

**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.**

Laetitia MARCON \*, Anne LAFAY \*\*

\* orthophoniste, La Fouillouse, France

\*\* Ph.D, orthophoniste, membre de l'Ordre des Orthophonistes et Audiologistes du Québec, chercheuse postdoctorale Banting, Mathematics Teaching and Learning Lab, Concordia University, Montréal, Canada

**Auteurs de correspondance :**

laetitia.marcon@hotmail.fr

lafay\_anne@yahoo.fr

## Résumé :

Les individus ayant un trouble des apprentissages en mathématiques (TAM) ont souvent des difficultés pour estimer de manière précise la position des nombres sur la ligne numérique ; ces déficits peuvent ainsi expliquer pourquoi l'arithmétique semble si complexe. L'objectif de cette recherche était d'évaluer l'efficacité d'un protocole d'intervention intensive, individualisée et ciblant la ligne numérique, sur la précision numérique (performances en placement de nombres) et en calcul chez les enfants ayant un TAM. Deux jeunes ayant un TAM (9 ans et 15 ans) ont suivi une intervention entraînant l'estimation et le calcul avec des feedbacks correctifs à l'aide du logiciel *DéCaLigne* à raison de trois séances de trente minutes par semaine pendant quatre semaines. Leurs performances ont été évaluées quatre fois : un mois et immédiatement avant l'intervention pour avoir une ligne de base et apprécier l'évolution spontanée, immédiatement après l'intervention pour évaluer l'apprentissage et un mois après l'intervention pour mesurer le maintien des apprentissages. Les jeunes ont été évalués sur leur précision numérique (par exemple : placement de nombres sur ligne numérique), leurs performances en résolution d'addition et de soustraction avec la ligne numérique (apprentissage) et sans (transfert au calcul mental). Les résultats ont montré que les deux jeunes améliorent significativement leur précision numérique ainsi que leur capacité de calcul, avec et sans ligne numérique, de manière spécifique. De plus, un maintien des effets de l'intervention est observé un mois après. En conclusion, les résultats suggèrent une relation de causalité entre l'amélioration de la précision sur ligne numérique et l'amélioration en calcul mental. L'efficacité démontrée de l'intervention sur la précision numérique et le calcul est encourageante pour la pratique clinique orthophonique. Toutefois, des répliques sont nécessaires pour que l'étude soit reconnue comme probante.

**Mots clés :** Intervention, Ligne numérique, Calcul, Dyscalculie développementale, Troubles des apprentissages en mathématiques

## **Effect of a number line intervention using *DéCaLigne* software on number accuracy and arithmetic in two children with mathematics learning disabilities.**

### **Summary:**

Individuals with Mathematics Learning Disabilities (MLD) often have difficulties in accurately estimating the position of numbers on a number line; such deficits may thus explain why they find arithmetic so challenging. The aim of the study was to investigate the effectiveness of an intensive and individualized number line intervention on number accuracy and arithmetic skill in children with MLD. A simple phase change across subjects and outcomes design was used. Two children (9 and 15 years old) practiced estimation and calculation, with corrective feedback, on the digital number line software *DéCaLigne* during three 30 minutes sessions per week for four weeks. Performance was assessed four times: one month prior to and immediately before the intervention, after the intervention to measure immediate learning, and one month later to measure maintenance. The children were assessed on their number accuracy (i.e., placing numbers on a number line), and performance on addition and subtraction computations with the number line (i.e., learning) and without (i.e., mental computation as transfer). Both children significantly improved their number accuracy and their arithmetic performance, both with and without the number line, between the second baseline and the immediate learning assessment after the intervention. They also maintained their number accuracy and their

arithmetic performance one month later. The results support the causal effect of practicing estimation and calculation with a number line on arithmetic skill. The effectiveness of the number line intervention offers hope to clinicians and teachers, but replications are essential to characterize it as an evidence-based practice.

**Keywords:** Intervention, Number line, Arithmetic, Developmental dyscalculia, Mathematics learning disabilities

## ----- INTRODUCTION -----

### 1. Trouble des apprentissages en mathématiques

La dyscalculie est, d'après le manuel de diagnostic et statistique des troubles mentaux 5 (DSM-5, 2016), un trouble des apprentissages en mathématiques (TAM). Ce trouble entrave le traitement des données numériques, l'apprentissage des faits arithmétiques, le calcul ou encore la résolution de problèmes. Les difficultés apparaissent en cours de scolarité primaire et sont présentes pendant au moins six mois malgré la mise en place de mesures ou d'interventions. Les performances scolaires perturbées sont nettement en dessous du niveau escompté pour l'âge chronologique, et ce de manière quantifiable, interférant de façon significative avec les performances scolaires et les activités de la vie quotidienne. Enfin, les difficultés ne peuvent être mieux expliquées par un handicap intellectuel, une acuité visuelle ou auditive non corrigée, un trouble neurologique ou mental, un trouble psychosocial, un manque de maîtrise de la langue d'enseignement ou une carence pédagogique.

Le TAM voit son origine dans de multiples causes (Andersson & Östergren, 2012 ; de Souza Salvador et al., 2019 ; Rodriguez et al., 2001 ; Soares et al., 2018). Un déficit communément observé est celui du déficit cognitif numérique (voir Lafay et al., 2015 pour une revue), en particulier celui du déficit de la ligne numérique mentale est souvent démontré (par ex, Lafay et al., 2017 ; Marcon & Lafay, 2019).

### 2. Ligne numérique mentale

Les nombres sont représentés sur une ligne numérique mentale, à savoir une représentation spatiale des nombres, orientée de gauche à droite (selon le sens de lecture de la population étudiée ; Dehaene, 1992, 2010 ; Sheridan et al., 2017). Les magnitudes des nombres sont représentées sur une ligne numérique mentale d'abord compressive (logarithmique) se précisant avec l'âge jusqu'à une représentation linéaire (Siegler, 2016).

Récemment, la méta-analyse de Schneider et al. (2018) a évalué la corrélation entre la ligne numérique et les performances mathématiques et a montré une corrélation significative à  $r = .443$ . L'estimation de nombres sur la ligne est plus fortement corrélée aux performances arithmétiques que la comparaison de magnitudes chez les 6-9 ans. Les relations entre la ligne numérique et les habiletés mathématiques semblent bidirectionnelles. Premièrement, les données montrent que de bonnes habiletés à positionner précisément des nombres sur une ligne numérique sont prédictives des habiletés mathématiques futures (Siegler, 2016), en particulier aux performances en arithmétique (Desoete et al., 2013 ; Landerl, 2013 ; Mathieu et al., 2016) et à la résolution de problèmes (Namkung & Fuchs, 2012 ; Zhu et al., 2017). Deuxièmement, des habiletés précoces comme la numération et la connaissance du nombre ainsi que des processus cognitifs sont nécessaires pour développer une précision numérique (Bartelet et al., 2014 ; Geary et al., 2008 ; Siegler, 2016).

La tâche classique d'évaluation des représentations des nombres est généralement d'estimer la position sur une ligne correspondant à un nombre. Les performances sont alors évaluées de deux manières principales : 1) pourcentage absolu d'erreur ou PAE (valeur absolue [position estimée par l'enfant – position attendue] / longueur de la ligne) : plus le pourcentage est faible, plus la précision numérique est bonne ; 2) linéarité de la représentation graphique des réponses (en abscisse, le nombre cible ; en ordonnée, la position estimée par l'enfant) : plus la représentation graphique est linéaire, plus la précision numérique est bonne.

### 3. Ligne numérique et TAM

D'après la revue de littérature systématique réalisée par Marcon et Lafay (2019), les TAM ont un PAE plus élevé sur une ligne de 0 à 100 par rapport aux enfants au développement typique (DT) jusqu'en CM1 et sur une ligne de 0 à 1000 au moins jusqu'en 6<sup>e</sup>. D'autre part, les TAM arrivent à une représentation linéaire vers le CE1 alors que les DT acquièrent leur représentation linéaire dès le CP, pour une ligne de 0 à 100 ; les TAM ont une représentation logarithmique persistante jusqu'à l'âge adulte pour une ligne de 0 à 1000 alors que les DT ont une représentation linéaire dès le CE2 (Andersson & Östergren, 2012 ; Ashkenazi & Henik, 2010 ; Bartelet et al., 2014 ; Geary et al., 2008 ; Lafay et al., 2017 ; Landerl, 2013 ; Namkung & Fuchs, 2012 ; Sella et al., 2013 ; van Viersen et al., 2013 ; Wong et al., 2017). Ce plus haut PAE chez les TAM suggère une distorsion de leur ligne numérique.

Concernant les stratégies des enfants TAM, nous pouvons constater que ceux-ci en utilisent moins que les DT pour le placement de nombres. D'autre part, celles-ci sont moins efficaces et plus atypiques. L'analyse des mouvements oculaires a pu mettre en évidence une fixation plus importante du milieu de la ligne au détriment des autres points de référence. Les enfants TAM n'adaptent pas leurs stratégies aux nombres cibles. L'utilisation de stratégies moins nombreuses et différentes pourrait d'ailleurs expliquer pourquoi les enfants TAM ont des représentations numériques moins précises que les DT (Rodriguez et al., 2001 ; van Viersen et al., 2013 ; van't Noordende et al., 2016 ; Zhang et al., 2017).

