

MEMOIRE

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

Laura MOHAMED

soutenu publiquement en juin 2019

Développement des prérequis mathématiques en maternelle

**Analyse des effets des différents supports (jeux de plateau et
tablettes) sur les compétences mathématiques**

MEMOIRE dirigé par

Sandrine MEJIAS, Enseignant-Chercheur, Université de Lille, Lille

Lille – 2019

Remerciements

Je tiens tout d'abord à remercier ma directrice de mémoire, Madame Sandrine MEJIAS, pour son soutien, son écoute, sa disponibilité, sa bienveillance et ses précieux conseils.

Je remercie aussi les directeurs des écoles et les enseignants pour leur accueil et leur disponibilité, ainsi que les enfants et leurs parents pour leur participation.

Un grand merci à toutes mes camarades de cinquième année qui ont participé à ce projet, ainsi qu'aux étudiantes qui nous ont précédées. Je remercie particulièrement Emeline CHAMBON pour son aide, sa motivation et sa bonne humeur qui ont rendu cette expérience si intéressante.

Je remercie également mes maîtres de stage pour leur confiance et les savoirs qu'elles m'ont donnés.

Je tiens aussi à remercier les membres du jury pour le temps accordé à la lecture de mon mémoire.

Un grand merci à mes amies pour m'avoir accompagnée dans cette aventure ces cinq dernières années, elles n'auraient pas été les mêmes sans vous.

Enfin, j'adresse un immense merci à mes proches et ma famille pour leur soutien et leur patience. Je remercie particulièrement ma mère, Christine, pour son soutien inconditionnel, ses encouragements et sa confiance sans limite. Merci d'avoir autant cru en moi.

Résumé :

Les avantages de l'emploi des jeux comme support des apprentissages ont été démontrés et ces derniers ont donc été intégrés dans les programmes scolaires. Mais ces dernières années, avec l'avancée des nouvelles technologies, l'utilisation du numérique a aussi trouvé sa place dans le développement des apprentissages formels. L'objectif de cette étude est de montrer les bénéfices d'une intervention précoce sur les compétences mathématiques, et plus particulièrement l'impact des différents supports utilisés (papier/crayon et tablette). 157 enfants de moyenne et grande section de maternelle, issus d'un milieu socio-scolaire moyen à élevé, ont participé au projet « Kids e-stim ». Un pré-test a été proposé afin d'établir leur niveau de compétences dans les domaines général et spécifique aux mathématiques, et de les répartir en trois groupes pour les entraînements pendant huit semaines : « pré-mathématiques papier/crayon », « pré-mathématiques tablette » et « habiletés visuo-spatiales ». Enfin, ils ont été retestés immédiatement et plusieurs mois après afin d'observer les effets de ces entraînements. Les résultats suggèrent un bénéfice des tâches proposées sur le développement des compétences mathématiques. Néanmoins, aucun des deux supports utilisés ne semble être à privilégier par rapport à l'autre. La poursuite de l'étude cherchera à appliquer cette méthodologie chez des enfants de maternelle issus d'un milieu socio-scolaire défavorisé. Cette comparaison permettra d'observer s'il existe des différences sur l'importance des effets de l'entraînement et sur l'impact des supports (jeux de société et tablette) entre les deux milieux.

Mots-clés :

Prérequis mathématiques, jeux de plateau, tablette, maternelle.

Abstract :

Benefits of using games as a support for school learnings have been demonstrated and therefore these have been integrated in school curricula. However, regarding their recent advances, new digital technology also has found their place in the development of formal learnings. The aim of this study is to show benefits of early intervention on mathematical skills, and more specifically the impact of using different media (paper-and-pencil and tablet). 157 2nd-and-3rd grade children of kindergarten, from middle-to-high socio-academic environment, were enrolled in the project « Kids e-stim ». A pre-test was proposed in order to establish their skills level in domain-general and specific to mathematics, and to spread them in three groups for an 8 weeks training period : « pre-mathematical paper-and-pencil », « pre-mathematical tablet » and « visuo-spatial skills ». Finally, they were retested immediately and several months after the training period in order to observe the training's effects. The results suggest a benefit of the proposed tasks on the development of mathematical skills. However, neither of the two media used seems to be preferable to the other. The pursuit of the study will seek to apply this methodology to kindergarten's children from a low socio-academic environment. This comparison will allow us to observe if there are differences on the importance of training's effects and on the impact of media (board games and tablet) between the two environments.

Keywords :

Mathematics prerequisite, board games, tablet, kindergarten.

Table des matières

Introduction.....	1
Contexte théorique, buts et hypothèses.....	2
1. Les prérequis nécessaires au développement des compétences mathématiques.....	2
1.1. Dénombrement.....	2
1.2. Ligne numérique mentale.....	2
1.3. Transcodage.....	3
1.4. Arithmétique (addition et soustraction) simple.....	5
1.5. Mémoire de travail.....	5
1.6. Aptitudes visuo-spatiales.....	6
1.7. Gnosies digitales.....	7
2. L'utilisation d'un média classique et les compétences mathématiques.....	8
2.1. L'importance des jeux dans les apprentissages.....	8
2.2. La place des jeux dans le développement des compétences mathématiques.....	9
3. L'utilisation d'un média électronique et les compétences mathématiques.....	10
3.1. Débat autour des outils électroniques dans les apprentissages scolaires.....	10
3.2. Le média électronique et les compétences mathématiques.....	11
4. Buts et hypothèses.....	12
Méthode.....	12
1. Population.....	13
2. Procédure.....	14
3. Matériel.....	15
3.1. Pré-test.....	15
3.2. Entraînements.....	16
3.3. Post-test.....	17
3.4. Batterie de maintien.....	17
Résultats.....	18
Discussion.....	19
Conclusion.....	24
Bibliographie.....	25
Liste des annexes.....	27
Annexe n°1 : Lettre d'information, autorisation parentale et questionnaire.....	27
Annexe n°2 : Progression des entraînements.....	27
Annexe n°3 : Résultats aux pré-tests des groupes PMPC et PMT.....	27
Annexe n°4 : Résultats aux post-tests des groupes PMPC et PMT.....	27
Annexe n°5 : Comparaison des résultats obtenus aux pré- et post-tests des groupes PMPC et PMT.....	27
.....	27

Introduction

Les situations faisant intervenir le système numérique sont courantes dans notre vie quotidienne (lire l'heure, rendre la monnaie, etc.) et elles interviennent dès le plus jeune âge, avant même les premiers apprentissages formels apportés par l'école.

Déjà chez le nouveau-né, on relève la présence d'un système de traitement numérique exact et approximatif faisant partie du code analogique. Puis, d'autres représentations sont amenées à se développer avec la stimulation familiale et la scolarité (Thevenot & Fayol, 2018). Ces compétences précoces en mathématiques sont fortement prédictives des apprentissages et des résultats futurs dans ce domaine. En effet, si des enfants présentent un décalage dans ces habiletés de base lors de l'entrée à l'école, alors il y a un risque élevé que celui-ci s'agrandisse et perdure pendant toute la scolarité. C'est pourquoi l'intervention précoce est importante et doit être réalisée à l'aide de toutes les ressources disponibles (Cornu, Schiltz, Pazonki, & Martin, 2017).

Les jeux sont indispensables au développement de l'enfant, ils lui permettent de découvrir et d'explorer ce qui l'entoure, et surtout ils sont une source de plaisir. Ainsi, le recours aux jeux en école maternelle a été intégré dans les programmes scolaires, il sert alors de support aux apprentissages explicites (jeu structuré) et informels (jeu libre ; Ministère de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, 2015). Ils représentent d'ailleurs de bons outils de travail dans le domaine des mathématiques (Ministère de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, 2016).

Avec l'évolution de notre société, les nouvelles technologies font partie intégrante de notre vie quotidienne. Elles représentent un nouveau support pour créer des activités ludiques et attrayantes pour les enfants. Leur utilisation est d'ailleurs acceptée, dès la maternelle, comme support d'apprentissage (Ministère de l'Education Nationale et de la Recherche, 2002). Néanmoins, l'emploi de ces nouvelles technologies dans le cadre de la scolarité fait encore débat et les études actuelles cherchent à établir les effets positifs et négatifs de celles-ci.

Le présent mémoire porte sur l'étude des prérequis mathématiques à développer en maternelle pour faciliter les apprentissages en classe de CP (cours préparatoire). Il se concentre plus particulièrement sur la comparaison des effets bénéfiques des jeux de société (classiques) et des jeux numériques sur tablette (électroniques). Il s'inscrit dans la poursuite d'une série de mémoires débutés durant l'année scolaire 2017/2018.

Ce travail de recherche abordera, premièrement, la question des prérequis nécessaires au bon développement des mathématiques. Puis, il exposera les implications des jeux classiques et numériques dans les apprentissages, et plus particulièrement dans le domaine des mathématiques.

Dans un second temps, la méthodologie relative à la réalisation de l'étude sera présentée (population, procédure et matériel).

Enfin, ce travail se conclura par la présentation des résultats et leur discussion.

Contexte théorique, buts et hypothèses

1. Les prérequis nécessaires au développement des compétences mathématiques

Les différents domaines, présentés ci-dessous, font partie du protocole de passation de l'étude réalisée dans le cadre de ce projet. La mémoire de travail, les aptitudes visuo-spatiales et les gnosies digitales relèvent du domaine général (non spécifique aux mathématiques). Alors que les autres prérequis étudiés dans cette partie (le dénombrement, la ligne numérique mentale, le transcodage et l'arithmétique) entrent dans ce domaine spécifique aux mathématiques.

Plusieurs études ont été réalisées afin de montrer que des facteurs du domaine général et du domaine des mathématiques influencent les performances numériques et arithmétiques des enfants. L'implication de ces derniers dans les apprentissages n'est pas indépendante, au contraire il existe des interactions entre tous ces prérequis (Knops, Nuerk, & Göbel, 2017). C'est pour cette raison que de multiples hypothèses peuvent être fournies afin de tenter de rendre compte des difficultés en mathématiques rencontrées par certains enfants (Thevenot & Fayol, 2018).

1.1. Dénombrement

Le dénombrement est un procédé utilisé par l'enfant afin d'énoncer la chaîne numérique verbale et le nombre d'objets d'une collection. Il permet de se représenter exactement une quantité (Habib, 2014). Cette activité de dénombrement repose sur la maîtrise des cinq principes de Gallistel et Gelman (1992) : la correspondance terme à terme, l'ordre stable, la cardinalité, l'abstraction et la non-pertinence de l'ordre.

Il nécessite deux capacités fondamentales : la chaîne numérique verbale et le pointage (Pesenti & Rousselle, 2005). La chaîne numérique verbale correspond à la suite des noms de nombres, généralement apprise sous la forme d'une comptine entre deux et six ans (à partir de deux ans, l'enfant sait distinguer les mots-nombres des autres mots). Celle-ci permet à l'enfant de mémoriser un stock de mots-nombres, classés par ordre croissant, qu'il pourra réutiliser plus tard (Van Hout, 2005). Cet apprentissage débute dans le milieu familial et se poursuit pendant les premières années de scolarisation. Le pointage permet à l'enfant de retenir les objets déjà dénombrés et d'apporter un soutien à la mise en place de la correspondance terme à terme (Pesenti & Rousselle, 2005).

