



HAL
open science

Evaluation expérimentale et longitudinale d'une application éducative visant le développement des compétences en littératie et en numératie émergentes

Aude Thomas

► To cite this version:

Aude Thomas. Evaluation expérimentale et longitudinale d'une application éducative visant le développement des compétences en littératie et en numératie émergentes. Psychologie. Université de Lorraine, 2020. Français. NNT: 2020LORR0240 . tel-03155246

HAL Id: tel-03155246

<https://hal.univ-lorraine.fr/tel-03155246>

Submitted on 1 Mar 2021

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

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



AVERTISSEMENT

Ce document est le fruit d'un long travail approuvé par le jury de soutenance et mis à disposition de l'ensemble de la communauté universitaire élargie.

Il est soumis à la propriété intellectuelle de l'auteur. Ceci implique une obligation de citation et de référencement lors de l'utilisation de ce document.

D'autre part, toute contrefaçon, plagiat, reproduction illicite encourt une poursuite pénale.

Contact : ddoc-theses-contact@univ-lorraine.fr

LIENS

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 122. 4

Code de la Propriété Intellectuelle. articles L 335.2- L 335.10

http://www.cfcopies.com/V2/leg/leg_droi.php

<http://www.culture.gouv.fr/culture/infos-pratiques/droits/protection.htm>

Ecole Doctorale SLTC (Sociétés, Langages, Temps, Connaissances)

Thèse

Présentée et soutenue publiquement pour l'obtention du titre de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITE DE LORRAINE

Mention « Psychologie »

Par Aude THOMAS

**Evaluation expérimentale et longitudinale d'une
application éducative visant le développement des
compétences en littératie et en numératie émergentes**

Soutenue le 11 décembre 2020

Membres du jury :

Directeur de thèse : Mr Youssef TAZOUTI Pr, Université de Lorraine, 2LPN, Nancy

Rapporteurs : Mr Jérôme CLERC Pr, Université de Grenoble-Alpes, LNPC, Grenoble

Mme Débora PONCELET Pr, Université du Luxembourg, Esch-sur-Alzette

Examineurs : Mme Annette JARLEGAN Pr, Université de Lorraine, LISEC, Nancy

Mr Michel FAYOL Pr émérite, Université de Clermont Auvergne,
LPSC, Clermont-Ferrand

Membre invité : Mme Yannick BOUCHE Inspectrice de l'Education Nationale

Laboratoire Lorrain de Psychologie et Neurosciences de la Dynamique des Comportements
(2LPN, EA 7489)



Je souhaite remercier la Caisse des Dépôts, qui a financé le projet LINUMEN et cette thèse via un appel à projets e-FRAN (Espaces de formation, de recherche et d'animation numérique) dans le cadre du programme PIA 2 (Programme d'Investissement d'Avenir 2). Je tiens également à remercier les autorités de l'académie Nancy-Metz pour leur soutien et leur implication dans ce projet.

Remerciements

Je souhaiterais adresser mes remerciements les plus sincères à toutes les personnes qui ont contribué au développement et à la mise en place du projet LINUMEN. La réalisation de cette thèse a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je souhaiterais témoigner ma gratitude.

Je tiens avant toute chose à remercier Youssef Tazouti, sans qui rien n'aurait été possible. Je te remercie de m'avoir suivie et soutenue tout au long de ces années et de m'avoir permis de concrétiser cette envie. Je te remercie de m'avoir intégrée au sein de l'équipe LINUMEN, de m'avoir guidée et conseillée tout au long de ce projet et de la rédaction de cette thèse. Ta rigueur scientifique m'a aiguillée tout au long de ce processus. Je te suis également reconnaissante de m'avoir consacré autant de temps. Merci d'avoir ponctué ces trois années de blagues et d'avoir rendu ces années très agréables.

Je tiens à remercier Mr le Professeur Jérôme Clerc et Mme la Professeure Débora Poncelet de m'avoir fait l'honneur d'être les rapporteurs de cette thèse et d'être les examinateurs de mon travail. Je remercie également Mr le Professeur émérite Michel Fayol d'avoir accepté de participer à mon jury de soutenance et Mme la Professeure Annette Jarlégan d'avoir accepté d'être la présidente de ce jury. Je souhaite remercier Mme Yannick Bouché, Inspectrice de l'Éducation Nationale, de prendre part à ce jury de thèse.

Mes plus sincères remerciements vont à l'ensemble des membres de l'équipe de co-conception avec qui j'ai eu la chance d'échanger et de débattre lors de l'élaboration de l'application. J'admire votre passion et votre dévouement au quotidien afin de garantir un enseignement de qualité aux élèves.

Cette thèse doit son existence à la participation des enfants et à l'investissement des enseignants sollicités dans le cadre du projet LINUMEN. Je tiens à les remercier vivement ainsi que leurs parents d'avoir accepté de contribuer à ce projet et à ce travail de recherche. Je souhaite également remercier les étudiants de L3 Psychologie et les M2 PEPA, sans qui les recueils des données n'auraient pas été possibles.

Je remercie chaleureusement Jean-Paul Fischer et Hélène Maire pour leur relecture attentive de ce manuscrit et pour leurs précieux conseils.