### 4. Interventions ciblant la ligne numérique

Un certain nombre d'études mesurent les effets d'un entraînement de la ligne numérique chez les enfants DT sur les performances en mathématiques. La revue de littérature de Moeller et al., (2015) a montré qu'un entraînement de la ligne numérique papier/crayon ou avec un jeu de plateau est efficace sur les performances en placement de nombres et sur les représentations de leur magnitude (Crollen et al., 2018 ; Laski & Siegler, 2014 ; Opfer & Siegler, 2007 ; Ramani & Siegler, 2008, 2011 ; Ramani et al., 2012 ; Siegler & Ramani, 2008, 2009 ; Whyte & Bull, 2008) mais qu'il l'est moins qu'un entraînement avec support informatique (Honoré & Noël, 2016). L'outil informatique permet de favoriser entre autres l'adaptation, l'accessibilité et l'interactivité tout en ayant un effet positif sur les performances en mathématiques (voir la méta-analyse de Li & Ma, 2010).

Aussi, plusieurs études montrent l'importance de l'implication physique dans l'entraînement (concept de cognition incarnée ; « *embodied training* »). Dejonckheere et al. (2015) ont proposé un entraînement informatique sur tablette de déplacement sur une ligne numérique à 179 DT de 4 à 6 ans à raison de quatre séances de 15 minutes sur deux semaines. Ils ont observé une diminution du PAE entre le pré et le post-test. L'amélioration est plus grande avec la condition « saut » (implication physique plus grande et accès à la distance entre les nombres – le point de départ est le nombre placé précédemment) qu'avec la condition « pointage » (pas d'appréciation de la distance entre les nombres – le curseur est initialement au-dessus de la ligne) ou qu'avec la condition contrôle qui consistait en un jeu non mathématique (voir aussi Cress et al., 2010 ; Crollen et al., 2018 ; Fischer et al., 2011 ; Fischer et al., 2015) pour les bénéfices d'une implication physique corporelle.

À notre connaissance, seulement deux études traitent d'un entraînement direct et explicite de la ligne numérique chez les enfants ayant un TAM. Kucian et al. (2011) ont proposé une

intervention à 22 TAM et 16 DT de 8 à 10 ans. L'entraînement quotidien de 15 minutes sur cinq semaines prend la forme d'un jeu informatisé à niveaux combinant des nombres en format symbolique (arabe), des nombres en format non symbolique (ensemble de points) et des calculs (« Rescue Calcularis » ; Kucian et al., 2011). L'intervention a montré son efficacité avec une amélioration des représentations spatiales sur la ligne numérique, du raisonnement mathématique et une modulation neurologique chez les deux groupes d'enfants qui facilitent le traitement numérique. Selon les auteurs, la baisse de l'activité cérébrale pour les deux groupes (plus importante pour les TAM) atteste d'une automatisation des processus de traitement numérique. De plus, ce gain peut être durable puisque les performances ne diminuent pas avec la période de repos accordée pour les TAM. Michels et al. (2018) ont ensuite repris les données récoltées de 15 TAM et 16 DT de l'entraînement de l'étude de Kucian et al. (2011). Ils ont montré que l'hyperactivité cérébrale des TAM dans les régions pariétale, frontale, visuelle, cérébelleuse et temporale peut se normaliser après une intervention ciblant la ligne numérique. Aussi, les connexions cérébrales observées chez les TAM en post-test sont semblables à celles des DT en pré-test. Il est ainsi possible de dire que l'entraînement intensif de la ligne numérique conduit à la normalisation de l'activité cérébrale mais aussi à une réorganisation des connexions cérébrales chez les TAM. En résumé, les deux études concernant l'intervention ciblant la ligne numérique chez les TAM sont très peu nombreuses mais apportent des résultats prometteurs.

## ----- OBJECTIFS -----

Très souvent, les enfants TAM présentent des déficits des représentations numériques se traduisant par des difficultés à placer des nombres sur une ligne numérique. Les interventions ciblant la ligne numérique ont montré une efficacité certaine chez les enfants DT leur permettant de développer leur précision numérique et leurs capacités arithmétiques. L'objectif est ainsi d'évaluer l'effet d'une intervention intensive, courte et individualisée ciblant la précision numérique et les stratégies de calcul sur la ligne numérique chez les enfants TAM sur leur précision numérique (apprentissage) et leurs capacités arithmétiques (transfert).

L'évaluation de l'efficacité de l'intervention est un devoir de l'orthophoniste selon le Bulletin Officiel n°32 du 5 septembre 2013. Elle est essentielle afin d'analyser sa pratique et de la modifier si cela s'avère nécessaire. Elle fait d'ailleurs partie intégrante de la pratique basée sur des données probantes (ou Evidence-Based Practice ; Cattini & Clair-Bonaimé, 2017 ; Maillart & Durieux, 2012 ; Schelstraete, 2011). L'étude permettra ainsi de répondre, en partie, à la question de l'efficacité des interventions en mathématiques.

Nous espérons que les enfants TAM améliorent leurs performances en estimation de nombres sur une ligne numérique (effet de l'intervention, hypothèse 1), leurs performances en calcul (effet spécifique et généralisation de l'intervention, hypothèse 2), stabilisent leurs performances (maintien, hypothèse 3). Nous espérons aussi que les enfants TAM ne s'améliorent pas en résolution de multiplications et lecture de nombres (mesure contrôle, spécificité de l'intervention cible, hypothèse 4) et qu'ils apprécient l'intervention et le logiciel informatique (mesure de la validité sociale, hypothèse 5).

## ----- MÉTHODOLOGIE -----

### 1. Participants

Les critères d'inclusion étaient de : (a) présenter des difficultés en mathématiques (numération, arithmétique...), (b) pendant au moins 6 mois, (c) malgré la mise en place d'interventions adaptées (suivi en orthophonie pour une rééducation des troubles de la cognition mathématique – dyscalculie, troubles du raisonnement logico-mathématique, AMO 10.2), (d) avoir entre 8 et 15 ans, (e) être francophone unilingue ou bilingue, et (f) habiter près de Saint-Étienne ou Lyon (pour des questions organisationnelles de l'étude). Les critères d'exclusion étaient de présenter : (a) un handicap intellectuel, (b) une acuité visuelle ou auditive non corrigée, (c) des troubles neurologiques ou mentaux, ou (d) un trouble psychosocial. Un consentement de la part des parents et un assentiment de la part des participants eux-mêmes ont été obtenus par écrit.

Deux jeunes ont été recrutés (les prénoms ont été modifiés pour le respect de la confidentialité des participants). Lucas est un garçon de 15 ans et 10 mois en 3<sup>e</sup> au collège et présente des difficultés en mathématiques malgré le suivi orthophonique de quatre années. Un TAM primaire et une dyslexie ont été mis en évidence par l'orthophoniste. Emma est une fille de 9 ans en CE2 à l'école primaire et présente des difficultés en mathématiques malgré le suivi orthophonique d'un an. Elle ne présente pas de trouble associé.

### 2. Procédure générale

Le protocole s'est déroulé selon deux pré-tests (un mois et immédiatement avant l'intervention), une intervention (pendant quatre semaines) et deux post-tests (immédiatement et un mois après l'intervention). La passation des tests s'est déroulée individuellement au domicile du jeune avec l'autrice du présent article. Les réponses sont données oralement ou informatiquement.

### 3. Mesures

#### a. Mesures d'identification des difficultés mathématiques générales

L'épreuve « Fluence arithmétique » (Examath 8-15 ; Lafay & Helloin, 2016) a pour objectif d'attester des difficultés en mathématiques et d'évaluer la récupération des faits arithmétiques en mémoire ainsi que la capacité à réaliser rapidement un calcul mental simple. Elle requiert de donner oralement le résultat de l'opération présentée (horizontalement) à l'écran le plus vite possible (additions, soustractions, multiplications et divisions pour Lucas ; additions, soustractions et multiplications pour Emma). La variable dépendante est le score (maximal sur 40) par type d'opérations.

L'épreuve « Relation arabe/analogique » (Examath 8-15 ; Lafay & Helloin, 2016) a pour objectif d'attester des difficultés en mathématiques des deux jeunes et d'évaluer l'accès au sens du nombre via le code arabe. Elle comporte deux types de tâches. Une tâche de jugement requiert de déterminer si l'ensemble de points et le nombre arabe présentés à l'écran (nombres de 1 à 9) représentent la même quantité. Une tâche de comparaison requiert de dire lequel des deux nombres arabes présentés à l'écran (nombres de 1 à 4, de 5 à 13 et de 10 à 99) est le plus grand. Le jeune doit donner sa réponse en appuyant sur deux touches du clavier distinctes. Les variables dépendantes sont : le score (maximal sur 12 pour chaque sous-test) et le temps de réaction par item juste.

## b. Mesures d'efficacité de l'intervention

Un protocole avec ligne de base procédurale comportant plusieurs tests a été utilisé. Le tableau 1 détaille les épreuves administrées à chaque jeune.

### Mesure A : Placement de nombres sur ligne numérique

La tâche expérimentale de placement de nombres sur ligne numérique a pour objectif d'évaluer la précision des représentations du nombre sur la ligne. Elle a été choisie pour mesurer l'effet immédiat de l'intervention : elle constitue une ligne de base spécifique d'un élément travaillé en séance. La ligne de base incluse dans le logiciel *DéCaLigne* (Helloin & Lafay, 2018) a été utilisée. L'enfant voit à l'écran un nombre présenté en code arabe et doit le placer le plus précisément possible sur une ligne allant de m à n. La présentation est volontairement neutre comme il s'agit d'une modalité test. Pour la ligne de 0 à 10, neuf nombres sont présentés dans un ordre aléatoire à chaque passation. Quant à la ligne de 0 à 20, dix nombres sont présentés aléatoirement. Enfin, pour les lignes de 0 à 100 et de 0 à 1000, 20 nombres sont présentés dans un ordre aléatoire. Les variables dépendantes sont : le score (maximal sur 18 ou 20 selon l'amplitude de la ligne), le PAE et le temps de réponse pour chaque épreuve. Pour avoir un nombre d'items équivalent pour toutes les amplitudes, les lignes 0-10 et 0-20 sont administrées deux fois.