La maîtrise de la compétence de dénombrement est importante pour réaliser, par la suite, des activités de calcul et pour l'apprentissage de la numération (Van Hout, 2005).

1.2. Ligne numérique mentale

La ligne numérique mentale correspond à la représentation interne du système du nombre approximatif, qui permet d'appréhender de manière exacte les petites quantités et de façon approximative les plus grandes, avant le début des apprentissages explicites (ex. Habib, 2014 : Figure 1).

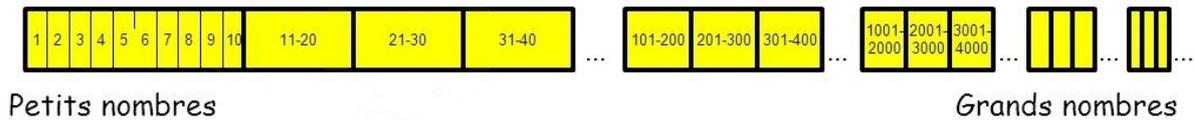


Figure 1. Ligne numérique mentale (de forme logarithmique).

Elle est décrite comme une droite où les quantités sont alignées et rangées de manière croissante (de la gauche vers la droite). Elle est logarithmique (compressée lorsqu'on va vers la droite, soit pour les plus grands nombres). Elle se caractérise par un effet de taille (il est plus facile de différencier deux nombres de petites quantités, ex. 3 versus 5 que 70 versus 72) et un effet de distance (il est plus rapide de discriminer deux nombres aux quantités éloignées, ex. 4 versus 15 que 20 versus 22). De plus, on trouve aussi l'effet SNARC (Spatial Numerical Association of Response Code) ; il justifie l'organisation spatiale de la ligne de gauche (petits nombres) à droite (grands nombres). En effet, on observe des temps de réponse plus rapides en jugement de parité si les petites numérosités sont associées à la main gauche et les grandes à la main droite (Habib, 2014).

Au cours du développement et en fonction de l'éducation, cette ligne numérique mentale sera représentée de façon linéaire (avec la même distance entre toutes les quantités ; Beteletti, Lucangeli, Piazza, Dehaene, & Zorzi, 2010). Ce changement a lieu entre la maternelle et le CE1 pour les numérosités de 0 à 100, et entre le CE1 et le CM1 pour les nombres de 0 à 1 000 (Booth & Siegler, 2008).

La ligne numérique mentale joue aussi un rôle dans le développement de l'arithmétique. En effet, une relation positive existe entre les performances à la ligne numérique mentale et celles en comptage, en comparaison de quantités et en résolution de problèmes arithmétiques (Booth & Siegler, 2008).

1.3. Transcodage

Le transcodage est un processus consistant à passer d'un code « source » à un code « de sortie » (Noël, 2005). Dehaene (1992 ; cité par Thevenot & Fayol, 2018) a établi l'existence de trois représentations mentales du nombre : le code analogique, le code verbal et le code arabe (Figure 2).

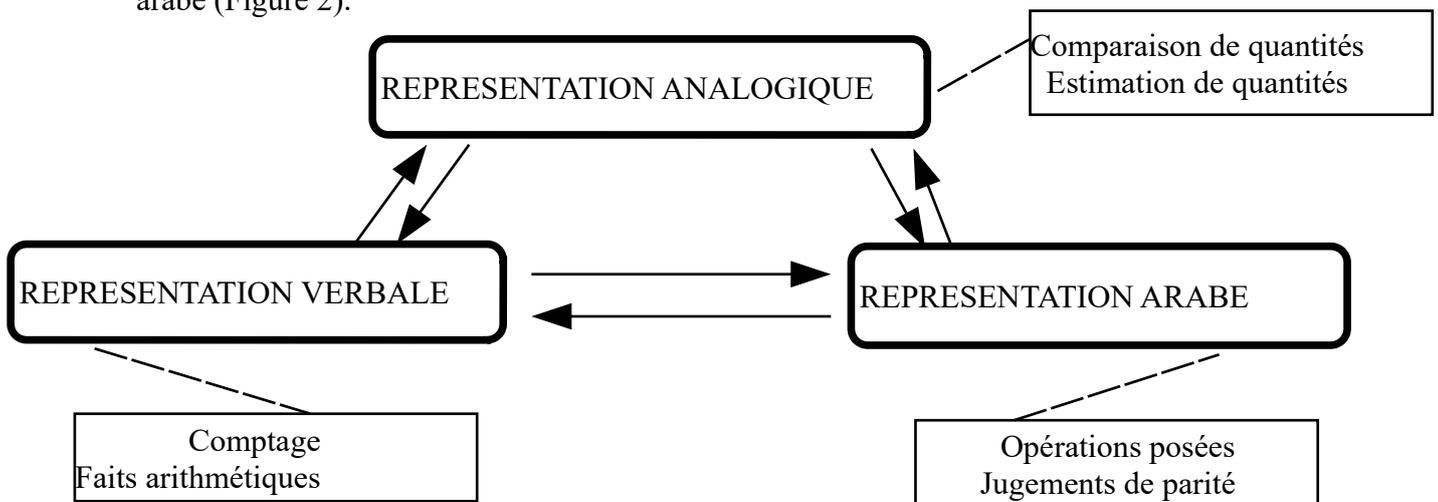


Figure 2. Le modèle du tripe code de Dehaene (issu de Thevenot & Fayol, 2018).

Le code analogique propose une représentation non symbolique du nombre (points, objets, etc.), c'est-à-dire indépendante du langage, permettant au sujet d'accéder au sens du nombre et de réaliser des comparaisons et des estimations de quantités. Il comprend le subitizing (processus rapide et précis pour évaluer les petites quantités, de un à quatre) et le traitement approximatif (procédé peu précis permettant de juger les grands ensembles et qui s'améliore entre trois et six ans sous l'effet de la maturation, de l'environnement et des apprentissages). L'accès à ce code analogique est possible dès la naissance. En effet, il a été démontré que les nouveau-nés étaient capables de discriminer de petites et de grandes quantités (traitement approximatif, à condition que la valeur des deux cibles sont éloignées ; Thevenot & Fayol, 2018).

Le code verbal correspond à la forme orale et écrite des mots nombres, il intervient dans le comptage et les faits arithmétiques (Thevenot & Fayol, 2018). Il se base sur la combinaison des différents termes de vocabulaire (du registre des unités, des dizaines, des particuliers, des multiplicateurs et du zéro) selon les règles syntaxiques spécifiques au système numérique (relations additives et multiplicatives). Le code verbal oral est le premier code que l'enfant apprend, compte tenu du bain de langage dans lequel il évolue. En effet, à deux ans et demi, il sait que les mots-nombres sont une catégorie particulière. Le code verbal écrit intervient plus tard avec les apprentissages scolaires (Noël, 2005).

Le code arabe est la représentation visuelle des chiffres écrits en indo-arabe, il est utilisé dans les opérations et les jugements de parité (Thevenot & Fayol, 2018). Il repose sur la combinaison des dix chiffres existants (de zéro à neuf) associés selon le système positionnel numérique (la position du chiffre dans le nombre définit sa valeur) (Noël, 2005). Ce code est appris de manière explicite lors des apprentissages (dès la maternelle), mais l'enfant y est familiarisé auparavant dans sa vie quotidienne (Thevenot & Fayol, 2018).

Les premières activités de transcodage ont lieu du code analogique vers le code verbal. Elles commencent avec le développement du dénombrement (l'enfant peut compter ses jouets) (Thevenot & Fayol, 2018). Dans une étude, Wynn (1992) a suivi des enfants de deux et trois ans pendant sept mois, elle leur a proposé des tâches impliquant ce transcodage (donner n objets à une poupée, dénombrer des ensembles et désigner l'image correspondant au nombre émis par l'adulte). La numérosité « un » est détectée dès l'âge de deux ans et demi, mais « deux » n'est possible qu'à trois ans. La mise en correspondance entre les représentations mentales des quantités (analogique) et le comptage (verbal) est donc compliquée et nécessite un temps d'acquisition.

Le transcodage entre le code arabe et le code verbal se fait par le biais d'activités de lecture et de dictée. Elles impliquent donc la maîtrise des différents codes numériques obtenue par l'apprentissage réalisé entre cinq et neuf ans. En effet, une étude a été effectuée sur des enfants belges francophones âgés de six à huit ans auxquels des tâches de lecture et d'écriture de nombres arabes ont été proposées. Les enfants de six ans maîtrisent les unités (chiffres de 0 à 9), les nombres à deux chiffres sont acquis à l'âge de sept ans et ceux à trois chiffres sont alors en cours d'apprentissage. Mais il faut attendre l'âge de neuf ans pour que le transcodage entre ces deux codes soit complètement acquis (Noël, 2005).

Dans le transcodage entre le code analogique et le code arabe, l'accès direct entre les deux codes est possible dès trois-quatre ans si la représentation analogique correspond à une configuration canonique (un visuel auquel l'enfant est habitué, comme les points sur un dé).

Cependant, si cette dernière ne l'est pas, alors l'enfant a besoin de passer par le code verbal pour réaliser le transcodage entre les deux autres codes (Thevenot & Fayol, 2018).

1.4. Arithmétique (addition et soustraction) simple

Selon Wynn (1992 ; cité par Thevenot & Fayol, 2018), les bébés sont capables de percevoir les phénomènes arithmétiques simples d'addition et de soustraction et se représenter le résultat de l'opération, dès l'âge de cinq mois. Les enfants ayant participé à l'expérience ont manifesté une réaction lorsque le nombre d'objets derrière le cache n'était pas cohérent avec ce qu'ils avaient pu observer auparavant (ajout et retrait visibles).

A un âge plus avancé mais avant la scolarisation, les enfants se retrouvent aussi face à des situations d'addition et de soustraction dans le jeu. En effet, ils sont amenés à manipuler des jouets (voitures, poupées, etc.) et compter les ensembles constitués.

Les opérations arithmétiques reposent sur la manipulation de symboles (correspondant aux quantités réelles des énoncés de problèmes). Le choix de la stratégie à utiliser pour la résolution dépend des connaissances conceptuelles de l'enfant, des faits arithmétiques mémorisés et des procédures connues (Fayol, 2012).

Pour résoudre des additions, les enfants peuvent avoir recours à différentes stratégies : la simulation par la manipulation d'objets et le dénombrement de ceux-ci (à trois ans), le comptage digital ou verbal (entre quatre et cinq ans), la récupération du résultat en mémoire (à partir de cinq ans). Ce choix va dépendre de la difficulté de l'opération à réaliser et du contexte, l'enfant pouvant avoir recours, à tout instant, à une stratégie antérieure à son âge ou à une nouvelle (Fayol, 2012).