Je souhaite également remercier Mr Fabien Schneider, directeur de l'INSPE de Lorraine, pour son soutien vis-à-vis du projet LINUMEN.

Je remercie vivement Lara Hoareau, qui a également réalisée une thèse dans le cadre du projet LINUMEN. Depuis notre rencontre en M1, nous avons réussi à surmonter les difficultés qui se présentaient sur notre chemin. Ces trois années n'étaient pas les plus faciles, mais grâce à ton soutien et à nos échanges, nous avons réussi à surmonter cela. Je te souhaite plein de belles choses et beaucoup de réussites dans les projets que tu entreprendras.

Enfin, je souhaite également remercier ma famille et mes amis pour leur intérêt, leurs questions et leur soutien durant ces trois années. Merci d'être là, de me supporter et de m'accompagner dans ma vie quotidienne.

Résumé

Cette thèse présente deux objectifs. Le premier consiste à évaluer l'efficacité d'une intervention éducative implémentée sur tablette tactile dans le contexte de la classe aux apprentissages des élèves en littératie émergente et en numératie émergente. Le second objectif consiste à étudier les relations synchroniques et diachroniques entre littératie et numératie émergentes. Ce travail s'inscrit dans le cadre du projet LINUMEN (Littératie et NUMératie Emergentes par le Numérique) lauréat de l'appel à projets e-FRAN (PIA2). Durant les deux premières années du projet (mars 2017- octobre 2018) une équipe pluri-catégorielle constituée de chercheurs, d'acteurs éducatifs et d'ingénieurs en informatique ont participé à la co-conception de l'application éducative *AppLINO* (Apprendre avec Linou en maternelle). La phase d'expérimentation de cette intervention (octobre 2018 – juin 2020) consistait à tester *AppLINO* selon une méthodologie quasi-expérimentale et longitudinale. Pour cela, les élèves du groupe expérimental ont utilisé pendant plusieurs semaines l'application *AppLINO*. Dans le groupe contrôle les élèves suivaient les programmes de l'école maternelle sans modification ou indications pour les enseignants. L'étude a porté sur 725 élèves de maternelle, scolarisés en moyenne section (356 filles et 369 garçons). Des mesures des compétences en littératie et en numératie émergentes ont été réalisées en début et en fin d'année.

Des analyses de régressions multiniveaux ont montré que les enfants du groupe expérimental scolarisés dans des écoles hors réseau d'éducation prioritaire ont de meilleures performances en fin d'année que les autres. Des éléments d'explication des effets partiels de l'intervention sont discutés et des pistes d'amélioration sont évoquées. Par ailleurs, des modèles en pistes ont examiné les liens synchroniques et diachronique entre la littératie et la numératie émergentes. Les différents modèles testés mettent en avant l'influence de la littératie émergente sur la numératie émergente à ce niveau de scolarité.

Dans le cadre de cette recherche, une première version d'une application à visée éducative a été développée (*AppLINO*). Les premiers résultats nous encouragent à prolonger le développement itératif de cet outil. Par conséquent, nous poursuivons donc notre objectif initial afin d'obtenir une version améliorée de l'application qui pourrait être déployée et utilisée à plus grande échelle dans les classes de moyenne et de grande section de maternelle.

Mots clefs : application éducative, littératie émergente, numératie émergente, analyses multiniveaux, intervention

Abstract

This thesis has two objectives. The first consists of assessing the effectiveness of an educational intervention implemented on tablets in the classroom context to students' learning in early literacy and early numeracy. The second objective examines the synchronic and diachronic relationships between early literacy and early numeracy. This work belongs to the LINUMEN project (Littérature et NUMératie Emergentes par le Numérique), laureate of the e-FRAN call for projects (PIA2). During the first two years of the project (March 2017-October 2018) a multidisciplinary team made up of researchers, educational actors and computer engineers were involved in the co-design of the educational application *AppLINOU* (Apprendre avec Linou en maternelle). The experimentation phase of this intervention (October 2018 - June 2020) tested *AppLINOU* with a quasi-experimental and longitudinal methodology. Students in the experimental group used *AppLINOU* for several weeks. In the control group, students followed the kindergarten curriculum without any modifications or instructions for teachers. The study involved 725 kindergarten students, enrolled in pre-kindergarten (356 girls and 369 boys). Measures of early literacy and early skills were conducted at the beginning and end of the year.

Multilevel regressions analyses showed that the children in the experimental group enrolled in schools outside priority education networks performed better at the end of the year than the others. Elements that explain the partial effects of the intervention are discussed and ways of improvement are mentioned. In addition, lead models have examined the synchronic and diachronic links between early literacy and numeracy. Different models tested highlight the influence of early literacy on early numeracy at this educational level.

As part of this research, an initial version of an educational application was developed (*AppLINOU*). The preliminary results encourage us to continue the iterative development of this tool. Therefore, we are pursuing our initial objective to obtain an improved version of the application that could be deployed and used on a larger scale in middle and large kindergarten classes.