### Mesure B : Calcul sur ligne numérique

La tâche expérimentale de calcul sur ligne a pour objectif d'évaluer les représentations et les procédures de résolution des opérations arithmétiques d'addition et de soustraction sur une ligne numérique. Elle constitue une ligne de base spécifique d'un élément travaillé en séance. Le principe est de placer le résultat d'une opération arithmétique sur la ligne numérique. Ce programme n'est pas prévu en ligne de base dans le logiciel *DéCaLigne* (Helloin & Lafay, 2018). Le jeu « Opérations » a donc été détourné pour créer une ligne de base spécifique avec des items de référence pour évaluer la progression du jeune après l'intervention. La présentation pouvait donc être plus attrayante avec le choix d'un personnage et d'un décor. Les modalités pointage (l'enfant doit directement pointer le curseur à la position choisie sur la ligne) et « 0-Résultat » (l'enfant doit directement passer d'un pointeur placé à 0 jusque vers le résultat estimé, sans étape intermédiaire imposée par le programme) sont proposées avec tous les repères, toutes les graduations, ainsi que tous les feedbacks (codes arabe, oral, verbal écrit, analogique et ligne). Les variables dépendantes sont le score (maximal sur 20), le PAE et le temps de réponse.

### Mesure C : Calcul

La tâche expérimentale de calcul simple et celle de calcul complexe ont pour objectif d'évaluer les capacités de calcul. Elles ont été choisies pour mesurer l'effet de généralisation de l'intervention sur les représentations du nombre sur une ligne numérique. Elles constituent une ligne de base de généralisation pour un élément pour lequel un transfert peut être attendu. Les lignes de base incluses dans le logiciel *DéCaLigne* (Helloin & Lafay, 2018) ont été utilisées. Le principe est de résoudre des opérations arithmétiques d'addition et de soustraction sur 0-20 pour le calcul simple et sur 0-1000 pour le calcul complexe sans recourir à une ligne numérique physique (c'est-à-dire, sans qu'aucune stratégie ne soit explicitement fournie). Les opérations sont présentées en ligne, par série de 12 items (six additions et six soustractions), avec une réponse par clavier numérique. La présentation est volontairement neutre comme il s'agit d'une

présentation test. Les calculs sont différents en pré et post-test mais suivent les mêmes caractéristiques. Les variables dépendantes sont le score (maximal sur 24) et le temps de réponse.

### Mesure D : Lecture de nombres et Multiplications

La mesure contrôle se compose de la tâche expérimentale de lecture de nombres et de la sous-épreuve de résolution de Multiplications dans l'épreuve de « Fluence Arithmétique » (Examath 8-15 ; Lafay & Helloin, 2016). La tâche de lecture de nombres a pour objectif d'évaluer la capacité de transcodage entre la modalité visuelle arabe et l'auditif oral. Elle constitue une ligne de base contrôle. Trois listes de 20 nombres en code arabe ont été créées : des nombres jusqu'à 100, des nombres jusqu'à 1000 et des nombres entre 1000 et 10 000. Des précautions ont été prises telles que ne pas reprendre les nombres de l'épreuve Transcodage d'Examath 8-15, avoir autant de nombres avec et sans 0, prendre deux nombres par tranche (l'intervalle choisi a été divisé par dix) et les faire apparaître aléatoirement. Le logiciel DMDX (Forster & Forster, 2003) a été utilisé pour programmer et administrer la tâche. L'examineur appuie sur une touche du clavier pour indiquer si la réponse est exacte (touche O) ou non (touche N). Une pause au milieu de l'épreuve est prévue informatiquement. Les variables dépendantes sont le score (maximal sur 20) et le temps de réponse par item juste (en secondes).

### Mesure E : Validité sociale

La validité sociale a été évaluée par un questionnaire de satisfaction comportant huit affirmations avec une échelle de Likert en quatre niveaux allant du « pas du tout d'accord » à « tout à fait d'accord » : « J'ai aimé jouer au jeu », « J'ai aimé les décors », « J'ai aimé les personnages », « Je pense que ce jeu m'a aidé pour placer les nombres sur la ligne », « Je pense que ce jeu m'a aidé pour le calcul », « Je pense que le nombre de semaines d'entraînement est satisfaisant », « Je pense que le nombre de séances par semaine est satisfaisant » et « Je pense que la durée de la séance est satisfaisante ».

**Tableau 1.**

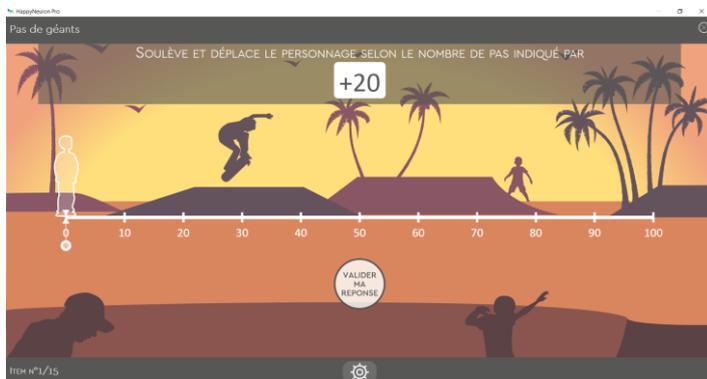
*Détail des épreuves administrées en pré et post-test pour chaque jeune*

Epreuves	Lucas, 15 ans, 3 <sup>e</sup>				Emma, 9 ans, CE2			
	T1	T2	T3	T4	T1	T2	T3	T4
<b>Relation arabe / analogique</b>	X				X			
<b>Fluence Addition / Soustraction</b>	X				X			
<b>Fluence Multiplication</b>	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Fluence Division</b>	X							
<b>Ligne 0-10</b>					X	X	X	X
<b>Ligne 0-20</b>	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Ligne 0-100</b>	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Ligne 0-1000</b>	X	X	X	X				
<b>Ligne -100 / +100</b>	X	X	X	X				
<b>Calcul simple 0-20</b>	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Calcul complexe</b>	X	X	X	X		X	X	X
<b>Lecture &lt; 100</b>					X	X	X	X
<b>Lecture &lt; 1000</b>	X	X	X	X				
<b>Lecture 1000-10 000</b>	X	X	X	X				
<b>Calcul sur ligne 0-10</b>					X	X	X	X
<b>Calcul sur ligne 0-20</b>	X	X	X	X	X	X	X	X
<b>Calcul sur ligne 0-100</b>	X	X	X	X				

## 4. Interventions

Le **focus** de l'intervention était que les enfants améliorent leurs précisions numérique et arithmétique. La **dose** a été développée de manière à donner une intervention de douze séances de 30 minutes, à raison de trois séances par semaine, pendant quatre semaines. L'intervention s'est déroulée individuellement au domicile du jeune avec la présence de l'autrice du présent article.

Le **matériel** utilisé est le logiciel *DéCaLigne* (Helloin & Lafay, 2018). La figure 1 donne un exemple de capture d'écran. Le principe général est de (dé)placer des nombres ou des résultats de calculs sur une ligne numérique. Il se veut adapté à tout âge, avec de nombreuses progressions possibles dans la difficulté de l'exercice (amplitude de la ligne, modalité de réponse, choix du type d'opération présenté) mais aussi dans l'aide proposée au jeune (nombre de repères, graduation). Ces paramètres peuvent être modifiés par l'orthophoniste ou être prédéfinis avec une progression et une évolution automatique. Le logiciel propose six jeux. Quatre **activités** ont été proposées dans le présent protocole. Dans « Nombres », l'enfant voit un nombre en code arabe et doit le placer sur la ligne. Dans « Se déplacer », l'enfant voit un nombre en code arabe précédé du symbole (+) ou du symbole (-) et doit trouver la position correspondant au déplacement demandé. Dans « Pas de géants », l'enfant voit un nombre multiple de 10 ou de 100 selon la ligne proposée précédé du symbole (+) ou du symbole (-) et doit trouver la position correspondant au déplacement souhaité. Enfin, dans « Opérations », l'enfant doit placer le résultat de l'opération (addition ou soustraction en ligne et en code arabe) et parfois le premier opérande, sur la ligne numérique. Pendant l'intervention, différents décors et personnages sont proposés pour la motivation de l'enfant.



**Figure 1.** Capture d'écran exemple de l'activité « Pas de Géants » sur l'amplitude 0-100, en modalité de réponse « saut » avec les dizaines pour repères et avec indication de toutes les graduations

La **modalité** d'intervention est explicite. Tout d'abord, des indications pour aider le jeune à améliorer son placement de nombres sur la ligne sont données comme l'utilisation des points de repère (milieu, quart et trois quarts de la ligne), le fait d'utiliser des intervalles égaux pour segmenter la ligne mais variables selon l'amplitude de la ligne. L'attention du jeune est aussi portée sur les variations de valeur que peut avoir un intervalle (un grand repère peut valoir 1, 10 ou 100 selon la ligne). Une explication des procédures de calcul a été donnée pour résoudre les opérations, avec ou sans retenue. De plus, un feedback correctif et un renforcement sont donnés automatiquement et systématiquement par le logiciel. Pour chaque activité, les nombres/opérations sont présentés par séries de dix items.