Pour résoudre des soustractions, l'évolution des stratégies suit la même progression que pour les additions. Cependant, la récupération en mémoire n'est effective que pour les plus petites soustractions (ex. 3-2), les enfants utilisant plutôt celle de l'association additive inverse pour les plus grandes opérands (ex. $9+8=17$ pour résoudre 17-8) (Fayol, 2012). C'est à partir de l'âge de neuf ans qu'ils sont capables de choisir la stratégie à utiliser selon les caractéristiques du problème proposé (Thevenot & Fayol, 2018).

Ces différences au niveau de l'âge de développement et du type de méthode utilisée pour résoudre une addition et une soustraction s'expliquent par le fait que cette dernière est moins fréquemment rencontrée dans la vie quotidienne et elle est apprise plus tard que l'addition dans le cursus scolaire (Thevenot & Fayol, 2018).

1.5. Mémoire de travail

La mémoire de travail fait partie de la mémoire à court terme. Elle permet de maintenir une information pendant une durée limitée et de la manipuler. Baddeley (1974 ; cité par Noël, 2005) définit la mémoire de travail selon trois composants : la boucle phonologique (pour la rétention d'une information verbale), le calepin visuo-spatial (pour le stockage d'une information visuo-spatiale) et l'administrateur central (en charge des ressources à allouer au stockage et au traitement des données des deux autres composants).

Cette mémoire de travail est donc indispensable à l'enfant pour apprendre, et elle intervient dans les activités de calcul. En effet, un enfant utilise la chaîne numérique verbale (stockée en mémoire à long terme) et une stratégie de comptage (comptage sur les doigts, à partir d'un des opérands, etc.) afin de déduire la valeur recherchée. Il fait donc intervenir la boucle phonologique pour garder en mémoire les données chiffrées de l'opération, ainsi que

l'administrateur central pour la double tâche de comptage à exécuter (stocker le nombre de pas réalisé et compter pour obtenir le résultat de l'opération ; Noël, 2005).

De plus, une étude sur des enfants de CP a démontré que les capacités de la boucle phonologique et de l'administrateur central, qui avaient été mesurées au début de l'année scolaire, sont de bons prédicteurs des performances en addition (évaluées quatre mois plus tard avec des opérations à un chiffre). En effet, les enfants avec des capacités élevées dans la boucle phonologique sont plus précis et utilisent la récupération des faits arithmétiques dans la mémoire à long terme. Alors que les enfants avec une mémoire de travail aux ressources limitées emploient le comptage sur les doigts et le « comptage du tout » (placer un opérande sur chaque main, par exemple 2 sur la main droite et 4 sur la main gauche, et recompter l'ensemble des doigts pour trouver le résultat ; Noël, 2005).

Enfin, le calepin visuo-spatial intervient aussi dans le développement des compétences mathématiques. En dénombrement, il permet à l'enfant de différencier les éléments déjà comptés de ceux restants. En calcul et résolution de problèmes, le calepin visuo-spatial lui permet de construire une représentation mentale des informations numériques proposées et de pouvoir les manipuler. Néanmoins, la contribution de ce composant diminue avec l'âge, l'enfant change de stratégies de résolution pour utiliser plutôt le verbal. Il peut continuer à passer par le registre visuo-spatial pour les opérations et problèmes complexes (Holmes, Adams, & Hamilton, 2008).

1.6. Aptitudes visuo-spatiales

Les habiletés visuo-spatiales correspondent à la capacité pour un individu de pouvoir positionner et déplacer dans l'espace des objets et lui-même, et de pouvoir comprendre les relations existantes entre eux (Ministère de l'Education de l'Ontario, 2014). Ces aptitudes peuvent être de trois types : la perception spatiale, la rotation mentale et la visualisation spatiale (Cornu et al., 2017).

Un lien a été établi entre les représentations spatiales et numériques car elles partagent les mêmes processus sous-jacents et l'activation d'aires cérébrales similaires (plus spécifiquement au niveau du sillon intrapariétal ; Hubbard, Piazza, Pinel, & Dehaene, 2005). Les capacités visuo-spatiales seraient une base nécessaire aux apprentissages mathématiques effectués au niveau élémentaire (Cornu et al., 2017). Il a été montré qu'elles sont un indicateur de réussite dans le domaine des mathématiques avec une intervention dans l'arithmétique, la résolution de problèmes, la mesure, la géométrie et le calcul (Ministère de l'Education de l'Ontario, 2014). Les habiletés visuo-spatiales semblent également nécessaires pour le développement de la ligne numérique mentale. En effet, sur cette droite, la présentation des nombres respecte une organisation spatiale avec les petites numérosités à gauche et les grandes à droite (correspondant à l'effet SNARC). Elle illustre la relation existante entre les aptitudes visuo-spatiales et les compétences mathématiques (Cheng & Mix, 2014 ; Cornu et al., 2017).

Néanmoins, les avis des chercheurs divergent sur les bénéfices de l'entraînement des compétences visuo-spatiales sur les performances en arithmétique.

Cheng et Mix (2014) ont proposé, à des enfants âgés de six à huit ans, un entraînement unique de rotation mentale, qui a été immédiatement suivi par un test afin d'évaluer les effets. De meilleures performances sont observées (par rapport au groupe contrôle) sur la compétence entraînée et en arithmétique, principalement sur les opérations « à trous ». En

effet, l'entraînement à la rotation mentale a permis aux enfants de pouvoir plus facilement modifier mentalement les équations pour les transformer en une présentation conventionnelle (ex. $6-...=3$ devenant $6-3=...$), mais le testing ayant eu lieu immédiatement après la séance d'entraînement unique, il est impossible de savoir si les effets ont un impact à long terme. Les auteurs font aussi l'hypothèse que cette amélioration en calcul soit liée à un effet de l'entraînement sur les capacités de la mémoire de travail visuo-spatiale (lien existant entre celle-ci et les performances en mathématiques), mais celui-ci était trop court pour valider ce postulat et aucune généralisation n'était observée sur l'épreuve non entraînée.

Hawes, Moss, Caswell, et Poliszczuk (2015) ont reproduit l'étude sur des enfants du même âge et avec le même type d'entraînement, réalisé cette fois sur tablette et sur une période plus longue (dix-huit sessions et post-test une semaine après). Un effet positif est observé dans le domaine visuo-spatial, sur la tâche entraînée et avec une généralisation aux autres non pratiquées (par rapport au groupe contrôle). Néanmoins, les auteurs ne sont pas parvenus à reproduire les résultats significatifs en arithmétique qui avaient été observés dans l'étude précédente.

Cornu, Schiltz, Pazonki, et Martin (2017) ont aussi cherché à évaluer les effets d'un entraînement visuo-spatial sur ces capacités et les performances en mathématiques chez des enfants de maternelle (avec une comparaison à un groupe contrôle). L'étude a été réalisée sur vingt sessions, avec différentes tâches (orientation spatiale, construction et structuration, intégration visuo-motrice) sur tablette. Les auteurs ont observé un effet de l'entraînement sur le même type d'épreuves que celles travaillées pendant les sessions, mais aucun transfert n'a été fait sur les tâches non entraînées en visuo-spatial ni sur les performances mathématiques.

1.7. Gnosies digitales

Les gnosies digitales correspondent à un ensemble de fonctions cognitives relatives à la connaissance des doigts (Habib, 2014).

Le lien entre les gnosies digitales et les compétences mathématiques s'expliquerait, entre autres, par la proximité de ces deux représentations dans le lobe pariétal, ainsi que par la relation fonctionnelle existante entre eux (notamment dans les procédures de comptage ; Marinthe, Fayol, & Barrouillet, 2005).

L'enfant a recours à ses doigts lors de l'apprentissage de la numération et du dénombrement. Il commence à pointer les objets à dénombrer à l'âge de deux ans, mais c'est à partir de quatre ans qu'il devient capable de coordonner le geste avec l'évocation du mot-nombre, une compétence qu'il emploie plutôt pour les collections de taille importante. L'utilisation des doigts permet donc de consolider quatre des cinq principes de dénombrement de Gallistel et Gelman (1992) : la correspondance terme à terme (chaque objet n'est pointé qu'une fois et un mot-nombre lui est attribué), l'ordre stable (l'ordre de la chaîne numérique est toujours le même), l'abstraction (les configurations digitales lors du comptage sur les doigts sont les mêmes, peu importe le type d'objets dénombrés) et la cardinalité (le dernier mot-nombre employé lors du pointage désigne la quantité de l'ensemble ; Guedin, Thevenot, & Fayol, 2018).

Les doigts sont aussi utilisés dans le cadre des opérations arithmétiques, en particulier pour les additions et les soustractions (les multiplications et les divisions font appel aux faits arithmétiques stockés en mémoire à long terme). Ils permettent à l'enfant de passer par la manipulation lors de ces situations (lever ou baisser les doigts selon s'il doit ajouter ou retirer une quantité). Il peut faire appel à différentes stratégies de calcul sur les doigts, qui évoluent

avec l'âge et les apprentissages, pour résoudre les opérations : le « comptage du tout », compter à partir du premier terme (préalablement représenté sur les doigts), représenter les deux quantités à ajouter et compter la somme finale, la reconnaissance des configurations digitales sans passer par le comptage, garder en tête une des deux quantités et compter sur les doigts à partir de celle-ci. Ainsi, l'utilisation des doigts représente une aide pour l'enfant et un signe de réussite ultérieure jusqu'au CP, au-delà l'enfant trouve d'autres stratégies plus efficaces et moins coûteuses (comme la récupération en mémoire à long terme ; Guedin, Thevenot, & Fayol, 2018)

Marinthe, Fayol, et Barrouillet (2005) ont évoqué l'existence d'une corrélation entre les performances aux gnosies digitales et en arithmétique, notamment dans le calcul mental et la résolution de problèmes (des difficultés dans le premier domaine sont un signe prédictif de difficultés ultérieures dans le deuxième). Cependant, Guedin, Thevenot, et Fayol (2018) rapporte que cette corrélation n'est pas significative et que des facteurs interindividuels et interculturels entrent aussi en compte dans le développement de l'arithmétique.

En résumé, divers domaines, général et spécifique, jouent un rôle dans le développement des compétences mathématiques, et des liens et interactions existent entre eux (ex. la ligne numérique mentale et les aptitudes visuo-spatiales). Il apparaît donc essentiel d'identifier ces prérequis afin de les exercer, le plutôt possible, pour faciliter les apprentissages scolaires futurs en mathématiques. Ces prérequis peuvent être travaillés à l'aide de différents supports ludiques comme les jeux de société et les jeux sur tablette.

2. L'utilisation d'un média classique et les compétences mathématiques

Le jeu est une activité nécessaire au développement de l'enfant mais dont la finalité recherchée est le plaisir. Dans cette partie, la notion de média classique renvoie à des jeux de société et de plateau.