Keywords: educational app, early literacy, early numeracy, multilevel analysis, intervention

Table des matières

Introduction	11
Chapitre 1 : Le développement des compétences en littératie émergente.....	18
1.1. L’acquisition du langage de 0 à 3 ans	18
1.1.1. Différentes approches théoriques de l’acquisition du langage	18
1.1.2. Le développement des compétences langagières du jeune enfant (de 0 à 3 ans).....	19
1.1.3. Les facteurs influençant le développement langagier du jeune enfant (de 0 à 3 ans) .	22
1.2. La littératie émergente	24
1.2.1. Définition du concept de littératie émergente.....	24
1.2.2. Les différents modèles de la littératie émergente	27
1.2.2.1. Le modèle Outside-In, Inside-Out (Whitehurst & Lonigan, 1998)	27
1.2.2.2. Le modèle de littératie émergente de Pinto et al. (2008, 2009)	28
1.2.2.3. Le Comprehensive Emergent Literacy Model (Rohde, 2015)	30
1.2.3. Les principales composantes de la littératie émergente	31
1.2.3.1. Les connaissances liées à l’écrit (« print knowledge »).....	32
1.2.3.2. Les capacités de traitement phonologique.....	35
1.2.3.3. Les compétences de langage oral.....	39
1.2.3.3.1. Le vocabulaire.....	40
1.2.3.3.2. La compréhension.....	41
Conclusion.....	43
Chapitre 2 : Le développement des compétences en numératie émergente	44
2.1. Le développement des compétences en numératie émergente de 0 à 3 ans.....	44
2.1.1. Différentes approches théoriques de l’acquisition des compétences en numératie émergente.....	45
2.1.1.1. L’acquisition du nombre selon Piaget	45
2.1.1.2. L’approche socio-constructiviste du nombre	46
2.1.1.3. Les principes de Gelman et Gallistel (1978)	46
2.1.1.4. L’acquisition de la chaîne numérique par Fuson et al (1982).....	47
2.1.1.5. Le sens du nombre (Dehaene, 2010).....	48
2.1.2. Le développement des compétences numériques du jeune enfant (de 0 à 3 ans)	49
2.1.2.1. Avant le développement du langage oral.....	49
2.1.2.2. Après le développement du langage oral	51
2.1.3. Les facteurs influençant le développement numérique du jeune enfant (de 0 à 3 ans)51	51
2.2. La numératie émergente.....	52
2.2.1. Définition du concept de numératie émergente.....	52
2.2.2. Les différents modèles de la numératie émergente	54
2.2.2.1. Le modèle du triple code (Dehaene, 1992; Dehaene & Cohen, 1995).....	54
2.2.2.2. Le modèle du développement mathématique (Krajewski & Schneider, 2009).....	56
2.2.2.3. Le modèle des phases développementales de la numératie émergente (Purpura et al., 2013).....	59
2.2.2.4. Les compétences numériques de base pour l’apprentissage des mathématiques chez les enfants de cinq à huit ans (Aunio & Räsänen, 2016).....	60

2.2.3. Les principales composantes de la numératie émergente	62
2.2.3.1. La connaissance des chiffres	62
2.2.3.2. La récitation de la chaîne numérique	64
2.2.3.3. Le dénombrement et la cardinalité	65
2.2.3.4. Le subitizing et l'estimation	66
2.2.3.5. Les correspondances chiffre/quantité	67
2.2.3.6. Les problèmes à histoire	68
Conclusion	68
Chapitre 3 : L'évaluation des compétences en littératie et numératie émergentes chez des élèves de maternelle	70
3.1. L'évaluation des élèves de maternelle	70
3.2. Les outils d'évaluation existants	71
3.2.1. Les outils d'évaluation de la littératie émergente	72
3.2.2. Les outils d'évaluation de la numératie émergente	75
3.3. L'élaboration d'un outil d'évaluation papier-crayon	77
Article 1: Development of a French-language early literacy scale: Structural analysis and links between the dimensions of early literacy	81
Article 2: Early Numeracy Assessment in French Preschool: structural analysis and links with children's characteristics	123
Conclusion	156
Chapitre 4 : Les applications éducatives et les apprentissages à l'école maternelle : Apports du projet LINUMEN	157
4.1. Présentation du projet LINUMEN	157
4.1.1. Les objectifs du projet	157
4.1.2. La phase de co-conception	158
4.1.3. La phase expérimentale	160
4.1.4. Les mesures réalisées	163
4.1.5. L'utilisation de l'application AppLINOu dans les classes	164
4.2. Résultats de l'expérimentation	165
4.2.1. Description de l'échantillon	165
4.2.2. Statistiques descriptives des épreuves de littératie et de numératie émergentes	166
4.2.3. Analyses factorielles confirmatoires	169
4.2.4. Effet de l'intervention	172
4.2.4.1. Comparaisons de moyennes	172
4.2.4.2. Analyses de régressions multiniveaux	175
Article 3 : Contribution d'une application éducative aux apprentissages en littératie et en numératie émergentes : une recherche quasi-expérimentale	176