Une **évolution progressive** a été définie pour le choix des exercices, des amplitudes de ligne et des aides. L'intervention se voulait similaire entre les deux enfants mais adaptée à leurs difficultés. Trois lignes sont choisies pour chaque jeune. Le programme de base travaillant une ligne par semaine avec une révision des trois lignes la quatrième semaine a été adapté selon la vitesse et la difficulté du jeune. Les amplitudes 0-20, 0-100 et 0-1000 ont été choisies pour Lucas et 0-10, 0-20 et 0-100 pour Emma.

Les exercices sont adaptés selon la ligne. Seuls « Nombres », « Se déplacer » et « Opérations » sont possibles pour 0-10 et 0-20. « Pas de géants » est possible seulement pour 0-100 et 0-1000. Concernant le mode de déplacement du curseur (du personnage) sur la ligne, le mode « flèches » (un clic ou une pression sur la touche « flèche » du clavier vaut un repère sur la ligne tandis qu'une pression prolongée fait avancer le personnage plus rapidement) a été choisi pour la première séance de chaque amplitude. Ensuite, vient le mode « saut » (maintenir le clic de la souris pour que le personnage survole la ligne) pour la deuxième et la troisième séance de chaque amplitude. Enfin, le mode « pointage » (un clic directement sur la ligne) a été adopté pour la quatrième semaine.

Le principe d'effacement progressif de l'aide a été appliqué. Tous les repères ont été gardés pour les petites lignes (0-10 et 0-20) sur toutes les séances. Quant aux grandes lignes, tous les repères étaient présents pour les deux premières séances ; pour la troisième, seules les dizaines sur 0-100 et les centaines sur 0-1000 ont été proposées. Enfin, les graduations étaient présentes sur les deux premières séances de chaque ligne et absentes pour la troisième séance. Les repères et les graduations proposées pour la quatrième semaine se basaient sur la troisième séance de chaque ligne.

D'autre part, une progression spécifique dans « Opérations » a également été suivie. En premier, le choix s'est porté sur le mode « Opérande 1 – Résultat » qui consiste à déplacer le personnage, déjà placé sur le premier nombre de l'opération, sur le résultat final (par exemple pour l'opération  $4+5$ , le personnage est déjà à la position 4 et doit être déplacé de +5, soit jusqu'à 9). Ensuite, le mode « 0 – Opérande 1 – Résultat » exige de l'enfant de placer le personnage sur le premier nombre de l'opération pour ensuite aller sur le résultat (par exemple pour l'opération  $4+5$ , le personnage est à la position 0, il doit être déplacé à la position 4 puis de +5, soit jusqu'à 9). Enfin, le mode « 0 – Résultat » a été proposé : l'enfant doit alors déplacer le personnage en une seule fois sur le résultat de l'opération donnée (par exemple pour l'opération  $4+5$ , le personnage est à la position 0, il doit être directement déplacé à la position  $4+5$ , soit jusqu'à 9).

## ----- RÉSULTATS -----

### 1. Analyse des performances

Les analyses statistiques ont été réalisées avec le logiciel SPSS version 22. Des analyses de variance univariées répétées ont été menées sur les variables dépendantes (Score, PAE, Temps) selon la variable indépendante Test (quatre temps de testing : le pré-test 1 ou T1, le pré-test 2 ou T2, le post-test 1 ou T3 et le post-test 2 ou T4) à chacune des épreuves réalisées et pour chaque enfant. D'autre part, les analyses de comparaison planifiées s'effectuent avec une correction de Bonferroni. Seules les différences significatives seront indiquées dans les analyses ci-dessous. Les scores bruts (somme des Scores et moyennes du PAE et du Temps par item) sont répertoriés dans le tableau 2.

**Tableau 2.**

*Scores bruts par enfant par mesures*

Mesures	Sous-épreuve	Test	Lucas			Emma		
			Score	PAE	Temps	Score	PAE	Temps
<b>Mesure A : Placement de nombres sur la ligne numérique</b>	<b>Ligne 0-10</b>	<b>T1</b>				4/18 (.43)	19.19 (10.98)	10.30 (5.59)
		<b>T2</b>				8/18 (.51)	14.28 (9.59)	9.17 (3.32)
		<b>T3</b>				16/18 (.32)	5.40 (2.66)	7.26 (5.57)
		<b>T4</b>				17/18 (.24)	3.77 (2.64)	6.90 (1.77)
	<b>Ligne 0-20</b>	<b>T1</b>	11 (.51)	10.97 (7.83)	4.81 (2.36)	9 (.51)	11.20 (6.88)	6.99 (3.20)
		<b>T2</b>	15 (.44)	7.74 (6.23)	4.58 (2.14)	12 (.50)	8.01 (6.17)	8.54 (4.90)
		<b>T3</b>	20	1.34 (1.03)	4.18 (2.72)	19 (.22)	3.66 (2.99)	6.82 (2.40)
		<b>T4</b>	19 (.22)	2.59 (4.35)	3.84 (1.34)	19 (.22)	4.00 (3.05)	7.14 (5.31)
	<b>Ligne 0-100</b>	<b>T1</b>	14 (.47)	8.12 (6.13)	5.16 (3.32)	13 (.49)	10.06 (7.54)	11.13 (11.80)
		<b>T2</b>	19 (.22)	5.61 (4.18)	4.47 (1.89)	14 (.47)	10.68 (9.01)	8.94 (5.79)
		<b>T3</b>	20	3.64 (3.00)	6.70 (6.98)	20	3.59 (3.21)	7.80 (3.59)
		<b>T4</b>	20	2.65 (2.35)	9.24 (4.48)	19 (.22)	4.41 (3.97)	10.82 (9.60)
	<b>Ligne -100 - +100</b>	<b>T1</b>	12 (.50)	6.99 (7.63)	4.23 (2.22)			
		<b>T2</b>	19 (.22)	3.34 (8.77)	4.20 (2.40)			
		<b>T3</b>	19 (.22)	2.14 (2.20)	4.94 (3.07)			
		<b>T4</b>	19 (.22)	2.07 (2.30)	6.51 (3.49)			
	<b>Ligne 0- 1000</b>	<b>T1</b>	20	4.47 (2.90)	4.41 (1.09)			
		<b>T2</b>	20	3.55 (1.81)	4.51 (3.95)			

	<b>T3</b>	20	3.36 (2.50)	7.19 (4.76)				
	<b>T4</b>	19 (.22)	4.66 (4.21)	9.37 (6.33)				
<b>Mesure B : Calcul sur ligne numérique</b>	<b>Ligne 0-10</b>	<b>T1</b>			20	.32 (.31)	9.04 (6.00)	
		<b>T2</b>			18 (.31)	5.39 (18.20)	9.16 (5.50)	
		<b>T3</b>				19 (.22)	4.18 (17.85)	6.83 (5.63)
		<b>T4</b>				19 (.22)	.70 (2.11)	5.54 (2.63)
	<b>Ligne 0-20</b>	<b>T1</b>	18 (.31)	1.61 (3.97)	10.92 (8.78)	19 (.22)	3.05 (11.26)	14.70 (8.38)
		<b>T2</b>	20	.65 (1.53)	10.30 (8.26)	20	.35 (.21)	13.62 (13.14)
		<b>T3</b>	20	1.56 (2.80)	4.77 (2.43)	19 (.22)	2.04 (6.68)	8.04 (4.23)
		<b>T4</b>	20	.65 (1.53)	10.3 (8.26)	20	.26 (.22)	13.08 (11.40)
	<b>Ligne 0-100</b>	<b>T1</b>	20	.49 (1.39)	30.37 (17.80)			
		<b>T2</b>	20	1.68 (2.34)	22.38 (11.65)			
		<b>T3</b>	20	.62 (2.28)	15.88 (13.90)			
		<b>T4</b>	20	1.68 (2.34)	22.38 (11.65)			
	<b>Mesure C : Calcul</b>	<b>Calcul Simple</b>	<b>T1</b>	22/24 (.28)		6.57 (4.81)	24/24	14.56 (10.39)
			<b>T2</b>	23/24 (0.20)		7.01 (8.29)	22/24 (.28)	15.56 (13.17)
			<b>T3</b>	23/24 (.20)		6.19 (4.25)	23/24 (.20)	9.59 (6.64)
			<b>T4</b>	24/24		7.86 (7.02)	22/24 (.28)	9.48 (7.05)
<b>Calcul Complexe</b>		<b>T1</b>	9/24 (049)		30.5 (14.51)			
		<b>T2</b>	12/24 (.51)		35.76 (19.54)	4/12 (.49)		61.62 (44.00)
		<b>T3</b>	20/24 (.38)		44.15 (33.89)	11/12 (.29)		33.34 (26.00)
		<b>T4</b>	22/24 (.28)		205.87 (762.00)	9/10 (.32)		53.46 (39.15)
<b>Mesure D : Lecture de nombres</b>	<b>0-100</b>	<b>T1</b>					1.80 (.61)	
		<b>T2</b>					1.56 (.28)	
		<b>T3</b>					1.47 (.51)	
		<b>T4</b>					1.22 (.35)	
	<b>0-1000</b>	<b>T1</b>			1.30 (.34)			
		<b>T2</b>			1.29 (.46)			
		<b>T3</b>			1.36 (.42)			
		<b>T4</b>			1.27 (.36)			
	<b>1000-10000</b>	<b>T1</b>			2.40 (.51)			
		<b>T2</b>			2.44 (.43)			
		<b>T3</b>			2.39 (.59)			

	<b>T4</b>		2.32 (.22)
<b>Mesure D : Multiplications</b>	<b>T1</b>	13/17 (.44)	6/7 (.38)
	<b>T2</b>	16/19 (.37)	12/12
	<b>T3</b>	16/19 (.37)	4/7 (.53)
	<b>T4</b>	14/16 (.34)	7/7

Légende. Les cases vides correspondent à des épreuves non réalisées. Le score total est indiqué lorsque celui-ci est différent de 20.