2.1. L'importance des jeux dans les apprentissages

L'utilisation du jeu, dans le cadre des apprentissages, est inscrite dans les programmes d'enseignement, comme cela est expliqué dans le Bulletin Officiel du 14 février 2002 : « *Le jeu est l'activité normale de l'enfant. Il conduit à une multiplicité d'expériences sensorielles, motrices, affectives, intellectuelles. [...] Il est le point de départ de nombreuses situations didactiques proposées par l'enseignant. Il se prolonge vers des apprentissages qui, pour être plus structurés, n'en demeurent pas moins ludiques* » (Ministère de l'Education Nationale et de la Recherche, 2002, p.17).

A l'école (principalement en maternelle), le jeu peut permettre à tous les enfants de partager les mêmes connaissances fondamentales nécessaires au développement des apprentissages scolaires ultérieurs. Ainsi, il présente l'avantage de pouvoir réduire les écarts existants entre les enfants du fait des stimulations environnementales du milieu dont ils sont issus. En maternelle, la pédagogie ludique se base sur deux procédés : le jeu libre et le jeu structuré. Dans le premier, l'enfant est en autonomie et il se trouve dans une situation de libre choix, où il évolue à son rythme. Cette configuration lui permet de pouvoir explorer et réaliser des savoirs informels qui seront utilisés dans les apprentissages futurs. L'enseignant est alors

dans une situation d'observation avec des interventions limitées (aménager l'environnement, apporter des éléments de langage par quelques commentaires et inciter l'imitation). Dans le jeu structuré, c'est l'enseignant qui initie l'activité avec un objectif pédagogique précis. Le jeu est donc perçu comme un support d'apprentissage afin de faciliter le sens et l'acquisition de la compétence travaillée (Ministère de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, 2015).

Selon Vauthier (2006), l'enfant est plus actif dans le jeu que dans un enseignement écrit classique. En effet, il apporte une notion de plaisir et un contexte convivial favorisant le rapport aux apprentissages. L'implication, la concentration et la motivation des enfants ont tendance à être plus importantes dans cette situation. Il peut permettre une meilleure compréhension et mémorisation de certaines connaissances par leur application dans la pratique du jeu. Il favorise aussi les relations sociales avec les autres élèves dans le cadre des jeux collectifs. En outre, dans un environnement ludique, l'enfant a moins peur du rapport à l'échec, il ne craint pas de faire des erreurs ou de ne pas savoir répondre (Vauthier, 2006).

2.2. La place des jeux dans le développement des compétences mathématiques

Avec le langage, les mathématiques sont la matière où les jeux sont le plus utilisés. Dans cette discipline, l'objectif final de l'enseignement est la résolution de problèmes et donc la mise en place de stratégies pour y parvenir. Or, cela est possible avec le jeu puisqu'il amène l'enfant à raisonner et prendre des initiatives (faire des choix, anticiper un résultat, réfléchir à la stratégie à employer pour réussir). De plus, il est plus motivant pour l'enfant de faire des exercices sous la forme de jeux, même s'ils sont répétitifs, que plusieurs pages de calcul. Cela facilite la mémorisation des procédures d'arithmétique à mettre en place. De même, le jeu permet aussi d'utiliser, de manipuler et de réinvestir des notions mathématiques vues dans la scolarité, ce qui favorise plus la compréhension que l'apprentissage par cœur. En plus, il aide à développer des compétences qui sont des facteurs de réussite dans les mathématiques (logique, stratégie, rigueur, concentration, mémoire et capacité d'abstraction ; Ministère de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche, 2016).

Ramani et Siegler (2008) ont mené une étude pour évaluer les effets d'un entraînement via des jeux de plateau avec des cases numérotées sur les connaissances numériques. Elle a été réalisée sur 124 enfants de maternelle âgés de quatre à cinq ans et répartis en deux groupes : un groupe d'entraînement avec des plateaux numérotés et un groupe contrôle avec des plateaux comportant seulement des couleurs. L'intervention se faisait en situation duelle (enfant et adulte) avec quatre sessions de quinze-vingt minutes sur deux semaines et une autre session neuf semaines plus tard. Les auteurs ont observé un effet positif de l'entraînement sur les compétences mathématiques, notamment au niveau de la comparaison numérique des quantités, de la ligne d'estimation numérique, du comptage et de la lecture de nombres arabes. De plus, cette amélioration est maintenue à long terme (observable sur la dernière session).

Les parents participent aussi au développement des compétences mathématiques, avant les apprentissages scolaires, à travers les jeux et activités qu'ils expérimentent avec leurs enfants. LeFevre et al. (2009) ont testé 146 enfants canadiens de maternelle en mathématiques (connaissances du système numérique et additions), en compréhension de lexique (pour

connaître les capacités verbales) et en empan visuo-spatial (pour connaître les capacités non verbales). Ils ont ensuite proposé un questionnaire aux parents de ces enfants portant sur leurs attentes scolaires (et notamment au niveau mathématique) et leur implication dans les jeux à la maison. Après la mise en relation de ces données, les auteurs ont noté l'existence d'un lien entre les expériences ludiques réalisées avec les enfants (jeux de plateau, jeux de cartes, utilisation d'un dé, etc ...) et les compétences mathématiques, surtout dans les additions.

3. L'utilisation d'un média électronique et les compétences mathématiques

Ici, le terme « média électronique » renvoie à la notion de TICE (Technologies de l'Information et de la Communication pour l'Enseignement), qui regroupe les outils numériques pouvant être utilisés dans l'éducation (tableau interactif, tablette, manuel numérique, jeux sérieux, etc.).

3.1. Débat autour des outils électroniques dans les apprentissages scolaires

L'emploi des technologies numériques dans le cadre de la scolarité est sujet à controverse depuis plusieurs années. Cependant, le Bulletin Officiel du 14 février 2002 approuve l'utilisation des supports numériques, dès l'école maternelle, à condition qu'elle soit bien encadrée par l'enseignant (Ministère de l'Éducation Nationale et de la Recherche, 2002).

Selon l'enquête PISA (Programme International pour le Suivi des Acquis des élèves) réalisée par l'OCDE (Organisation de Coopération et de Développement Économique, 2001), l'utilisation des technologies numériques dans l'éducation offre des bénéfices dans trois champs différents :

- Économique : la connaissance et la facilité de manipulation de ces outils est une capacité essentielle pour trouver un emploi de nos jours.
- Sociale : la maîtrise du numérique est une condition nécessaire à l'insertion sociale et professionnelle.
- Pédagogique : les technologies numériques permettent d'enrichir les connaissances faites en classe (par l'accès à internet), de consolider les capacités de synthèse et d'analyse, de travailler en groupe et de communiquer. De plus, les élèves ayant participé à l'enquête rapportent que le support numérique augmente la motivation car ils y trouvent une continuité avec la vie quotidienne.

L'enquête mentionne aussi que les nouvelles technologies favorisent les liens de communication entre l'école et les familles, notamment avec les espaces de travail numérique (transmission des devoirs, envoi de liens internet ou d'informations pertinentes).

Le psychologue Tardif (1998 ; cité par Karsenti, 2003) déclare que les nouvelles technologies numériques sont des outils de production (via le traitement de texte permettant des modifications infinies selon la demande), de communication, d'accès rapide à une grande quantité d'information (avoir différents points de vue pour une même information participe au développement de la flexibilité cognitive de l'enfant).

A notre connaissance, la plus grande recherche sur l'usage des tablettes tactiles dans l'éducation a été réalisée au Québec par Karsenti et Fievez (2013) avec la participation de 302 enseignants et 6057 élèves. Ils rapportent que la motivation des élèves est beaucoup plus

importante avec cette technologie car ils peuvent travailler en autonomie dans la recherche d'informations et qu'ils obtiennent une récompense lorsqu'ils ont terminé leur travail (jouer à des jeux). D'autre part, elle facilite l'accès à l'information au sein de la classe par la liaison Internet, elle permet d'annoter des documents plutôt que de prendre l'ensemble de la leçon à la main et elle propose une grande diversité de ressources. Cet outil est facilement transportable et il simplifie l'organisation du travail. Le travail sur la tablette tactile permet aussi de développer les compétences informatiques, d'autonomiser les élèves (chacun peut travailler à son rythme) et de proposer des expériences de collaboration entre élèves et avec l'enseignant (avec la possibilité d'utiliser les messageries électroniques).

Cependant, d'autres recherches, comme celle de Russell (1999 ; cité par Karsenti, 2003), mettent en évidence que les gains apportés par les nouvelles technologies ne sont pas tellement significatifs dans les apprentissages.

Également dans leur étude, Karsenti et Fievez (2013) ont rapporté que les tablettes tactiles pouvaient nuire à la réussite scolaire car elles peuvent être une source de distraction lors des cours, les élèves pouvant faire autre chose (messagerie électronique, réseaux sociaux, etc.) qu'écouter l'enseignant. La planification du déroulement des cours (passage d'un manuel écrit à la tablette) et la gestion des travaux sur les différentes plateformes par les élèves s'avèrent compliquées. De plus, toutes les ressources disponibles sur l'outil ne sont pas toujours connues et maîtrisées par les enseignants car ils ne sont pas assez formés. On note également une sous-utilisation des livres électroniques qui sont pourtant censés être une des principales fonctions des tablettes numériques. Enfin, cet outil ne semble pas présenter une aide pour l'apprentissage de l'écriture.

3.2. Le média électronique et les compétences mathématiques

De plus en plus d'applications et de logiciels sont développés dans un but éducatif et pédagogique. Cependant, il y a peu d'études qui évaluent les effets de ces supports numériques dans les apprentissages mathématiques.

Carr (2012) a proposé d'associer l'utilisation de l'iPad (tablette numérique) et les méthodes traditionnelles d'enseignement dans le domaine des mathématiques à des enfants de cinquième année de primaire, âgés de dix et onze ans, aux Etats-Unis. En effet, le média numérique propose plusieurs applications ludiques, notamment avec des stimuli multimodaux (auditif, visuel, etc.) qui favoriseraient le renforcement des apprentissages mathématiques. Cependant, il n'a pas été noté de différence significative dans les résultats scolaires par rapport au groupe d'enfants contrôle (apprentissage seulement par des méthodes traditionnelles). Cependant, ces résultats sont à relativiser car la durée de l'étude était assez réduite (utilisation de la tablette pendant seulement quarante jours sur neuf semaines).

Räsänen, Salminen, Wilson, Aunio, et Dehaene (2009) ont comparé les effets de deux logiciels informatiques (The Number Race et GraphoGame-Math) sur les compétences mathématiques chez 350 enfants de maternelle, âgés de six ans, suite à un entraînement intensif (une séance par jour sur trois semaines). Ils ont été évalués par des tâches de comparaison, comptage et arithmétique (prédictives des résultats scolaires futurs en mathématiques). Un groupe contrôle est aussi constitué pour vérifier le bénéfice de l'entraînement.