Chapitre 5 : L'aspect prédictif et les liens entre les compétences en littératie et en numératie émergente	215
5.1. L'aspect prédictif de la littératie émergente	216
5.1.1. <i>La connaissance des lettres</i>	216
5.1.2. <i>La conscience phonologique</i>	217
5.1.3. <i>Le vocabulaire</i>	218
5.1.4. <i>La compréhension orale</i>	219
5.2. L'aspect prédictif de la numératie émergente	219
5.2.1. <i>La connaissance des chiffres</i>	221
5.2.2. <i>La récitation de la chaîne numérique</i>	222
5.2.3. <i>Le dénombrement et la cardinalité</i>	222
5.2.4. <i>Le subitizing, l'estimation et les comparaisons de quantités</i>	223
5.2.5. <i>Les correspondances chiffre/quantité et quantité/chiffre</i>	224
5.2.6. <i>Les problèmes verbaux (calculs simples)</i>	224
5.3. Les liens existants entre les différentes composantes de la littératie émergente et de la numératie émergente	224
5.3.1. <i>Les liens synchroniques entre les compétences en littératie émergente à l'école maternelle</i>	224
5.3.2. <i>Les liens synchroniques entre les compétences en numératie émergente à l'école maternelle</i>	228
5.3.3. <i>Les liens synchroniques entre les compétences en littératie émergente et en numératie émergente à l'école maternelle</i>	231
5.3.4. <i>Les liens diachroniques entre les compétences en littératie émergente et en numératie émergente et les compétences ultérieures</i>	235
5.4. Les facteurs explicatifs des liens entre compétences en littératie et en numératie émergentes	237
5.4.1. <i>Le vocabulaire</i>	237
5.4.2. <i>Les compétences de traitement visuel</i>	237
5.4.3. <i>L'intelligence générale non-verbale</i>	238
5.4.4. <i>La vitesse de traitement de l'information</i>	238
5.4.5. <i>Les fonctions exécutives</i>	239
5.4.6. <i>Les facteurs génétiques et environnementaux</i>	240
5.5. Résultats	241
5.5.1. <i>Les liens synchroniques entre les compétences en littératie et en numératie émergentes</i>	241
5.5.2. <i>Les liens diachroniques entre les compétences en littératie et en numératie émergentes</i>	248

5.6. Discussion	259
5.6.1. Les liens synchroniques entre les compétences en littératie et en numératie émergentes	259
5.6.2. Les liens diachroniques entre les compétences en littératie et en numératie émergentes	263
Conclusion	267
Discussion générale.....	269
6.1. Construction et validation d’outils de mesure des compétences en littératie et en numératie émergentes	269
6.2. L’utilisation de l’application AppLINOu dans les classes	270
6.2.1. Les effets de l’intervention	270
6.2.2. Interaction entre le groupe et le type d’école	271
6.2.3. Eléments d’interprétation	272
6.3. Limites de l’étude	273
Conclusion et perspectives	275
7.1. Les outils d’évaluation	275
7.2. L’intervention	276
7.3. Liens entre littératie et numératie émergentes	277
Bibliographie.....	279
Annexe 1 : Le développement de l’outil d’évaluation LINUMEN Evaluation	322
A. Les épreuves en littératie émergente	323
B. Les épreuves en numératie émergente	326
Annexe 2 : A new educational tablet app for preschoolers: input from co-design	329

Introduction

Dès son plus jeune âge, l'enfant en interaction avec son environnement immédiat, développe des compétences en lien avec le langage oral et écrit et les compétences mathématiques précoces. Ainsi, les jeunes enfants rentrent à l'école maternelle avec des niveaux variés de connaissances et de compétences. Ces différences sont principalement liées à l'origine sociale des élèves. En effet, les enfants issus de milieux défavorisés ont tendance à avoir des compétences moins développées que leurs pairs issus de milieux plus favorisés (*e.g.* DeFlorio & Beliakoff, 2015; Rowe et al., 2012). Très tôt, nous pouvons constater une reproduction des inégalités sociales au sein des classes. Dans leur étude, Morgan et al. (2009) ont montré que parmi les 10 % d'élèves ayant les plus faibles compétences mathématiques au préscolaire¹, 70% d'entre eux se retrouvent également dans les 10 % des élèves ayant les plus faibles compétences mathématiques au CM2 (*grade 5*). De même, d'autres auteurs ont également montré l'importance des compétences langagières dès la période préscolaire et leur aspect prédictif plusieurs années plus tard (*e.g.* Storch & Whitehurst, 2002). Toutes ces compétences émergentes peuvent alors être regroupées sous les termes de littératie et de numératie émergentes. En s'appuyant sur ces constats, il semble primordial d'identifier les élèves présentant des difficultés précoces afin d'anticiper leurs éventuelles difficultés ultérieures.

La littératie émergente correspond à un ensemble de connaissances, de compétences et d'attitudes qui sont des précurseurs développementaux de la lecture et de l'écriture (Snow et al., 1998; Whitehurst & Lonigan, 1998). Celle-ci renvoie donc aux premières acquisitions des jeunes enfants concernant le langage oral et écrit et son utilisation. Pour considérer une compétence comme étant une compétence en littératie émergente, celle-ci doit être présente dès la période préscolaire et doit être corrélée et prédictive des compétences ultérieures (Lonigan & Shanahan, 2009). Différents modèles théoriques ont tenté de modéliser le développement des compétences en littératie émergente. Whitehurst et Lonigan (1998) sont les premiers à avoir modélisé ces compétences. Pour eux, les compétences en littératie émergente permettent l'acquisition de la lecture et se décomposent en unités contextuelles, sémantiques, langagières, sonores et écrites. Dans les modèles plus récents (Pinto et al., 2009 ; Rohde, 2015), trois principales dimensions de la littératie émergente sont représentées : les connaissances