### a. Lucas

#### Mesure A : Placement de nombres sur ligne numérique

Pour le Placement de nombres sur la ligne 0-20, les analyses ne montrent aucun effet significatif du Test sur le Temps ( $F(3,57) = 1.072, p = .368$ ). mais un effet significatif sur le Score ( $F(3, 57) = 6.685, p = .001, \eta^2_p = .260$ ) et sur le PAE ( $F(3,57) = 13.065, p < .001, \eta^2_p = .407$ ). Les analyses de comparaison montrent que le Score est meilleur (plus élevé) pour T3 et T4 que pour T1 (respectivement  $p = .005$  et  $p = .045$ ). Le PAE est meilleur (moins élevé) pour T3 et T4 que pour T1 (respectivement  $p < .001$  et  $p = .008$ ) et pour T3 que pour T2 ( $p = .004$ ).

Pour le Placement de nombres sur la ligne 0-100, les analyses montrent un effet significatif du Test sur le Score ( $F(3,57) = 5.860, p = .001, \eta^2_p = .236$ ), sur le PAE ( $F(3,57) = 6.251, p = .001, \eta^2_p = .248$ ) et sur le Temps ( $F(3,57) = 5.098, p = .003, \eta^2_p = .212$ ). Les analyses de comparaison montrent des effets marginaux pour le Score qui iraient dans le sens d'une amélioration pour T3 et T4 par rapport à T1 (respectivement  $p = .061$  et  $p = .061$ ). Le PAE est meilleur (moins élevé) pour T3 et T4 que pour T1 (respectivement  $p = .068$ , effet marginal et  $p = .014$ ). Le Temps est moins bon (plus élevé) pour T4 que pour T1 et T2 (respectivement  $p = .016$  et  $p = .002$ ).

Pour le Placement de nombres sur la ligne -100 à +100, les analyses montrent un effet significatif sur le Score ( $F(3,57) = 5.905, p = .001, \eta^2_p = .237$ ), le PAE ( $F(3,57) = 2.888, p = .043, \eta^2_p = .132$ ) et le Temps ( $F(3,57) = 3.897, p = .013$ ). Les analyses de comparaison montrent que le Score est meilleur (plus élevé) pour T4 que pour T1 ( $p = .028$ ). Le PAE est meilleur (moins élevé) pour T4 que pour T1 ( $p = .051$ ). Les comparaisons appariées ne montrent pas de différences significatives ou même marginales pour le Temps malgré l'effet simple significatif.

Pour le Placement de nombres sur la ligne 0-1000, les analyses ne montrent aucun effet significatif du Test sur le Score ( $F(3,57) = 1.000, p = .400$ ) et sur le PAE ( $F(3,57) = .827, p = .484$ ), mais un effet significatif sur le Temps ( $F(3,57) = 10.090, p < .001, \eta^2_p = .347$ ). Les analyses de comparaison montrent que le Temps est moins bon (plus élevé) pour T3 et T4 que pour T1 (respectivement  $p = .068$ , effet marginal et  $p = .011$ ), pour T3 et T4 que pour T2 (respectivement  $p = .002$  et  $p = .008$ ).

#### Mesure B : Calcul sur ligne numérique

Pour le Calcul sur la ligne 0-20, les analyses ne montrent aucun effet significatif du Test sur le Score ( $F(3,57) = 2.111, p = .109$ ) et sur le PAE ( $F(3,57) = .936, p = .429$ ), mais un effet

significatif sur le Temps ( $F(3,57) = 3.669, p = .017, \eta^2_p = .162$ ). Les analyses de comparaison montrent que le Temps est meilleur (moins élevé) pour T3 que pour T1, T2 et T4 (respectivement  $p = .047, p = .055$ , effet marginal et  $p = .055$ , effet marginal).

Pour le Calcul sur la ligne 0-100, les analyses ne montrent aucun effet significatif du Test sur le Score (variance nulle) mais un effet significatif sur le PAE ( $F(3,57) = 2.789, p = .049$ ) et le Temps ( $F(3,57) = 4.324, p = .008, \eta^2_p = .185$ ). Les analyses de comparaison montrent que le Temps est meilleur (moins élevé) pour T3 que T1 ( $p = .036$ ) mais ne montrent pas d'effet significatif, même marginal, pour le PAE malgré l'effet simple significatif.

### Mesure C : Calcul

Pour le Calcul simple sur 0-20, les analyses ne montrent aucun effet significatif du Test sur le Score ( $F(3, 69) = .657, p = .581$ ) et sur le Temps ( $F(3,69) = .336, p = .799$ ).

Pour le Calcul complexe, les analyses montrent un effet significatif sur le Score ( $F(3,69) = 9.034, p < .001, \eta^2_p = .282$ ), mais aucun effet significatif du Test sur le Temps ( $F(3,69) = 1.188, p = .321$ ). Les analyses de comparaison montrent que le Score est meilleur (plus élevé) pour T3 et T4 que pour T1 (respectivement  $p = .005$  et  $p = .001$ ), pour T3 et T4 que pour T2 (respectivement  $p = .049$  et  $p = .029$ ).

### Mesure D : Lecture de nombres et Multiplications

Pour la Lecture de nombres des nombres jusqu'à 1000, les analyses ne montrent aucun effet significatif du Test sur le Temps ( $F(3,39) = .200, p = .896$ ). Pour la Lecture de nombres des nombres supérieurs à 1000, les analyses ne montrent aucun effet significatif du Test sur le Temps ( $F(3,39) = .337, p = .799$ ).

Pour la résolution de Multiplications, les analyses ne montrent aucun effet significatif du Test sur le Score ( $F(3, 39) = .848, p = .476$ ).

### Mesure E : Validité sociale

Concernant la validité sociale, Lucas donne un score de 21/24 avec 2/3 à l'affirmation « J'ai aimé les décors », « J'ai aimé les personnages » et « Je pense que le nombre de séances par semaine est satisfaisant ».

#### b. Emma

### Mesure A : Placement de nombres sur ligne numérique

Pour le Placement de nombres sur la ligne 0-10, les analyses montrent un effet significatif sur le Score ( $F(3,51) = 12.253, p < .001, \eta^2_p = .419$ ), sur le PAE ( $F(3,51) = 14.697, p < .001, \eta^2_p = .464$ ) et sur le Temps ( $F(3,51) = 4.147, p = .011, \eta^2_p = .196$ ). Les analyses de comparaison montrent que le Score est meilleur (plus élevé) pour T3 et T4 que pour T1 (respectivement  $p = .001$  et  $p < .001$ ), pour T3 et T4 que pour T2 (respectivement  $p = .042$  et  $p = .019$ ). Le PAE est meilleur (moins élevé) pour T3 et T4 que pour T1 (respectivement  $p = .001$  et  $p < .001$ ), pour T3 et T4 que pour T2 (respectivement  $p = .017$  et  $p = .002$ ). Le Temps est meilleur (moins élevé) pour T3 que pour T1 ( $p = .009$ ).

Pour le Placement de nombres sur la ligne 0-20, les analyses ne montrent aucun effet significatif pour le temps ( $F(3,51) = .328, p = .805$ ), mais un effet significatif sur le Score ( $F(3,51) = 7.702, p < .001, \eta^2_p = .312$ ) et sur le PAE ( $F(3,51) = 9.079, p < .001, \eta^2_p = .348$ ). Les analyses de comparaison montrent que le Score est meilleur (plus élevé) pour T3 et T4 que pour T1 (respectivement  $p = .001$  et  $p = .008$ ). Le PAE est meilleur (moins élevé) pour T3 et T4 que pour T1 (respectivement  $p = .001$  et  $p = .005$ ).

Pour le Placement de nombres sur la ligne 0-100, les analyses ne montrent aucun effet significatif pour le Temps ( $F(3,51) = 1.293, p = .287$ ), mais un effet significatif sur le Score ( $F(3,51) = 6.094, p = .001, \eta^2_p = .264$ ) et sur le PAE ( $F(3,51) = 5.998, p = .001, \eta^2_p = .261$ ). Les analyses de comparaison montrent que le Score est meilleur (plus élevé) pour T3 et T4 que pour T1 (respectivement  $p = .026$  et  $p = .026$ ). Le PAE est meilleur (moins élevé) pour T3 et T4 que pour T1 (respectivement  $p = .018$  et  $p = .032$ ).

### **Mesure B : Calcul sur ligne numérique**

Pour le Calcul sur la ligne 0-10, les analyses ne montrent aucun effet significatif du Test sur le Score ( $F(3,57) = .655, p = .583$ ) et sur le PAE ( $F(3,57) = .760, p = .551$ ), mais un effet significatif sur le Temps ( $F(3,57) = 3.609, p = .019, \eta^2_p = .160$ ). Les analyses de comparaison montrent que le Temps est meilleur (moins élevé) pour T4 que pour T1 et T2 (respectivement  $p = .070$ , effet marginal et  $p = .050$ ).