« The Number Race » est basé sur le postulat que les représentations numériques approximatives sont nécessaires au développement des compétences numériques. Ainsi, il se concentre sur le système numérique approximatif. Dans ce logiciel, les enfants doivent comparer deux grands ensembles de points ainsi que des nombres (allant de un à neuf) présentant un important écart numérique (puis progressivement cet écart se réduit). Il n'y a pas de verbalisation de la réponse. Une précédente étude (Wilson et ses collègues, 2006 ; cités par Räsänen, Salminen, Wilson, Aunio, & Dehaene, 2009), sur des enfants âgés de sept à neuf ans avec des difficultés dans les apprentissages mathématiques, a démontré une amélioration de la comparaison numérique et de la vitesse de traitement en subitizing, grâce à l'entraînement sur ce logiciel. Mais, il n'a pas eu d'impact sur le comptage. Cependant, il convient d'interpréter avec prudence les résultats car il n'y avait aucune comparaison à un groupe contrôle.

« GraphoGame-Math » est basé sur le postulat que si l'enfant est capable d'associer une petite quantité à sa numérosité alors il peut plus facilement accéder aux relations entre système numérique et arithmétique. Ainsi, il se concentre sur le système numérique exact. Dans ce logiciel, les enfants doivent comparer entre deux et cinq petits ensembles de points ainsi que des nombres (allant de un à neuf) aux valeurs proches (puis progressivement les quantités augmentent). Les réponses sont données oralement.

Les résultats de cette comparaison des deux logiciels ont démontré une amélioration significative des performances des enfants, mais elle reste modérée. En effet, « GraphoGame-Math » a permis des progrès dans la comparaison de petites quantités et avec de faibles écarts. Alors que « The Number Race » améliore les comparaisons liées à de grandes numérosités et d'importants écarts.

4. Buts et hypothèses

D'après les éléments et données exposés précédemment dans le contexte théorique de ce mémoire, on peut émettre l'hypothèse que les jeux, à la fois classiques et électroniques, amélioreraient les compétences numériques et donc pourraient être envisagés afin de faciliter les apprentissages mathématiques à l'école. Il pourrait cependant exister une différence d'effets, entre les jeux de société et la tablette, sur l'amélioration des compétences mathématiques. Nous pensons que cette différence pourrait être en faveur des supports classiques. En effet, même si les deux outils sont motivants, ludiques et que leur contribution dans le développement de certaines compétences mathématiques a été montrée, l'utilisation de la tablette tactile dans les apprentissages semble présenter aussi des inconvénients.

Méthode

La partie expérimentale de ce mémoire a débuté durant l'année scolaire 2017/2018 avec d'autres étudiantes en master du département d'Orthophonie de l'Université de Lille, dans le cadre aussi de leur mémoire. Elles ont réalisé les pré-tests et les phases d'entraînements. Nous avons pris la suite du projet à partir de mai 2018 afin de réaliser les post-tests, puis les tests de maintien pendant l'année scolaire 2018/2019.

Le projet a été soumis et a reçu l'avis favorable du Comité d'Ethique d'Etablissement de l'Université de Lille 3, le 16 novembre 2017.

Une convention a aussi été signée par l'Université du Luxembourg, l'Université de Lille, le réseau Canopé (le réseau de création et d'accompagnement pédagogiques), l'Education Nationale (académie de Lille) et l'ESPE LNF (Ecoles Supérieures du Professorat et de l'Education Lille Nord de France) afin de pouvoir réaliser ce travail en collaboration.

La participation des enfants à l'étude est soumise à une autorisation parentale, suite à une lettre d'information accompagnée d'un questionnaire parental sur les habitudes de jeux à la maison (Annexe 1).

Les données récoltées durant l'étude sont anonymes (attribution d'un numéro d'identification à chaque enfant) et leur traitement a fait l'objet d'une déclaration à la Commission Nationale de l'Informatique et des Libertés (CNIL).

1. Population

Suite à la réception des autorisations parentales et à l'établissement des critères d'inclusion, 172 enfants ont participé à la phase des pré-tests. Ils étaient scolarisés en moyenne et grande section de maternelle dans cinq établissements de la circonscription d'Arras (région Hauts de France). Elle est considérée comme un milieu socio-scolaire moyen à élevé.

Néanmoins, seulement 157 enfants ont été inclus dans l'analyse de nos résultats pré et post-tests sur les effets des entraînements. Les quinze enfants exclus s'expliquent par des déménagements en cours d'année ou par un QI (quotient intellectuel) très faible et/ou trop de données manquantes.

La figure 3 présente la répartition et les effectifs des enfants au cours de l'étude durant l'année scolaire 2017/2018.

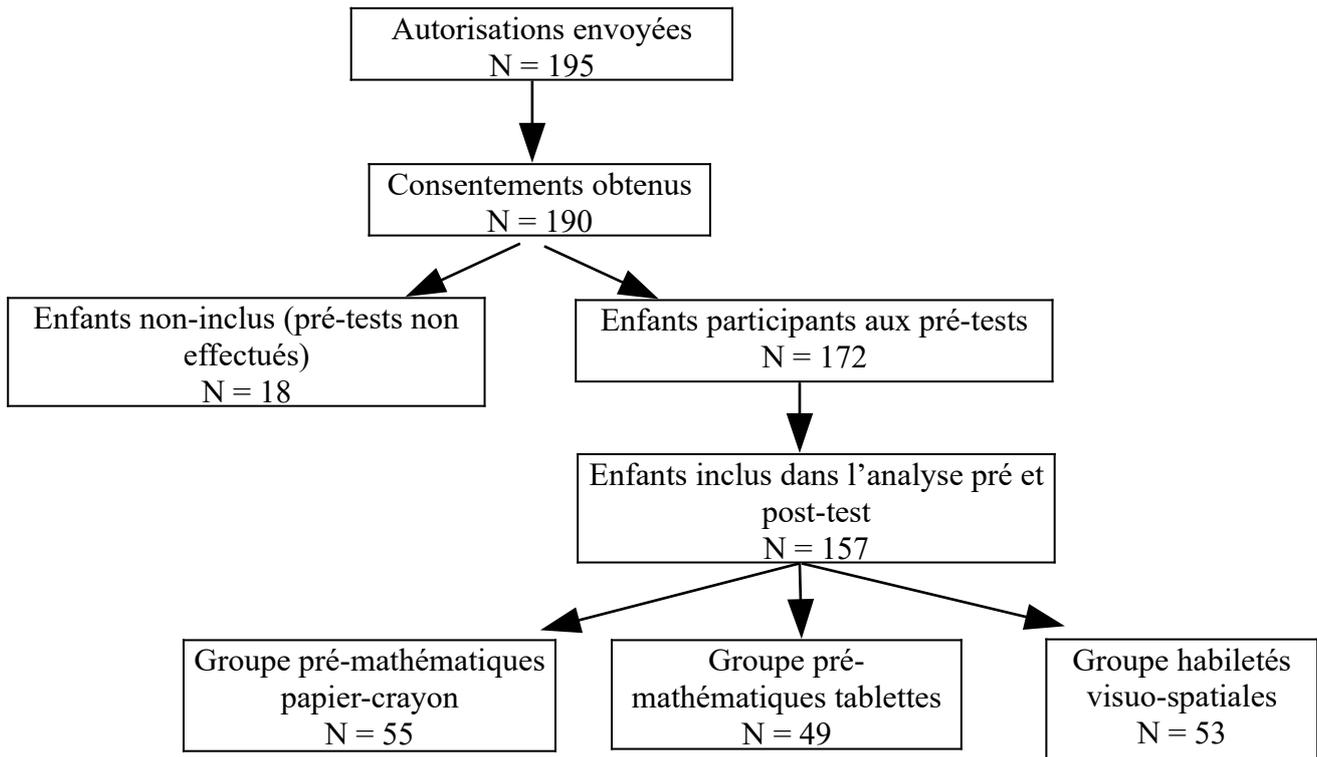


Figure 3. Répartition et effectifs des participants entre les pré- et post-tests.

Les critères d'inclusion à la phase des pré-tests étaient le niveau scolaire (classe de moyenne ou de grande section de maternelle), l'absence d'un dossier MDPH (Maison Départementale des Personnes Handicapées) et la présence d'une autorisation parentale.

Suite aux résultats des pré-tests, les enfants ont été répartis, de manière équivalente, en trois groupes selon des variables d'âge, de sexe, de performances aux prérequis mathématiques et d'habiletés visuo-spatiales.

Concernant la phase des tests de maintien (année scolaire 2018/2019), l'intervention a été réalisée sur les mêmes enfants, alors scolarisés en classe de grande section de maternelle et en cours préparatoire (CP). Seulement les écoles ayant accueilli le plus grand nombre de ces élèves ont été contactées (l'une d'elle a refusé notre venue). Au total, 126 enfants ont pu être retestés (sur les 157 du post-tests).

2. Procédure

L'étude se décompose en quatre grands temps : le pré-test, les entraînements, le post-test et le test de maintien.

Le pré-test a pour objectif d'établir le niveau de base de l'enfant dans les différents domaines évalués. L'intervention a eu lieu en janvier 2018, sur une période de trois semaines. La passation se faisait individuellement sur le temps de la classe, avec un protocole en version papier. Le temps de passation variait entre quarante et soixante minutes selon les enfants.

Suite au pré-test, l'ensemble des enfants a été divisé en trois groupes d'entraînement : les « pré-mathématiques papier-crayon » (PMPC – stimulation avec des jeux de plateau), les « pré-mathématiques tablettes » (PMT) et les « habiletés visuo-spatiales » (HVS – stimulation sur tablette). Puis chacun a été divisé en sous-groupes de travail avec quatre enfants pour le « papier-crayon » et six enfants pour les deux entraînements en format numérique.

Les entraînements sont réalisés sous la forme d'ateliers au sein de la classe, sous la surveillance d'un enseignant ou d'une étudiante. L'adulte encadrant changeait de groupe à chaque session pour éviter un biais lié à l'examineur.

L'entraînement s'est décomposé en quatorze sessions sur huit semaines entre février et avril 2018. Deux interventions ont été réalisées chaque semaine (sur deux jours différents), d'une durée de vingt minutes.

Les entraînements des groupes pré-mathématiques papier-crayon et tablettes ont été appariés au niveau de la difficulté et du type de tâches afin de pouvoir comparer les effets des deux supports. Ils suivent la même progression au niveau de la complexité. Cependant, les activités du groupe habiletés visuo-spatiales sont organisées aléatoirement, sans appariement avec d'autres entraînements car le type de stimulations proposées est très différent.

A l'issue des ateliers, la phase post-test est proposée afin d'observer les effets de l'entraînement. Elle a eu lieu en mai 2018 et a été organisée en suivant les mêmes conditions que celles du pré-test. La durée de passation était alors de trente à cinquante minutes.

Le test de maintien a eu lieu de fin octobre à début décembre 2018 (année scolaire 2018/2019). Il a pour but d'observer les effets de l'entraînement à long terme en comparant les différents groupes d'intervention établis entre eux. L'ensemble du protocole est réalisé en une seule session, d'environ trente minutes, par groupes de cinq ou six élèves pour les grandes sections de maternelle et en classe entière pour le cours préparatoire (CP).

3. Matériel

Les phases de tests sont réalisées avec le protocole « Kids e-stim », regroupant une batterie d'épreuves en version papier-crayon comprenant des compétences générales non spécifiques aux mathématiques (visuo-spatial, gnosis, mémoire à court terme) et des compétences spécifiques aux mathématiques relevant du système numérique approximatif et du système numérique exact.

