de stratégies ont permis d'observer des progrès supplémentaires à ces mêmes épreuves. Enfin, les faibles fluctuations du score de l'épreuve contrôle traduisent que nos entraînements seraient spécifiques. Enfin, ce travail a permis de confirmer, d'une part, les liens déjà prouvés entre la ligne numérique et les performances arithmétiques et d'ouvrir, d'autre part, de nouvelles perspectives de remédiations orthophoniques s'appuyant sur le transfert de stratégies explicites en mathématiques.

Mots-clés : TAM, mathématiques, ligne numérique, intervention, stratégies

Sayegh Marie

Interest of a training around the numerical line with contribution of explicit strategies in subjects presenting mathematical learning disorders

Abstract

Amongst the various hypotheses explaining mathematical learning disabilities, numerical disorder appears as prominent. In fact, various studies have shown significant correlations between number estimations using a number line and arithmetic skills. The primary aim of our study was to evaluate the impact of a number line training based on the accuracy of numerical representations. This experiment was led with two patients who suffer from mathematical learning disabilities. Our secondary objectives were to check for the presence of a joint improvement of addition and subtraction skills in these children, to verify whether there was a correlation between the explicitation of placement strategies and the accuracy of numerical representations on the line, to check whether the explicitation of calculation strategies led to an additional improvement in calculation skills and finally to determine if our intervention was purely specific. To meet these goals, we trained two young subjects for six weeks on placement and calculation on a number line, by carrying out a first training session of three weeks without providing strategies, and then a second training session of the same duration with the provision of explicit strategies. We assessed each patient before, during and after training. Our results revealed that, overall, both young subjects improved their performance in number estimation on a number line and in calculation. On tasks where there was room for improvement, accuracy improved between pre- and post-tests and response time improved more in the younger patient. In addition, the strategy inputs led to further progress on these same tasks. Moreover, the small fluctuations in the score of the control test indicated that our training sessions were specific. Finally, this work confirmed the links already evidenced between the number line and arithmetic performance and opened up new possibilities for speech therapy remediation based on the transfer of explicit mathematical strategies.

Keywords : mathematics learning disabilities – number line – training – arithmetic – strategies