Pour le Calcul sur la ligne 0-20, les analyses ne montrent aucun effet significatif du Test sur le Score ( $F(3,57) = .655, p = .583$ ), sur le PAE ( $F(3,57) = .844, p = .475$ ) et sur le Temps ( $F(3,57) = 2.105, p = .110$ ).

### **Mesure C : Calcul**

Pour le Calcul simple sur 0-20, les analyses ne montrent aucun effet significatif du Test sur le Score ( $F(3,69) = .725, p = .541$ ), mais un effet significatif sur le Temps ( $F(3,69) = 3.230, p = .028, \eta^2_p = .123$ ). Les analyses de comparaison montrent que le Temps est meilleur (moins élevé) pour T3 que pour T1 ( $p = .075$ , effet marginal).

Pour le Calcul complexe, les analyses ne montrent aucun effet significatif du Test sur le Temps ( $F(2,18) = 1.471, p = .256$ ), mais un effet significatif sur le Score ( $F(2,18) = 7.364, p = .005, \eta^2_p = .450$ ). Les analyses de comparaison montrent que le Score est meilleur (plus élevé) pour T3 et T4 que pour T2 (respectivement  $p = .015$  et  $p = .072$ , effet marginal).

### **Mesure D : Lecture de nombres et Multiplications**

Pour la Lecture de nombres des nombres inférieurs à 100, les analyses montrent un effet significatif du Test sur le Temps ( $F(3,18) = 10.624, p < .001, \eta^2_p = .639$ ). Les analyses de comparaison montrent que le Temps est meilleur (moins élevé) pour T3 et T4 que pour T1 (respectivement  $p = .007$  et  $p = .009$ ) et pour T4 que pour T2 ( $p = .070$ , effet marginal).

Pour la résolution de Multiplications, les analyses montrent un effet marginal du Test sur le Score ( $F(3,18) = 3.130, p = .051$ ). Les comparaisons appariées ne montrent aucun résultat significatif.

**Mesure E : Validité sociale**

Concernant la mesure de la validité sociale. Emma obtient un score de 21/24 avec 2/3 aux items « J'ai aimé jouer au jeu », « Je pense que le nombre de semaines d'entraînement est satisfaisant » et « Je pense que le nombre de séances par semaine est satisfaisant ».

**2. Analyse de la fidélité de l'intervention**

L'analyse descriptive montre que l'intervention proposée est similaire pour chaque jeune pour ce qui a trait au moment et à la dose de l'intervention, ainsi qu'au nombre d'opportunités de pratique et à la répartition du nombre d'opportunités de pratique pour chaque jeu (voir tableau 3). L'unique différence prégnante concerne « Pas de géants » : Lucas (110 items) comptabilise plus d'items qu'Emma (50 items). Cette différence est due au fait que les lignes travaillées avec Lucas sont de plus grande amplitude et que « Pas de géants » ne peut être proposé que pour les lignes numériques avec une borne supérieure à 100. De ce fait, Lucas avait deux lignes éligibles à ce jeu (0-100 et 0-1000) alors qu'Emma n'en avait qu'une (0-100). En conclusion, les deux protocoles peuvent être considérés comme équivalents mais également adaptés aux besoins et aux âges des enfants.

**Tableau 3.***Comparatif des deux interventions*

Critères de comparaison		Lucas	Emma
Âge		15 ans 10 mois	9 ans
Date du pré-test 1		07/06/2018	08/06/2018
Date du pré-test 2		05/07/2018	05/07/2018
Nombre de semaines d'intervention		4	4
Nombre de séances d'intervention		3	3
Durée de chaque séance		30 minutes	30 minutes
Nombres de lignes travaillées		3	3
Nombres d'items dans le jeu "Nombres"	Ligne 0-10	0	90
	Ligne 0-20	90	100
	Ligne 0-100	100	70
	Ligne 0-1000	70	0
	Total	260	260
Nombres d'items dans le jeu "Se déplacer"	Ligne 0-10	0	80
	Ligne 0-20	80	80
	Ligne 0-100	80	50
	Ligne 0-1000	50	0
	Total	210	210
Nombres d'items dans "Pas de géants"	Ligne 0-100	60	50
	Ligne 0-1000	50	0
	Total	110	50
Nombres d'items dans le jeu "Opérations"	Ligne 0-10	0	140
	Ligne 0-20	160	110
	Ligne 0-100	90	80
	Ligne 0-1000	80	0
	Total	330	330
Nombres d'items au total	Ligne 0-10	0	310

<b>Ligne 0-20</b>	330	290
<b>Ligne 0-100</b>	330	250
<b>Ligne 0-1000</b>	250	0
<b>Total</b>	<b>910</b>	<b>850</b>
<b>Nombres de jeux travaillés</b>	4	4
<b>Résultat au test de satisfaction /24</b>	21 (87.5%)	21 (87.5%)
<b>Date du post-test 1</b>	03/08/2018	03/08/2018
<b>Date du post-test 2</b>	03/09/2018	02/09/2018

## ----- DISCUSSION -----

### 1. Interprétation des résultats

Selon l'hypothèse 1, nous espérions que les enfants TAM amélioreraient leurs performances en estimation de nombres sur une ligne numérique après l'intervention proposée. Pour Lucas, une amélioration de la précision numérique est observée après l'intervention pour les lignes 0-20, 0-100 et -100/+100 mais pas pour 0-1000. En revanche, une augmentation du temps est relevée pour les lignes 0-100 et 0-1000, suggérant que Lucas a pris plus de temps pour le placement de nombres, peut-être par un souci de précision au détriment du temps de réalisation, traduisant une mise en pratique des stratégies apprises mais non automatisées pour le placement de nombres sur la ligne numérique. Pour Emma, une amélioration de la précision numérique est également observée après l'intervention pour toutes les lignes travaillées (0-10, 0-20 et 0-100). Aussi, une diminution du temps de réponse est observée pour la ligne 0-10, suggérant que les processus menant à une amélioration de la précision sont automatisés pour cette amplitude numérique. Ces résultats sont en adéquation avec les études évaluant l'effet d'intervention ciblant la ligne numérique avec des personnes DT et ayant un TAM sur l'estimation de nombres sur une ligne numérique (Dejonckheere et al., 2015 ; Honoré & Noël, 2016 ; Huber et al., 2015 ; Kucian et al., 2011 ; Laski & Siegler, 2014 ; Link et al., 2013 ; Michels et al., 2018 ; Moeller et al., 2015 ; Opfer & Siegler, 2007 ; Ramani & Siegler, 2008, 2011 ; Ramani et al., 2012 ; Siegler & Ramani, 2008, 2009 ; Whyte & Bull, 2008). Cependant, la présente étude permet d'étendre les résultats passés en montrant que l'intervention proposée via *DéCaLigne* ciblant la précision sur ligne numérique est, en partie à tout le moins, en mesure d'améliorer la vitesse de réponse suggérant ainsi l'automatisation des processus de traitement numérique.

Selon l'hypothèse 2, nous espérions que les enfants TAM amélioreraient leurs performances en calcul (généralisation de l'intervention). Les profils sont similaires pour Lucas et Emma. Malheureusement, aucune amélioration de la précision de calcul sur ligne n'est relevée, ceci pouvant être expliqué par un PAE et un score déjà élevés lors du premier jeu effectué avec les nombreuses aides externes comme les repères et les graduations (moins de 1,70% d'erreur pour le PAE ; entre 18 et 20/20 pour le score pour Lucas ; moins de 5,39% d'erreur pour le PAE ; entre 18 et 20/20 pour le score pour Emma). En revanche, une diminution du temps est observée pour chacun (0-20 et 0-100 pour Lucas ; 0-10 pour Emma), suggérant ainsi une automatisation des stratégies de calcul sur ligne. De même, aucune amélioration de la précision en calcul mental simple n'est malheureusement relevée chez les deux jeunes. À nouveau, ceci peut s'expliquer par un score déjà élevé aux deux pré-tests (au-dessus de 22/24). Contrairement à Lucas, Emma montre une diminution du temps signant une automatisation des stratégies. Enfin, une amélioration est observée pour le calcul complexe (sans amélioration du temps) chez les deux jeunes, suggérant la mise en place de stratégies pour la résolution des opérations menant

à la diminution des erreurs de calcul. Ces résultats sont en adéquation avec la corrélation trouvée entre la ligne numérique et les performances en arithmétique dans la méta-analyse de Schneider et al. (2018) et avec ceux de Dietrich et al., (2016) qui suggèrent d'ailleurs que la relation entre ligne numérique et arithmétique est due à la compréhension de la numération à valeur positionnelle permettant à l'enfant de mettre en place des stratégies de calcul sur ligne numérique. Les résultats de la présente étude démontrent ainsi qu'entraîner la précision numérique sur une ligne améliore les capacités de calcul et, en cela, suggèrent une relation de causalité de la ligne numérique vers le calcul mental.