Les entraînements peuvent se faire sur une tablette ou bien avec des jeux de société, selon le groupe d'appartenance.

3.1. Pré-test

Ce protocole se compose de onze épreuves différentes, se divisant en plusieurs subtests.

Au niveau des compétences générales, on évalue :

- L'orientation spatiale en demandant à l'enfant de barrer la forme différente des autres, puis celle qui est identique au modèle (épreuve extraite de la batterie du Developmental Test of Visual Perception ou DTVP2 ; Hammill, Pearson, & Voress, 1993).

- La relation spatiale en reliant des points pour reproduire l'exemple qui lui est proposé (épreuve extraite de la batterie du Developmental Test of Visual Perception ou DTVP2).
- Les gnosies digitales en demandant à l'enfant d'indiquer sur le dessin d'une main le doigt qui a été touché par l'examineur, hors de sa vue, d'abord sur la main droite puis sur celle de gauche (épreuve de Galifret-Granjon).
- La mémoire verbale à court terme avec une répétition à l'envers de couleurs.
- La mémoire visuelle à court terme en retrouvant, dans l'ordre, l'emplacement des boîtes bleues vues précédemment (épreuve de Corsi).

Pour évaluer le système numérique approximatif, on propose :

- Les lignes numériques où l'enfant doit placer un nombre arabe sur une ligne allant de zéro à vingt.
- La comparaison symbolique 1-digit consistant à barrer le plus grand chiffre arabe (de 0 à 9) parmi la paire présentée en trente secondes.
- La comparaison symbolique 2-digits est identique à l'épreuve précédente mais avec des nombres plus grands.
- La comparaison non-symbolique consistant à barrer l'ensemble qui comporte le plus de points dans la paire présentée en trente secondes.

Le système numérique exact (ou développement de la chaîne numérique) est testé par :

- Le comptage libre où l'enfant doit compter à voix haute le plus loin possible dans la chaîne numérique.
- Le comptage à partir de ... consistant à compter, à haute voix, à partir d'un chiffre donné.
- Le comptage à rebours où l'enfant compte à l'envers à partir d'une base.
- L'énumération (épreuve « How many task ? ») consistant à donner le nombre de cailloux présents sur l'image.
- La lecture de nombres arabes où l'enfant doit lire les nombres à haute voix.
- L'ordinalité (épreuve « Quel chiffre manquant ? ») consistant à indiquer le nombre manquant parmi la suite proposée.
- Les additions digitales où l'enfant doit donner le résultat de l'opération à partir d'images de doigts.
- Les additions de nombres arabes qui est identique à l'épreuve précédente mais avec la présentation de nombres arabes.

Une épreuve « Matrice non-verbale de la WNV » (extraite de la WISC non-verbale ou échelle d'intelligence de Wechsler ; Wechsler, 2005) est aussi proposée dans le pré-test. L'enfant doit choisir l'image qui convient pour compléter l'ensemble ou la suite qui lui est présenté. Cette épreuve permet d'évaluer l'intelligence non-verbale.

Une tâche de comparaison, intitulée « Vitesse motrice (motor speed) », est aussi présente dans le pré-test. L'enfant doit barrer un maximum de formes noires parmi les paires proposées en vingt secondes.

Ces deux épreuves n'ont pas été prises en compte dans l'étude des résultats.

3.2. Entraînements

Les activités d'entraînement du groupe pré-mathématiques papier-crayon (Annexe 2) ont été développées à partir de matériels créés par les équipes lilloise et luxembourgeoise. Elles pouvaient être effectuées de manière individuelle ou bien collective selon le jeu. Des jeux de plateau, des lotos, des memory, avec la manipulation de dés, de jetons et de cartes étaient proposés.

Le but de cet entraînement était la stimulation des compétences mathématiques élémentaires par le développement des compétences numériques précoces.

Les différentes activités ont permis de travailler sur le comptage, les trois codes de Dehaene (code arabe, code verbal, code analogique) et le transcodage, la ligne numérique. Une grande partie des activités ont été proposées à plusieurs reprises aux enfants, en augmentant la numérosité maximale travaillée (de 1 à 10) pour marquer une progression.

Les entraînements du groupe pré-mathématiques tablettes (Annexe 2) ont été réalisés à l'aide de l'application « MaGrid » créée par l'équipe luxembourgeoise. Les activités ont été réalisées de façon individuelle et en autonomie (avec un QR code attribué à chaque enfant pour l'enregistrement des données et un livret en format papier avec des exemples), mais avec une aide de l'adulte lorsque cela était nécessaire.

L'objectif de l'entraînement et les compétences travaillées étaient les mêmes que pour le groupe précédent. De plus, la difficulté et le type de tâches proposées étaient appariés à ceux du groupe pré-mathématiques papier-crayon. Une présentation répétée du même type d'activités a aussi été réalisée.

Les entraînements du groupe habiletés visuo-spatiales (Annexe 2) ont aussi été effectués sur tablette avec un programme développé par l'équipe luxembourgeoise. Un QR code et un livret papier ont aussi été fournis à chaque enfant afin de travailler en autonomie et de manière individuelle.

Une redondance des tâches a également été réalisée. Les activités comprenaient de la relation spatiale (relier des points, compléter une forme, travailler la symétrie) et de l'orientation spatiale (trouver la forme différente ou identique).

Le but de cet entraînement était de stimuler les capacités visuo-spatiales des enfants et d'observer si celles-ci ont un effet sur le développement des compétences mathématiques.

3.3. Post-test

Le post-test suit le même protocole que celui du pré-test, à l'exception de l'épreuve « Matrice non-verbale de la WNV » qui a été retirée.

3.4. Batterie de maintien

La batterie de maintien correspond à un autre protocole de tests en papier-crayon qui comprend huit ou neuf épreuves (selon la classe) :

- La décision numérique écrite où l'enfant doit déterminer si les symboles présentés sont des chiffres ou non.
- L'écriture de nombres arabes sous dictée.
- La comparaison de nombres arabes où l'enfant doit entourer le nombre le plus grand parmi les deux proposés.

- Le dénombrement et la cardinalité où l'enfant doit dénombrer le nombre d'animaux présents sur l'image (présentation en ligne, disposés dans l'espace ou avec un mélange d'animaux différents).
- La décision de rangement par ordre croissant où l'enfant doit déterminer si les séries proposées sont rangées par ordre croissant.
- La ligne numérique où l'enfant doit placer le nombre écrit sur la ligne.
- Les aptitudes visuo-spatiales qui sont divisées en deux parties. En premier l'enfant doit relier des points selon un modèle. Puis, il doit retrouver le dessin différent du modèle, et enfin celui qui lui est semblable.
- L'arithmétique qui est aussi divisée en deux parties. L'enfant doit d'abord compléter des opérations afin de trouver toutes les possibilités d'obtenir le nombre d'un résultat. Ensuite, il doit réaliser un maximum d'additions puis de soustractions en une minute. Les tâches d'arithmétique ne sont proposées qu'aux élèves de CP.

Résultats

Nous avons décidé de comparer les résultats des entraînements chez les groupes pré-mathématiques papier/crayon (PMPC) et pré-mathématiques tablette (PMT), tous niveaux confondus (classes de moyenne et grande section de maternelle).

Le test statistique t a été utilisé afin de réaliser des analyses de comparaison de moyennes entre ces deux groupes et entre les pré et post-tests, avec l'utilisation de p -valeurs pour démontrer un effet significatif. Pour les compétences générales (non spécifiques aux mathématiques) et le système numérique exact (SNE), le score total était différent sur chaque épreuve. Nous avons donc utilisé le POMP (Percent Of Maximum Performance ou Pourcentage de Performance Maximum) afin de ramener tous les résultats sur un pour une meilleure analyse. Pour les épreuves du système numérique approximatif (SNA), et plus particulièrement les comparaisons symboliques et non-symboliques, cette méthode n'a pas pu être utilisée car elle ne comporte pas de score maximum, c'est la précision en fonction du temps qui est évaluée. En ce qui concerne les lignes numériques, nous avons calculé la différence entre la cible et la réponse de l'individu en réponse absolue sur 20 (PAEL) puis fait la moyenne de toutes les réponses. Enfin, la méthode Delta a été utilisée pour mesurer la différence entre le pré et le post-test pour chaque groupe et les comparer.

Le tableau 1 (Annexe 3) présente les résultats des pré-tests pour les groupes PMPC et PMT. Dans la colonne p -valeurs, aucune épreuve ne présente un score significatif ($p \leq 0.05$), ce qui montre une absence de différence entre les deux groupes avant l'entraînement.

Le tableau 2 (Annexe 4) montre les résultats des deux groupes (PMPC et PMT) aux différentes épreuves des post-tests. Comme pour les pré-tests, aucune épreuve ne présente une valeur p significative. Cela montre une absence d'impact des supports.

Le tableau 3 (Annexe 5) présente la comparaison des résultats aux pré-tests et post-tests pour et entre les deux groupes.

Pour les pré-mathématiques papier/crayon (PMPC), on relève un résultat significatif ($p \leq 0.05$) en orientation spatiale ($p = 0.49$), en relation spatiale ($p = 0.001$), en mémoire verbale ($p = 0.08$), en comparaison symbolique 1-digit ($p \leq 0.001$), en comparaison non-

symbolique ($p = 0.001$), en comptage libre ($p \leq 0.001$), en comptage à rebours ($p = 0.21$), en comptage avec bornes ($p = 0.48$), en lecture de nombres arabes ($p \leq 0.001$), en ordinalité ($p = 0.002$) et en additions digitales ($p = 0.004$).

Pour le groupe pré-mathématiques tablette (PMT), un score significatif est observable en relation spatiale ($p = 0.012$), en comparaison symbolique 1-digit ($p = 0.001$) et 2-digits ($p = 0.031$), en comparaison non-symbolique ($p \leq 0.001$), en comptage à rebours ($p \leq 0.001$), en lecture de nombres arabes ($p \leq 0.001$), en ordinalité ($p \leq 0.001$) et en additions nombres arabes ($p = 0.025$).

La seule valeur significative d'évolution entre les deux groupes est celle du comptage libre ($p = 0.008$).

Discussion

L'objectif de ce travail de recherche était de comparer les effets potentiellement bénéfiques, sur les compétences mathématiques, des différents supports de travail proposés (jeux de société et tablette) dans une population d'enfants scolarisés en moyenne et grande section de maternelle.

Discussion des résultats

Les résultats équivalents aux pré-tests des groupes PMPC (pré-mathématiques papier/crayon) et PMT (pré-mathématiques tablette), ainsi que l'absence de valeurs significatives, suggèrent que les deux groupes ne présentent pas de différence avant l'entraînement. Ils commencent les entraînements tous avec le même niveau de notions mathématiques.