¹ Dans ce manuscrit, nous utilisons le terme préscolaire pour parler plus largement des enfants de trois à six ans scolarisés dans différents pays.

alphabétiques et de l'écrit, la conscience phonologique et le langage oral. Les connaissances alphabétiques renvoient à des compétences comme la connaissance du sens de lecture et d'écriture, la compréhension de l'aspect transmissif de l'écrit, la connaissance de l'alphabet ou encore la connaissance du nom et du son des lettres (*e.g.* Puranik et al., 2011). La conscience phonologique fait référence à la compréhension de la structure sonore du langage oral (Caravolas et al., 2012). Enfin, le langage oral correspond à l'ensemble des compétences de compréhension de phrases et de textes ainsi qu'au vocabulaire compris et utilisé par l'enfant.

Comme pour les compétences en littératie émergente, les enfants commencent à développer des compétences en mathématiques très précocement, avant même d'entrer à l'école maternelle et sans instruction particulière (*e.g.* Sarama & Clements, 2009). Ces compétences en numératie émergente s'acquièrent au travers des interactions quotidiennes de l'enfant avec son environnement et constituent une condition préalable pour développer des compétences mathématiques plus complexes. La numératie émergente fait donc référence à une panoplie de compétences et de concepts qui forment un système interconnecté de connaissances mathématiques nécessaires au développement mathématique ultérieur (Purpura & Napoli, 2015). Plusieurs chercheurs ont tenté de modéliser le développement des compétences en numératie émergente. Par exemple, le modèle du Triple Code (Dehaene, 1992) postule l'existence de trois systèmes de représentation du nombre : le système verbal, le système visuel arabe et le système de quantités. Alors que Dehaene tente de préciser les bases cérébrales de son modèle, les modèles de Krajewski et Schneider (2009) et de Purpura et al. (2013) ont tenté de représenter le développement des compétences en numératie émergente par l'intermédiaire d'une approche développementale. Plus généralement, les compétences en numératie émergente sont représentées par trois construits différents : la compréhension de relations numériques (relations), les compétences de comptage (nombres) et les compétences arithmétiques de base (opérations) (*e.g.* National Research Council (U.S.), 2009). Tout d'abord, la capacité à comparer des quantités et des nombres constitue la base de la compréhension des relations. Ensuite, les compétences de comptage englobent diverses activités comme le comptage verbal, le comptage de sous-ensembles ou encore le subitizing. Enfin, les compétences arithmétiques de base correspondent aux tâches d'additions et de soustractions. Bien que de nombreux chercheurs s'accordent sur ces trois construits distincts, les recherches actuelles montrent plutôt l'aspect unidimensionnel de la numératie émergente.

Les compétences émergentes des jeunes enfants durant les années préscolaires prédisent leur réussite scolaire ultérieure. Certaines études ont montré que ces compétences prédisaient

les connaissances mathématiques jusqu'au lycée ainsi que l'acquisition et la compréhension de la lecture plusieurs années plus tard (Duncan et al., 2007; Locuniak & Jordan, 2008; National Early Literacy Panel (NELP), 2008; National Research Council (U.S.), 2009). Ainsi, le développement des compétences émergentes dès la période préscolaire représente un enjeu majeur pour les parents et les éducateurs. L'aspect prédictif des compétences en littératie et en numératie émergentes nous questionne alors sur les possibles liens entre ces compétences. Des liens bidirectionnels semblent exister entre les compétences de littératie et de numératie, de la maternelle jusqu'au lycée (Claessens & Engel, 2013; Duncan et al., 2007; Praet et al., 2013). Nous pouvons alors distinguer deux types de liens, d'une part, les liens synchroniques qui s'intéressent aux interactions entre les compétences à un moment donné et, d'autre part, les liens diachroniques qui questionnent l'aspect longitudinal des liens entre les compétences. À l'âge préscolaire, des liens synchroniques peuvent être observés entre les compétences d'un même domaine. Par exemple, la connaissance des lettres, la conscience phonologique et le langage oral sont modérément corrélés (*e.g.* Koponen et al., 2007). Des liens forts existent également entre les compétences en littératie et en numératie émergente. Par exemple, les compétences phonologiques sont liées aux compétences de comptage (*e.g.* Zhang et al., 2014). Enfin, en s'intéressant aux liens diachroniques, nous observons d'une part, que les compétences initiales dans un même domaine sont corrélées avec ces mêmes compétences ultérieures, d'autre part, les compétences initiales dans un domaine sont également liées aux compétences ultérieures de l'autre domaine.