Selon l'hypothèse 3, nous espérions que les enfants TAM maintiendraient leurs progrès et stabiliseraient leurs performances en placement de nombres sur la ligne numérique et en calcul (maintien). Les résultats de la présente étude montrent effectivement que l'entraînement de la ligne numérique via le programme *DéCaLigne* améliore la précision numérique et arithmétique après un mois. Pour Lucas, la stabilité du PAE, du score et du temps entre les deux post-tests atteste d'un maintien des performances en estimation de nombres sur la ligne numérique un mois après l'intervention ; la même observation est faite quant au score en calcul complexe. Une augmentation du temps (moins bonne performance) est notée en calcul sur ligne entre 0 et 20 entre le premier et le deuxième post-test, suggérant par exemple la mise en place de stratégies. Pour Emma, la stabilité du PAE, du score et du temps entre les deux post-tests atteste d'un maintien des performances en précision numérique et arithmétique un mois après l'intervention. Ces résultats sont en adéquation avec les observations de Kucian et al. (2011) selon lesquelles les enfants TAM de 8 à 10 ans maintenaient leurs précisions numérique et arithmétique après une période de cinq semaines. La présente étude étend les résultats et montre que l'intervention proposée via *DéCaLigne* ciblant la précision sur ligne numérique est en mesure de maintenir les acquis concernant la précision numérique et arithmétique des enfants TAM de 8 et de 15 ans encore un mois après l'intervention. Elle est aussi en accord avec l'étude de Kang et al. (2019) qui affirme l'importance de l'introduction de stratégies pour permettre un meilleur maintien des progrès et ainsi minimiser l'oubli et la disparition des effets de l'intervention.

Selon l'hypothèse 4, nous espérions que les enfants TAM n'amélioreraient pas leurs performances sur des notions non ciblées comme la résolution de multiplications et la lecture de nombres (mesures de contrôle). Aucun des deux jeunes ne s'améliore en multiplication. Contrairement à Emma, Lucas ne s'améliore pas en lecture de nombres non plus. Ce résultat non attendu pour Emma peut s'expliquer par le fait que la jeune fille est jeune et encore en début d'apprentissage, ses performances en lecture seraient encore soumises à une évolution due à la simple exposition aux stimuli. Les résultats suggèrent ainsi que l'intervention proposée est spécifique à la précision numérique et à la résolution d'opérations d'addition et de soustraction. D'ailleurs, ils sont en adéquation avec l'étude de Mathieu et al. (2016) qui montre que, chez l'adulte, les résolutions d'opérations arithmétiques d'addition et de soustraction, mais pas de multiplication, sont associées à la représentation linéaire horizontale de la ligne numérique. Bien que l'objectif ne fût pas celui-ci, les résultats de la présente étude étendent ceux de Mathieu et al. (2016) en montrant une indépendance entre ligne numérique et multiplication. L'ensemble des résultats permet d'affirmer que l'intervention est spécifique aux compétences ciblées – précision numérique et calcul mental – et que les améliorations sont dues, non pas à la maturation naturelle ou à un effet de motivation, mais bien à l'intervention proposée.

Selon l'hypothèse 5, nous espérons que les enfants TAM apprécieraient l'intervention et le logiciel informatique *DéCaLigne* (mesure de la validité sociale). Les deux jeunes sont satisfaits de l'intervention effectuée à hauteur de 87,5%.

En résumé, les résultats montrent que, dans l'ensemble, les deux jeunes ont amélioré leur précision numérique et leur capacité de calcul, qu'un maintien des effets de l'intervention est possible un mois après la fin de l'intervention et que ces effets sont spécifiquement liés à l'intervention proposée.

## 2. Limites de l'étude

Malgré les résultats encourageants, l'étude réalisée présente quelques limites. Un ensemble de limites méthodologiques doit être souligné. Premièrement, le design expérimental (étude de cas multiples) et le nombre de participants (deux) sont à considérer prudemment dans l'interprétation scientifique des résultats et la portée à la pratique clinique. En effet, même si l'étude de cas est de prime importance, il est impératif de reproduire les résultats avec d'autres études de cas (Horner et al., 2005) ou un échantillon plus important (Gersten et al., 2005). Deuxièmement, si ce protocole permet de montrer l'efficacité de l'intervention ciblée avec *DéCaLigne*, il ne permet pas pour autant de distinguer quelle(s) composante(s) – entre les exercices, les feedbacks et la mise en place de stratégies – permet(tent) l'efficacité et donne(nt) le meilleur apport pour l'amélioration des capacités des jeunes ayant un TAM en précision numérique (c'est-à-dire en placement de nombres) et en calcul mental. En effet, le protocole doit être considéré globalement comme étant un programme d'intervention orthophonique efficace permettant d'aboutir à de meilleures performances, et ce dans toutes ces modalités. Troisièmement, l'évaluation du maintien des performances s'est effectuée seulement un mois après la fin de l'intervention alors qu'il faudrait évaluer le maintien plusieurs mois après l'intervention dans la mesure où un des objectifs est que les patients maintiennent leurs progrès longtemps après l'arrêt du suivi orthophonique.

Une autre limite concerne l'interprétation des résultats en termes de généralisation au calcul. Premièrement, le score en calcul simple n'a pas évolué favorablement. Ces résultats peuvent être dus aux scores déjà très élevés en calcul simple : ainsi, les deux jeunes n'avaient pas suffisamment de marge de progrès pour les calculs simples au niveau du score pour une amélioration significative. De plus, le temps en calcul complexe n'a pas évolué favorablement. La courte durée de l'intervention aurait pu ne pas suffire pour que les deux jeunes ayant un TAM automatisent leurs stratégies de calcul et améliorent leur temps de calcul.

Enfin, une dernière limite a trait à la reproductibilité et la faisabilité du protocole dans le milieu clinique. Le programme correspond peu à la pratique orthophonique actuelle (30 minutes une à deux fois par semaine).

## 3. Implications cliniques

Les résultats de cette étude sont encourageants et ont des implications pour la pratique clinique orthophonique. En effet, les progrès notés pour les deux enfants ayant un TAM montrent qu'une intervention intensive (trois séances par semaine), courte (un mois), adaptée, individualisée et ciblée sur la ligne numérique est efficace pour l'amélioration des performances en précision numérique et arithmétique. De plus, l'appréciation des enfants à la fin de l'intervention montre qu'ils ont apprécié ces modalités d'intervention et qu'ils constatent que les exercices et les explications les ont aidés à progresser.

Toutefois, selon Horner et al. (2005), une pratique peut être reconnue comme probante lorsqu'elle a été testée et montrée efficace par un minimum de cinq études de cas de qualité méthodologique acceptable, par trois chercheurs différents, dans trois lieux géographiques différents, pour un total minimum de vingt personnes. Dans l'état, l'intervention décrite et montrée efficace dans cette étude est plus que prometteuse mais ne peut être reconnue comme pratique probante. Les résultats suggèrent de poursuivre les études<sup>1</sup>.

#### 4. Perspectives et recherche

Les résultats de cette étude sont encourageants et permettent ainsi d'ouvrir différents axes d'études futures. Tout d'abord, pour faire suite à ce qui a été exposé dans les implications cliniques, il serait logique et intéressant de répliquer le protocole avec un plus grand nombre de participants, par différents testeurs et à différentes localisations géographiques (Horner et al., 2005). De plus, dans l'objectif de tester l'efficacité de l'intervention décrite sur le calcul simple, un recrutement ciblé d'enfants ayant de grandes difficultés en calcul simple pourrait être envisagé. Il serait également intéressant d'inclure dans le protocole une mesure de maintien à trois mois, six mois ou encore un an. Enfin, afin de déterminer quelle(s) composante(s) du programme représente(nt) la meilleure chance d'efficacité, il faudrait établir un protocole où l'on puisse comparer les différentes composantes (ex : exercices particuliers, type de feedback particulier, etc.) et modalités (ex : durée, fréquence, etc.).

---

<sup>1</sup> Nous encourageons d'ailleurs les orthophonistes qui utiliseraient ce protocole ou un autre protocole avec *DéCaLigne* à documenter les progrès de leurs patients et à communiquer les résultats.

----- BIBLIOGRAPHIE -----

American Psychiatric Association. (2016). *DSM-5 – Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux* (traduit par J.-D. Guelfi et M.-A. Crocq). Elsevier Masson.

Andersson, U., & Östergren, R. (2012). Number magnitude processing and basic cognitive functions in children with mathematical learning disabilities. *Learning and Individual Differences*, 22(6), 701-714. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.05.004>

Ashkenazi, S., & Henik, A. (2010). A disassociation between physical and mental number bisection in developmental dyscalculia. *Neuropsychologia*, 48(10), 2861-2868. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2010.05.028>

Bartelet, D., Ansari, D., Vaessen, A., & Blomert, L. (2014). Cognitive subtypes of mathematics learning difficulties in primary education. *Research in Developmental Disabilities*, 35(3), 657-670. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2013.12.010>

Cattini, J., & Clair-Bonaimé, M. (2017). Les apports de l’Evidence-Based Practice et de la Practice-Based Evidence : du bilan initial à l’auto-évaluation du clinicien. *Rééducation Orthophonique*, 272, 109-146.

Cress, U., Fischer, U., Moeller, K., Sauter, C., & Nuerk, H.-C. (2010). *The use of a digital dance mat for training kindergarten children in a magnitude comparison task*. ICLS '10: Proceedings of the 9th International Conference of the Learning Sciences, vol. 1 (pp.105-112). International Society of the Learning Sciences.