Dans les post-tests, les moyennes des groupes PMPC et PMT aux différentes épreuves mathématiques, visuo-spatiales et générales sont aussi très proches. En effet, cela est cohérent avec les entraînements reçus puisqu'ils étaient appariés au niveau de la difficulté et du type de tâches proposées. Néanmoins, aucune différence significative n'est observée dans la comparaison des moyennes des deux groupes, ce qui semble montrer que le support n'a pas ou peu d'impact sur le développement des compétences mathématiques.

En comparant les résultats entre les pré- et post-tests du groupe PMPC, on note un bénéfice significatif de l'entraînement sur les tâches de comparaison symbolique, de comptage (libre, à l'envers, avec bornes et ordinalité) et de lecture de nombres arabes. L'effet sur la comparaison symbolique est restreint à « 1-digit », soit un chiffre (allant de 0 à 9), cela s'explique certainement par le fait que les enfants aient été entraînés sur une numérosité maximale de 10. Ces résultats sont cohérents avec ceux de l'étude de Ramani et Siegler (2008). En effet, ces auteurs ont observé ces mêmes effets suite à des entraînements sur des jeux de plateau. Néanmoins, les auteurs relevaient aussi un bénéfice important sur la tâche d'estimation de la ligne numérique. Or, cet effet n'est pas reproduit dans notre étude mais cela est probablement lié au fait que les auteurs ont utilisé uniquement des plateaux linéaires, alors que nous avons en plus proposé des circulaires.

On note aussi un effet de l'entraînement sur les épreuves visuo-spatiales (orientation spatiale et relation spatiale) bien que celles-ci n'aient pas fait l'objet d'un travail spécifique

dans ce groupe. On peut penser que cette amélioration est liée à la maturation de l'enfant (il a évolué en grandissant). Néanmoins, elle peut aussi s'expliquer par l'activation de zones cérébrales et processus communs aux mathématiques et aux capacités visuo-spatiales dans le sillon intrapariétal (Hubbard et al., 2005). On peut aussi envisager que cet effet soit lié aux possibilités de manipulations apportées par les jeux de société (jetons, dés, cartes, etc.), néanmoins nous n'observons aucune amélioration sur les gnosies digitales.

Les résultats suggèrent également un bénéfice des jeux de société sur la mémoire à court terme auditivo-verbale. On peut supposer que cet effet s'explique par les interactions verbales stimulantes avec les pairs et avec l'adulte au cours notamment des activités collectives. Ainsi, l'enfant a pu être amené à développer sa boucle phonologique, un élément nécessaire aux compétences mathématiques (Noël, 2005).

On relève aussi un effet positif sur l'épreuve d'additions digitales. Durant l'entraînement, les enfants ont été confrontés à des jeux faisant appel à l'arithmétique. On peut penser que cela a aidé à développer le recours à la stratégie de comptage digital (qui a généralement lieu entre quatre et cinq ans ; Fayol, 2012) et/ou à remonter les configurations canoniques digitales.

Enfin, l'entraînement par des jeux classiques fait apparaître un bénéfice en tâche de comparaison non-symbolique. Celui-ci tient surtout à la vitesse de traitement (dans le système numérique approximatif) qui s'avère meilleure grâce aux jeux de société.

Pour le groupe PMT, la comparaison des résultats entre les pré- et post-tests fait apparaître un bénéfice significatif dans les comparaisons symboliques (1 et 2-digits) et les comparaisons non symboliques. Ces résultats sont cohérents avec l'étude de Räsänen et al. (2009), ils ont aussi observé des effets positifs sur ce type de tâches après avoir proposé des exercices de comparaisons (pattern de points et nombres arabes) sur des tablettes. Néanmoins, aucun bénéfice sur le comptage ou en arithmétique n'était visible dans leur étude. Or, dans la nôtre, les résultats dans les tâches de comptage en arrière et d'additions de nombres arabes suggèrent un effet lié à l'entraînement. Cela peut s'expliquer, pour le comptage en arrière, par les exercices ayant entraîné l'ordinalité (l'enfant ayant appris à se repérer dans la comptine numérique) et ceux faisant intervenir un comptage à rebours. Pour les additions de nombres arabes, on peut supposer que la progression s'explique par l'utilisation du comptage verbal (entre quatre et cinq ans) et la récupération du résultat en mémoire (à partir de cinq ans ; Fayol, 2012) dans les exercices.

On note aussi une amélioration en tâche de relation spatiale, bien que, comme pour le groupe PMPC, les capacités visuo-spatiales n'aient pas été spécifiquement entraînées. Or, les théories explicatives développées pour le groupe PMPC sont difficilement applicables ici. En effet, le travail sur tablette ne permet aucune manipulation d'objets. De plus, s'il s'agissait d'une activation de la zone cérébrale commune (Hubbard et al., 2005) comme conséquence de l'entraînement mathématique, alors la tâche d'orientation spatiale devrait normalement, elle aussi, présenter une amélioration. Or, nous ne l'observons pas dans nos résultats. On peut supposer que l'absence d'effets en orientation spatiale, contrairement au groupe PMPC, est liée à l'organisation spatiale de la présentation des entraînements. Avec la tablette, l'exercice est présenté à l'endroit et face à l'enfant. Avec les jeux de société, le groupe est réparti autour du plateau de jeux et le point de vue diffère selon la place de l'enfant (vision de côté, à l'endroit, à l'envers).

Les résultats suggèrent aussi un effet bénéfique en lecture de nombres arabes. Cela peut s'expliquer par les nombreux exercices d'entraînement faisant intervenir un transcodage entre le code arabe et analogique, qui nécessite le passage par le code verbal (avec du comptage) pour être réalisé chez l'enfant (Thevenot & Fayol, 2018).

Enfin, on note un effet positif de l'entraînement sur l'ordinalité. Dans les exercices sur tablette, le programme comporte plusieurs tâches demandant d'ordonner les chiffres présentés. Ainsi, l'enfant entraîne sa comptine numérique et il devient capable d'identifier où se situe un nombre dans celle-ci et ceux qui l'entourent.

Lorsqu'on compare la différence entre le pré- et le post-test des deux groupes entre eux (PMPC et PMT), la seule évolution significative observable est celle de la tâche de comptage libre en faveur du groupe PMPC. Pour toutes les autres tâches, les changements semblent faibles pour être seulement expliqués par le support utilisé. On peut donc penser que ces modifications sont plutôt liées à la maturation des enfants qu'à l'entraînement spécifique qu'ils ont reçu.

En conclusion, nous observons un effet positif des interventions précoces sur certaines compétences mathématiques chez les enfants des deux groupes d'entraînement lorsque nous comparons les pré- et post-tests. Les jeux de société semblent avoir valorisé le développement des aptitudes visuo-spatiales, de la mémoire verbale à court terme, de la comparaison symbolique de chiffres de la comparaison non-symbolique, du comptage (endroit et envers), de la lecture de nombres arabes, de l'ordinalité et des additions avec une présentation digitale. Les entraînements sur tablette ont permis une amélioration dans les tâches de relation spatiale, de comparaison symbolique (chiffres et nombres), de comparaison non-symbolique, du comptage en arrière, de la lecture de nombres arabes, de l'ordinalité et des additions avec une présentation des nombres arabes.

Néanmoins, au vu de l'absence de résultats significatifs au post-test dans les deux groupes, le type de support employé ne semble pas déterminant pour travailler les aptitudes mathématiques. Cette hypothèse est appuyée par la différence entre le pré- et post-test des deux groupes entre eux où seulement la tâche de comptage libre est significativement améliorée par l'entraînement papier-crayon, les autres compétences ne sont pas impactées par le choix d'un support. On peut donc supposer que l'impact des entraînements repose plutôt sur le type de compétences exercées (traitement approximatif, traitement exact, compétences générales).

Cependant, l'attrait pour les jeux de société était plus notable que celui pour les tablettes. En effet, les enfants ont montré plus d'intérêt pour le support classique, des enfants du groupe PMT ont même demandé à essayer les jeux de plateau proposés (mais cela a été impossible du fait des entraînements spécifiques). De plus, selon les expérimentateurs, les enfants (issus d'un milieu moyen à élevé) perçoivent les jeux de société comme plus motivants et permettant plus d'échanges verbaux.

Discussion de la méthodologie

Le début de l'étude, qui devait initialement se faire en octobre 2017, a été reporté en janvier 2018 (soit trois mois plus tard) en raison de problèmes administratifs. Ce retard a donc conduit à réduire le nombre de semaines d'entraînement à huit au lieu des dix prévues (soit

quatorze sessions et non seize) et il a rendu impossible le rattrapage des sessions manquées par certains enfants. De plus, la première analyse statistique sur les résultats des pré-tests visant à permettre la répartition des élèves dans les trois groupes d'entraînement n'a pas pu être réalisée (il a fallu faire appel aux enseignants pour évaluer leurs performances et guider la division).

Le protocole de passation (pré- et post-test) comporte un nombre important d'épreuves afin d'être le plus complet possible, en abordant à la fois les domaines généraux et les domaines spécifiques aux apprentissages mathématiques. Cela a rendu le temps de passation très long pour les enfants (quarante à soixante minutes en pré-test et trente à cinquante minutes en post-test), notamment ceux de moyenne section de maternelle qui ont manifesté de la fatigabilité et donc des difficultés d'attention et de concentration. Il est donc prévu de simplifier le protocole pour un gain de temps lors de la prochaine partie de l'étude (les nouveaux tests durant l'année scolaire 2019/2020).

Il existe aussi un biais attentionnel associé aux conditions de passation. En effet, même si les tests avaient lieu en situation duelle (un examinateur et un enfant), tous les élèves étaient testés en même temps dans la même salle, voire dans un espace commun de l'école (ex. coin lecture au milieu du passage pour accéder aux classes et à la cour de récréation). Ce même biais peut aussi se retrouver dans les entraînements puisque différents groupes étaient parfois dans la même salle. Néanmoins, ces conditions ne sont pas nouvelles pour les enfants, puisque les travaux de groupe sont aussi réalisés dans le cadre des apprentissages scolaires.

A propos de la comparaison des différents groupes d'entraînement, aucun groupe contrôle n'a été constitué pour des raisons éthiques. Ainsi, il est difficile de savoir si les effets observés s'expliquent seulement par les entraînements ou bien si l'évolution et la maturation de l'enfant entrent en jeu (et dans quelle mesure). Il aurait donc pu être intéressant de proposer un entraînement, par exemple, sur le langage, afin de constituer un groupe contrôle.

Concernant la batterie de maintien, la passation aurait dû avoir lieu six mois après les post-tests (soit en octobre 2018). Or, les délais ont été plus longs que prévus pour obtenir les autorisations d'intervention et contacter les écoles, notamment pour les classes de CP (accueillant les anciens enfants de grande section de maternelle et ne connaissant pas le projet). Cette procédure pourrait donc éventuellement être réalisée plus en amont (avant la fin de l'année scolaire précédente).

Une école élémentaire a refusé notre intervention auprès des élèves participant à l'étude, entraînant la perte d'une partie de l'effectif. De plus, notre intervention ne s'est faite que dans les établissements accueillant le plus grand nombre de participants (quelques enfants ont poursuivi leur scolarité dans d'autres écoles et n'ont donc pas pu être retestés). Néanmoins, l'effectif total d'élèves ayant participé au test de maintien reste important (126 enfants).