De nombreux acteurs espèrent que l'utilisation des nouvelles technologies permettra de développer les compétences des enfants tout en s'adaptant aux difficultés de chacun. Ainsi, une multitude d'outils numériques sur ordinateurs, smartphones ou tablettes tactiles ont vu le jour. Depuis quelques années, le numérique et les nouvelles technologies sont de plus en plus présents à l'école. L'introduction progressive des nouvelles technologies au sein des salles de classe a soulevé de nombreuses questions en rapport avec l'impact du numérique sur les apprentissages des élèves. Le numérique peut-il contribuer aux apprentissages des élèves ? Dans quelles conditions utiliser des supports numériques (*e.g.* tablettes tactiles, ordinateur, livres électroniques) au sein de la classe et avec des élèves d'âges différents ? Ou encore, comment utiliser le numérique pour s'adapter et suivre l'évolution des compétences des élèves ? Le numérique englobe de nombreux outils qui peuvent être utilisés différemment en fonction de l'âge des enfants. Ainsi, les tablettes tactiles permettent aux enfants d'interagir avec les supports numériques dès leur plus jeune âge. Les caractéristiques techniques ainsi que

l'aspect tactile des tablettes rendent cet outil adapté aux jeunes enfants contrairement à l'ordinateur, qui nécessite l'utilisation d'une souris et d'un clavier difficilement manipulables par des enfants d'âge préscolaire (Neumann, 2018).

Les outils numériques sont de plus en plus présents au sein des salles de classe. Cependant, pour utiliser les outils numériques de façon optimale, il est nécessaire que les enseignants soient formés, d'une part à l'utilisation de ces outils et d'autre part, à l'appréciation des qualités pédagogiques de ceux-ci. Par exemple, de rares applications sur tablettes présentent des caractéristiques telles que les *feedbacks*, les explicitations ou encore une adaptation au niveau de l'enfant permettant à celui-ci d'utiliser seul la tablette. Ces caractéristiques sont primordiales pour optimiser les apprentissages de l'enfant. La plupart des applications disponibles pour les enfants d'âge préscolaire nécessiteraient la présence d'un adulte encadrant l'enfant et interagissant avec lui. Malgré ces difficultés, la tablette, par l'intermédiaire des applications qui peuvent y être implémentées, semble permettre à l'enfant de développer certaines compétences en littératie et en numératie émergentes tout en jouant (Neumann & Neumann, 2014). De nombreuses recherches se sont intéressées à la place du numérique dans le cadre scolaire auprès d'enfants de plus de six ans. Cependant de plus rares études se focalisent sur l'apport du numérique (outils spécifiques ou applications éducatives) chez des enfants d'âge préscolaire. C'est le cas du projet LINUMEN (**L**ittératie et **N**UMératie **É**mergentes par le Numérique) qui s'intéresse à l'apport d'une application éducative sur tablette tactile visant à développer les apprentissages des élèves de maternelle.

Le projet LINUMEN a été lauréat de l'appel à projet e-FRAN (Espaces de formation, de recherche et d'animation numérique) et s'inscrit dans le cadre du Programme d'Investissement d'Avenir 2. L'objectif des projets e-FRAN était de fédérer différents acteurs (*e.g.* écoles, équipes éducatives, équipes de recherche, *start-up*) autour d'un projet innovant impliquant le numérique. Le projet LINUMEN porte ainsi plus spécifiquement sur la co-conception et l'évaluation d'une application éducative sur tablette tactile favorisant l'acquisition des compétences liées à la littératie et à la numératie émergentes des enfants d'âge préscolaire. L'objectif principal de ce projet était de construire des outils sur tablette tactile destinés à accompagner l'action des enseignants de maternelle dans le développement des compétences émergentes des élèves. Après plus d'une année de co-conception, impliquant différents acteurs (enseignants chercheurs, enseignants, conseillers pédagogiques, inspectrice de l'éducation nationale et enseignants pour les ressources et les usages numériques), deux applications ont vu le jour : une application permettant de mesurer les compétences en littératie et en numératie

émergentes des élèves de moyenne et de grande section de maternelle (*LINUMEN Evaluation*) et une application éducative comportant différentes activités (*AppLINO* : Apprendre avec LINO en maternelle). L'application *AppLINO* a pour objectif de développer les compétences en littératie et en numératie émergentes des élèves âgés de quatre à six ans.

L'objectif de cette thèse de doctorat est double : il s'agit tout d'abord de tester l'efficacité de l'intervention mise en place dans les classes (i.e., l'utilisation régulière de l'application *AppLINO*). S'inscrivant dans le courant de l'éducation fondée sur les preuves, nous avons mis en place un protocole expérimental longitudinal dans lequel le groupe expérimental (e.g. les enfants utilisant l'application *AppLINO*) est comparé à un groupe contrôle durant une période de deux années. Tous les enseignants et les élèves du groupe expérimental ont également suivi un protocole rigoureux avec une planification des séances et des activités à réaliser durant les deux années. Les enseignants ont été formés à l'utilisation de l'application *AppLINO* ainsi qu'au développement des compétences en littératie et en numératie émergentes chez l'enfant d'âge préscolaire. Dans un second temps, les liens entre les diverses compétences en littératie et en numératie émergentes seront abordés. Cette question permettra de mieux comprendre la construction et l'évolution des compétences en littératie et en numératie émergentes des élèves de moyenne et de grande section de maternelle.

Ainsi, dans cette thèse, nous tenterons donc de répondre à trois questions principales :

1. L'utilisation de l'application AppLINO a-t-elle permis de développer les compétences en littératie et en numératie émergente des élèves de moyenne et de grande section de maternelle ?