Crollen, V., Noël, M.-P., Honoré, N., Degroote, V., & Collignon, O. (2018). Investigating the respective contribution of sensory modalities and spatial disposition for arithmetic teaching. PsyArXiv PrePrints: <https://doi.org/10.31234/osf.io/nqmt2>

de Souza Salvador, L., Moura, R., Wood, G., & Haase, V. G. (2019). Cognitive heterogeneity of math difficulties: A bottom-up classification approach. *Journal of Numerical Cognition*, 5(1), 55-85. <https://doi.org/10.5964/jnc.v5i1.60> accès ouvert

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

Dehaene, S. (2010). *La bosse des maths*. Odile Jacob.

Dejonckheere, P. N., Smitsman, A., Desoete, A., Haeck, B., Ghyselinck, K., Hillaert, K., & Coppenolle, K. (2015). Early math learning with tablet PCs: The role of action. *European Journal of Psychology and Educational Studies*, 2(3), 79-87. <https://doi.org/10.4103/2395-2555.190477> accès ouvert

Desoete, A., Praet, M., Titeca, D., & Ceulemans, A. (2013). Cognitive phenotype of mathematical learning disabilities: What can we learn from siblings? *Research in Developmental Disabilities*, 34(1), 404-412. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2012.08.022>

- Dietrich, J. F., Huber, S., Dackermann, T., Moeller, K., & Fischer, U. (2016). Place-value understanding in number line estimation predicts future arithmetic performance. *British Journal of Developmental Psychology*, 34(4), 502-517. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12146>
- 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> accès ouvert
- Fischer, U., Moeller, K., Huber, S., Cress, U., & Nuerk, H.-C. (2015). Full-body movement in numerical trainings: A pilot study with an interactive whiteboard. *International Journal of Serious Games*, 2(4), 23-35. <https://doi.org/10.17083/ijsg.v2i4.93> accès ouvert
- Forster, K. I., & Forster, J. C. (2003). DMDX: A windows display program with millisecond accuracy. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 35(1), 116-124. <https://doi.org/10.3758/BF03195503> accès ouvert
- 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>  
Accès ouvert sur PMC: [18473200](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/18473200/)
- Gersten, R., Fuchs, L. S., Compton, D., Coyne, M., Greenwood, C., & Innocenti, M. S. (2005). Quality indicators for group experimental and quasi-experimental research in special education. *Exceptional children*, 71(2), 149-164. <https://doi.org/10.1177/001440290507100202>
- Helloin, C. & Lafay, A. (2018). *DéCaLigne, un programme d'intervention pour la Découverte du Calcul avec la Ligne numérique*. HappyNeuron.
- Honoré, N., & Noël, M.-P. (2016). Improving preschoolers' arithmetic through number magnitude training: The impact of non-symbolic and symbolic training. *PLoS One*, 11(11), e0166685. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0166685> accès ouvert
- Horner, R. H., Carr, E. G., Halle, J., McGee, G., Odom, S., & Wolery, M. (2005). The use of single-subject research to identify evidence-based practice in special education. *Exceptional Children*, 71(2), 165-179. <https://doi.org/10.1177/001440290507100203>
- Huber, S., Sury, D., Moeller, K., Rubinsten, O., & Nuerk, H.-C. (2015). A general number-to-space mapping deficit in developmental dyscalculia. *Research in Developmental Disabilities*, 43-44, 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.ridd.2015.06.003>
- Kang, C. Y., Duncan, G. J., Clements, D. H., Sarama, J., & Bailey, D. H. (2019). The roles of transfer of learning and forgetting in the persistence and fadeout of early childhood mathematics interventions. *Journal of Educational Psychology*, 111(4), 590-603. <https://doi.org/10.1037/edu0000297>
- 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>

Lafay, A., Helloin, C. (2016). *Examath 8-15*. HappyNeuron.

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

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

Laski, E. V., & Siegler, R. S. (2014). Learning from number board games: You learn what you encode. *Developmental Psychology*, 50(3), 853-864. <https://doi.org/10.1037/a0034321>

Fédération Nationale des Orthophonistes - FNO (s. d.). Les textes réglementant la formation initiale : décret 2013-798 et annexes. <http://www.fno.fr/lorthophonie/fno-formation-initiale/les-textes-reglementant-la-formation-initiale/>

Li, Q., & Ma, X. (2010). A meta-analysis of the effects of computer technology on school students' mathematics learning. *Educational Psychology Review*, 22(3), 215-243. <https://doi.org/10.1007/s10648-010-9125-8>

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>

Maillart, C., & Durieux, N. (2012). Une initiation à la méthodologie « Evidence-Based Practice ». Illustration à partir d'un cas clinique. Dans *Les Dysphasies : de l'évaluation à la rééducation* (pp. 129-152). Elsevier Masson. <http://hdl.handle.net/2268/118673>

Marcon, L., & Lafay, A. (2019). Troubles des apprentissages en mathématiques et ligne numérique : revue systématique de la littérature. *Glossa*, 124, 34-52.

Mathieu, R., Gourjon, A., Couderc, A., Thevenot, C., & Prado, J. (2016). Running the number line: Rapid shifts of attention in single-digit arithmetic. *Cognition*, 146, 229-239. BBL-Lab: [http://bbl-lab.fr/wp-content/uploads/2018/08/Mathieu\\_Cognition\\_inpress.pdf](http://bbl-lab.fr/wp-content/uploads/2018/08/Mathieu_Cognition_inpress.pdf)

Michels, L., O'Gorman, R., & Kucian, K. (2018). Functional hyperconnectivity vanishes in children with developmental dyscalculia after numerical intervention. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 30, 291-303. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.03.005> accès ouvert

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>

- Namkung, J. M., & Fuchs, L. S. (2012). Early numerical competencies of students with different forms of mathematics difficulty / Compétences numériques précoces des élèves ayant différentes formes de difficultés mathématiques. *Learning Disabilities Research & Practice*, 27(1), 2-11. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5826.2011.00345.x> accès ouvert en français sur : [PMC3310371](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23310371/)
- Opfer, J. E., & Siegler, R. S. (2007). Representational change and children's numerical estimation. *Cognitive Psychology*, 55(3), 169-195. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2006.09.002> accès ouvert sur [sieglertc.columbia.edu](http://sieglertc.columbia.edu)
- Ramani, G. B., & Siegler, R. S. (2008). Promoting broad and stable improvements in low-income children's numerical knowledge through playing number board games. *Child Development*, 79(2), 375-394. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.01131.x> accès ouvert sur [sieglertc.columbia.edu](http://sieglertc.columbia.edu)
- Ramani, G. B., & Siegler, R. S. (2011). Reducing the gap in numerical knowledge between low- and middle-income preschoolers. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 32(3), 146-159. <https://doi.org/10.1016/j.appdev.2011.02.005> accès ouvert sur [sieglertc.columbia.edu](http://sieglertc.columbia.edu)
- Ramani, G. B., Siegler, R. S., & Hitti, A. (2012). Taking it to the classroom: Number board games as a small group learning activity. *Journal of Educational Psychology*, 104(3), 661-672. <https://doi.org/10.1037/a0028995> accès ouvert sur [sieglertc.columbia.edu](http://sieglertc.columbia.edu)
- Rodriguez, D., Parmar, R. S., & Signer, B. R. (2001). Fourth-grade culturally and linguistically diverse exceptional students' concepts of number line. *Exceptional Children*, 67(2), 199-210. <https://doi.org/10.1177/001440290106700205>
- Schelstraete, M-A. (2011). Méthodologie de l'intervention clinique. Dans *Traitements du langage oral chez l'enfant. Interventions et indications cliniques* (pp. 29-56). Elsevier Masson. <https://doi.org/10.1016/B978-2-294-71450-4.00002-8>
- 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> accès ouvert sur Schneider, Université de Trier.
- Sella, F., Lucangeli, D., Zorzi, M., & Berteletti, I. (2013). Number line estimation in children with developmental dyscalculia. *Learning Disabilities: A contemporary Journal*, 11(2), 41-49.
- Sheridan, R., van Rooijen, M., Giles, O., Mushtaq, F., Steenbergen, B., Mon-Williams, M., & Waterman, A. (2017). Counting on the mental number line to make a move: sensorimotor ('pen') control and numerical processing. *Experimental Brain Research*, 235(10), 3141-3152. <https://doi.org/10.1007/s00221-017-5019-z> accès ouvert
- Siegler, R. S. (2016). Magnitude knowledge: The common core of numerical development. *Developmental Science*, 19(3), 341-361. <https://doi.org/10.1111/desc.12395> accès ouvert

Siegler, R. 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> accès ouvert sur [sieglertc.columbia.edu](http://sieglertc.columbia.edu)  
Erratum. *Developmental Science*, *11*(6), 895. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00777.x>

Siegler, R. 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> accès ouvert sur [sieglertc.columbia.edu](http://sieglertc.columbia.edu)

Soares, N., Evans, T., & Patel, D. R. (2018). Specific learning disability in mathematics: A comprehensive review. *Translational Pediatrics*, *7*(1), 48-62. <https://doi.org/10.21037/tp.2017.08.03>

van Viersen, S., Slot, E. M., Kroesbergen, E. H., van't Noordende, J. E., & Leseman, P. P. M. (2013). The added value of eye-tracking in diagnosing dyscalculia: a case study. *Frontiers in Psychology*, *4*, 679. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2013.00679> accès ouvert

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> accès ouvert

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>

Wong, T. T.-Y., Ho, C. S.-H., & Tang, J. (2017). Defective number sense or impaired access? Differential impairments in different subgroups of children with mathematics difficulties. *Journal of Learning Disabilities*, *50*(1), 49-61. <https://doi.org/10.1177/0022219415588851>

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>

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> accès ouvert