Pistes de recherches futures

Ce projet de recherche continue l'année prochaine (année scolaire 2019/2020) avec les futures étudiantes de cinquième année d'orthophonie dans le cadre de leur mémoire. Les mêmes interventions sont prévues (phases pré-tests, entraînements, post-tests et tests de

maintien) dans des écoles du Réseau d'Education Prioritaire (REP) dans la circonscription de Lille. Grâce à cela, il pourrait être envisagé de réaliser une comparaison entre les milieux socio-scolaires favorisés et défavorisés afin d'observer si les gains des entraînements sont plus importants dans le second milieu, et s'il existe une différence notable d'impact du support (jeux de plateau versus tablette).

Le présent mémoire portait sur l'analyse des effets des différents supports (jeux de plateau versus tablette) sur les compétences mathématiques, mais en étudiant les effets entre le pré- et le post-test seulement. Or, la batterie de maintien proposée durant cette année scolaire aux participants de l'étude permet de vérifier si les entraînements ont eu un effet à long terme sur les compétences mathématiques, ce qui pourra être le sujet d'un futur mémoire.

De plus, l'étude comportait aussi un entraînement centré sur les habiletés visuo-spatiales à l'aide de tablettes numériques. Il paraît donc intéressant d'étudier l'impact des compétences travaillées en comparant les effets des entraînements pré-mathématiques et visuo-spatiaux (ce sujet fait l'objet d'un mémoire présenté en 2019).

Intérêts orthophoniques

Les résultats des différents sujets d'études possibles avec ce projet (impact des supports, compétences à travailler, effets à long terme, types de prérequis nécessaires aux compétences mathématiques, etc.) pourront être utilisés dans le cadre de la prévention, afin de mener des actions pour sensibiliser sur les difficultés que peuvent développer les enfants en mathématiques et comment les repérer dès le plus jeune âge. De plus, ils pourront être applicables et aider à la prise en charge orthophonique d'enfants présentant des difficultés dans le domaine de la cognition mathématique. Ils pourront apporter des informations et des références sur le type de domaines et facteurs à évaluer et travailler, ainsi que sur les différentes façons de les exploiter.

Conclusion

Ce travail de recherche a pour objectif d'analyser les effets d'un entraînement des compétences mathématiques nécessaires au développement des apprentissages futurs dans ce domaine, tout en comparant les différents supports proposés (jeux de société versus tablette), chez des enfants de maternelle.

157 enfants issus de classe de moyenne et de grande section de maternelle, en milieu socio-scolaire moyen à élevé, ont participé à l'étude durant l'année scolaire 2017/2018. Un pré-test, huit semaines d'entraînement et un post-test leur ont été proposés entre janvier et mai 2018. Les entraînements ont nécessité la constitution de trois groupes afin d'étudier l'impact des différents supports et des différentes compétences travaillées (pré-mathématiques papier/crayon, pré-mathématiques tablette, habiletés visuo-spatiales sur tablette) sur les compétences mathématiques. Une batterie de maintien a été soumise à 126 de ces élèves entre octobre et décembre 2018 pour étudier les effets à long terme des entraînements.

Les résultats suggèrent un effet des entraînements proposés sur les performances en mathématiques des enfants de maternelle grâce aux deux supports présentés, les jeux classiques et les tablettes. Néanmoins, aucun des deux ne semble être à privilégier sur l'autre. En effet, les bénéfices observés laissent supposer que c'est la compétence entraînée et non le support utilisé qui est important pour le développement des capacités mathématiques des enfants. Cependant, une préférence pour les jeux de société semble visible chez les enfants de milieu moyen à élevé.

La poursuite de cette étude permettra de pouvoir comparer des élèves venant de différents milieux socio-économiques, afin de prendre connaissance des potentielles différences pouvant exister au niveau des supports de travail, des compétences à développer et de l'importance des effets de l'entraînement proposé.

Bibliographie

- Berteletti, I., Lucangeli, D., Piazza, M., Dehaene, S., & Zorzi, M. (2010). Numerical Estimation in Preschoolers. *Developmental Psychology*, 46(2), 545-551.
- Carr, J. (2012). Does Math Achievement h'APP'en when iPads and Game-Based Learning are Incorporated into Fifth-Grade Mathematics Instruction ?. *Journal of Information Technology Education*, 11, 269-280.
- Cheng, Y., & Mix, K. (2014). Spatial Training Improves Children's Mathematics Ability. *Journal of Cognition and Development*, 15(1), 2-11.
- Cornu, V., Schiltz, C., Pazouki, T., & Martin, R. (2017). Training early visuo-spatial abilities : A controlled classroom-based intervention study. *Applied Developmental Science*, 1-21.
- Fayol, M. (2012). *L'acquisition du nombre*. Paris, France : Presses universitaires de France.
- Guedin, N., Thevenot, C., & Fayol, M. (2018). Des doigts et des nombres. *Psychologie Française*, 63(4), 379-399.
- Habib, M. (2014). *La constellation des dys : Bases neurologiques de l'apprentissage et de ses troubles*. Paris, France : De Boeck supérieur.
- Hammill, D.D., Pearson, N.A., & Voress, J.K. (1993). *Developmental test of visual perception* (2nd ed.) Austin, Texas : Pro-Ed.
- Hawes, Z., Moss, J., Caswell, B., & Poliszczuk, D. (2015). Effects of mental rotation training on children's spatial and mathematics performance : A randomized controlled study. *Trends in Neuroscience and Education*, 4(3), 60-68.
- Holmes, J., Adams, J.W., & Hamilton, C.J. (2008). The relationship between visuospatial sketchpad capacity and children's mathematical skills. *European Journal of Cognitive Psychology*, 20(2), 272-289.
- Hubbard, E., Piazza, M., Pinel, P., & Dehaene, S. (2005) Interactions between number and space in parietal cortex. *Nature Review Neuroscience*, 6(6), 435-448.
- Karsenti, T. (2003). Favoriser la motivation et la réussite en contexte scolaire : Les TIC feront-elles mouche ?. *Vie pédagogique*, (127), 27-31.
- Karsenti, T., & Fievez, A. (2013). *L'iPad à l'école : usages, avantages et défis : résultats d'une enquête auprès de 6057 élèves et 302 enseignants du Québec (Canada)*. Montréal, Canada : CRIFPE.
- Knops, A., Nuerk, H-C., & Göbel, S. M. (2017). Domain-general factors influencing numerical and arithmetic processing. *Journal of Numerical Cognition*, 3(2), 112-132.
- LeFevre, J-A., Skwarchuk, S-L., Smith-Chant, B. L., Fast, L., Kamawar, D., & Bisanz, J. (2009). Home Numeracy Experiences and Children's Math Performance in the Early School Years. *Canadian Journal of Behavioural Science*, 41(2), 55-66.
- Marinthe, C., Fayol, M., & Barrouillet, P. (2005). Gnosies digitales et développement des performances arithmétiques. Dans A. Van Hout, C. Meljac, & J-P. Fischer (dir.), *Troubles du calcul et dyscalculies chez l'enfant* (2^e éd., p. 255-270). Paris, France : Masson.

- Ministère de l'Education de l'Ontario. (2014). *Mettre l'accent sur le raisonnement spatial* (Publication no 1). Repéré à <http://www.edu.gov.on.ca/fre/literacynumeracy/SpatialReasoningFr.pdf>
- Ministère de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. (2016). *Les mathématiques par les jeux* (Publication no 1). Repéré à http://cache.media.eduscol.education.fr/file/Maths_par_le_jeu/92/4/01-RA16_C3_C4_MATH_math_jeu_641924.pdf
- Ministère de l'Education Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. (2015). Ressources maternelle – Jouer et Apprendre : Cadrage général. Repéré à http://cache.media.eduscol.education.fr/file/Apprendre/30/3/Ress_c1_jouer_jouerapprendre_458303.pdf
- Ministère de l'Education Nationale et de la Recherche. (2002). *Le Bulletin Officiel du Ministère de l'Education Nationale et du Ministère de la Recherche : Horaires et programmes d'enseignement de l'école primaire* (Publication no 1). Repéré à <http://www.education.gouv.fr/bo/BoAnnexes/2002/hs1/hs1.pdf>
- Noël, M-P. (2005). Le transcodage chez l'enfant. Dans A. Van Hout, C. Meljac, & J-P. Fischer (dir.), *Troubles du calcul et dyscalculies chez l'enfant* (2^e éd., p. 111-122). Paris, France : Masson.
- Noël, M-P. (2005). Rôle de la mémoire de travail dans l'apprentissage du calcul. Dans A. Van Hout, C. Meljac, & J-P. Fischer (dir.), *Troubles du calcul et dyscalculies chez l'enfant* (2^e éd., p. 92-110). Paris, France : Masson.
- Organisation de Coopération et de Développement Economique (OCDE). (2001). *L'école de demain. Les nouvelles technologies à l'école : apprendre à changer*. Paris, France : Centre pour la recherche et l'innovation dans l'enseignement.
- Pesenti, M., & Rousselle, L. (2005). Les procédures de quantification chez l'enfant. Dans A. Van Hout, C. Meljac, & J-P. Fischer (dir.), *Troubles du calcul et dyscalculies chez l'enfant* (2^e éd., p. 186-194). Paris, France : Masson.
- 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.
- Räsänen, P., Salminen, J., Wilson, A., Aunio, P., & Dehaene, S. (2009). Computer-assisted intervention for children with low numeracy skills. *Cognitive Development*, 24(4), 450-472.
- Thevenot, C., & Fayol, M. (2018). Les activités numériques : des premières intuitions à la résolution de problèmes. Dans R. Baldy (dir.), *Dessiner, lire, écrire, calculer : un regard neuf* (p. 246-315). Paris, France : Editions in Press.
- Van Hout, G. (2005). L'apprentissage des nombres naturels. Dans A. Van Hout, C. Meljac, & J-P. Fischer (dir.), *Troubles du calcul et dyscalculies chez l'enfant* (2^e éd., p. 9-40). Paris, France : Masson.
- Vauthier, E. (2006). Un mode d'apprentissage efficace. *Cahiers pédagogiques*, (448). Repéré à <http://www.cahiers-pedagogiques.com/+No448-Le-jeu-en-classe-+>

Wechsler, D. (2005). *WISC-IV : Echelle d'intelligence de Wechsler pour enfants et adolescents (quatrième édition)*. Paris : Editions du Centre de Psychologie Appliquée (ECPA).

Wynn, K. (1992). Children's Acquisition of the Number Words and the Counting System. *Cognitive Psychology*, 24(2), 220-251.

Liste des annexes

Annexe n°1 : Lettre d'information, autorisation parentale et questionnaire

Annexe n°2 : Progression des entraînements

Annexe n°3 : Résultats aux pré-tests des groupes PMPC et PMT

Annexe n°4 : Résultats aux post-tests des groupes PMPC et PMT

Annexe n°5 : Comparaison des résultats obtenus aux pré- et post-tests des groupes PMPC et PMT