Hypothèse 1 : En fin de moyenne section, les élèves du groupe expérimental auront de meilleures performances en littératie émergente que les élèves du groupe contrôle.

Hypothèse 2 : En fin de moyenne section, les élèves du groupe expérimental auront de meilleures performances en numératie émergente que les élèves du groupe contrôle.

Hypothèse 3 : En fin de moyenne section, les élèves en REP (Réseau d'Education Prioritaire) du groupe expérimental auront de meilleures performances en littératie émergente que les élèves en REP du groupe contrôle.

Hypothèse 4 : En fin de moyenne section, les élèves en REP (Réseau d'Education Prioritaire) du groupe expérimental auront de meilleures performances en numératie émergente que les élèves en REP du groupe contrôle.

2. Comment les diverses compétences en littératie et en numératie émergentes sont-elles liées à différents moments du parcours développemental de l'enfant ?

2.1. Quels liens entretiennent les compétences en littératie et en numératie émergentes au début de la moyenne section de maternelle ?

2.2. Quels liens entretiennent les compétences en littératie et en numératie émergentes à la fin de la moyenne section de maternelle ?

Cette seconde question de recherche vise à examiner les liens synchroniques entre les compétences en littératie et en numératie émergentes. En comparant ces deux moments, nous pourrions donc observer si les liens entre les compétences restent stables ou évoluent durant une année. Nous souhaitons également examiner les liens synchroniques à la fin de la grande section. Toutefois, le confinement entraîné par le COVID-19 ayant contraint les écoles à fermer à partir du mois de mars 2020, nous n'avons pas eu la possibilité d'évaluer les élèves de notre échantillon en fin de grande section. Nous ne pourrions donc pas aborder ce point dans cette thèse. Cependant, nous sommes actuellement en train de récupérer les évaluations nationales de début CP. Ainsi, nous espérons pouvoir observer les effets différés du programme d'intervention sur les compétences des élèves en français et en mathématiques.

Deux types de liens diachroniques pouvaient être observés. D'une part, les compétences initiales dans un domaine influencent le développement ultérieur de ces mêmes compétences et d'autre part, les compétences initiales dans un domaine influencent le développement ultérieur des compétences de l'autre domaine. Nous nous sommes donc posé la question suivante :

3. Comment les compétences initiales des élèves influencent-elles le développement des compétences ultérieures ?

3.1. Comment les compétences initiales en littératie émergente influencent-elles le développement ultérieur de ces mêmes compétences ?

3.2. Comment les compétences initiales en numératie émergente influencent-elles le développement ultérieur de ces mêmes compétences ?

Dans les recherches internationales, des influences bidirectionnelles ont été observées entre les compétences en littératie et en numératie émergentes (Duncan et al., 2007; Praet et al., 2013). Cependant, ces résultats n'ont pas été reproduits auprès d'un échantillon d'élèves français. Nous nous questionnons également sur les possibles influences réciproques entre les

compétences en littératie et en numératie émergentes par l'intermédiaire de deux questions de recherche :

- 3.3. Comment les compétences initiales en littératie émergente influencent-elles le développement ultérieur des compétences en numératie émergente ?
- 3.4. Comment les compétences initiales en numératie émergente influencent-elles le développement ultérieur des compétences en littératie émergente ?

Le premier chapitre de cette thèse est consacré aux compétences en littératie émergente et à leur évolution durant la période préscolaire. Le second chapitre de cette thèse porte sur le développement des compétences en numératie émergente durant la période préscolaire. Ces deux chapitres présentent des revues de la littérature actualisées ainsi que les principaux modèles théoriques représentant la littératie et la numératie émergentes. Le troisième chapitre de cette thèse aborde l'évaluation des différentes compétences en littératie et en numératie émergentes chez les élèves de maternelle par l'intermédiaire d'une revue exhaustive des outils d'évaluations préexistants. Afin de mesurer l'effet du programme d'intervention mis en place, nous avons construit un outil d'évaluation mesurant la plupart des compétences en littératie et en numératie émergentes. Cet outil n'a pas d'équivalent en France. La validation de cet outil est présentée à travers les articles 1 et 2 : le premier se focalise sur l'évaluation des compétences en littératie émergente et le second sur celles en numératie émergente. Dans ce chapitre, le processus de développement de l'application *LINUMEN Evaluation* sera également présenté. Le quatrième chapitre de cette thèse se focalise sur l'utilisation du numérique dans le cadre des apprentissages scolaires et plus particulièrement sur les apports du projet LINUMEN. Ce chapitre tentera de répondre à notre première question de recherche à savoir quels sont les effets de l'utilisation de l'application *AppLINOU* : ces résultats seront présentés plus finement et discutés dans l'article 3. Enfin, le dernier chapitre abordera les liens entre les compétences émergentes et l'aspect prédictif de celles-ci. Durant la période préscolaire, les compétences en littératie et en numératie émergentes sont fortement corrélées, mais quelles compétences sont plus fortement corrélées ? Comment prédire l'évolution de ces compétences ? Et quelles compétences influencent le plus le développement scolaire ultérieur de l'enfant ? Nous tenterons donc de répondre à ces questions dans ce dernier chapitre.

Chapitre 1 : Le développement des compétences en littératie émergente

La littératie émergente englobe de nombreuses connaissances et compétences en lien avec l'écrit et l'oral qui se développent dès le plus jeune âge (Whitehurst & Lonigan, 1998). Ainsi, dès sa naissance, l'enfant est immergé dans un environnement sollicitant l'ensemble de ses sens. Les stimulations perçues par l'enfant sollicitent alors les réseaux neuronaux et les parties du corps engagés dans la perception, la compréhension et la production du langage oral et écrit. Dans ce chapitre, nous nous proposons donc d'aborder dans un premier temps l'acquisition du langage oral de zéro à trois ans et les facteurs qui y sont associés. Puis, dans un second temps, nous définirons la littératie émergente, les différents modèles théoriques la représentant ainsi que le développement des différentes composantes de la littératie émergente.

1.1. L'acquisition du langage de 0 à 3 ans

Dès le plus jeune âge, le langage fait partie intégrante du quotidien des jeunes enfants. Dès la 25^{ème} semaine, le système auditif du fœtus devient fonctionnel et celui-ci est proche de celui de l'adulte vers la 35^{ème} semaine (Plaza, 2014). Le fœtus est alors capable de distinguer la voix, la prosodie et la phonologie. Si l'enfant perçoit très tôt les différents sons du langage, en revanche la production du langage est un processus long et progressif.

1.1.1. Différentes approches théoriques de l'acquisition du langage

Au cours du siècle dernier, plusieurs auteurs ont tenté de théoriser l'acquisition du langage. Tout d'abord, certaines approches béhavioristes ont considéré que le comportement verbal était un comportement comme les autres, ayant pour objectif d'avoir un effet sur l'environnement. Réciproquement, l'environnement devrait avoir en retour un effet sur la personne ayant émis ce comportement. Ainsi, les demandes exprimées verbalement par l'enfant seraient renforcées ou non par son entourage, selon le degré de compréhension de la demande de l'enfant. Si l'adulte comprend la demande du jeune enfant alors la production verbale de celui-ci sera renforcée et améliorée. Dans le cas contraire, la production verbale non renforcée tendrait à disparaître. L'une des principales critiques de ces modèles réside dans la place attribuée au conditionnement et à l'imitation, qui ne permettraient pas à l'enfant de produire des phrases qu'il n'a jamais entendues (Florin, 2016).

Chomsky, avec son approche générativiste, a tenté de modéliser l'acquisition du langage. Selon cette approche, l'être humain serait doté d'une grammaire universelle innée, qui définirait les propriétés phonétiques, syntaxiques et sémantiques des phrases (Chomsky, 1979). Ainsi, à partir d'un système fini de règles, l'individu serait capable de comprendre et de produire une infinité de phrases, sans les avoir entendues au préalable. Concernant l'acquisition du langage, Chomsky fait la différence entre compétence et performance. Pour lui, la compétence est abstraite et désigne une connaissance intuitive vis-à-vis du système de règles de la langue tandis que la performance se réfère à l'utilisation de ces règles dans la production verbale et dans la compréhension. Ainsi, le développement du langage découlerait d'une capacité innée qui pourrait être justifiée par l'acquisition rapide, entre deux et cinq ans, des propriétés logiques et des règles de la langue.

Plus récemment sont apparues les approches fonctionnalistes du langage qui s'opposent à la grammaire générative de Chomsky. Les approches fonctionnalistes mettent l'accent sur le rôle central de l'environnement, des relations sociales et des déterminants cognitifs généraux dans le développement du langage. Ces théories ne nient pas pour autant l'existence de prédispositions ou contraintes biologiques, ni même les particularités langagières pouvant influencer l'acquisition du langage (Bassano, 2007). Le développement langagier est alors perçu comme un phénomène global et interactif, prenant appui sur des facteurs génétiques et environnementaux (Bassano, 2005).

1.1.2. Le développement des compétences langagières du jeune enfant (de 0 à 3 ans)

Le langage se décline selon différents registres : la prosodie, la phonologie, le lexique, la morphosyntaxe et la pragmatique (Plaza, 2014). La prosodie fait référence à la musicalité de la parole, c'est-à-dire l'intonation, le rythme, le débit ou les pauses dans la parole. La phonologie correspond à l'organisation des phonèmes ou sons du langage. Le lexique se réfère au répertoire de mots d'une langue ou à l'ensemble de mots stockés en mémoire chez un individu. La morphosyntaxe correspond aux règles de combinaisons régissant la construction des phrases et porte aussi bien sur la forme des mots que sur l'organisation des mots ou groupes de mots au sein d'une phrase (Pariette, 2009). Enfin, la pragmatique renvoie aux règles de communication spécifiques à une langue. A ces registres, s'ajoute celui de la sémantique, c'est-à-dire l'accès au sens des mots, qui nécessite l'emploi des autres registres (Plaza, 2014).

Lorsque l'on parle de langage, celui-ci peut prendre deux formes : d'une part la réception du langage, c'est-à-dire la compréhension, et d'autre part la production du langage, c'est-à-dire l'expression orale. Dès sa naissance, le bébé a les capacités auditives nécessaires au traitement des sons de la parole. Les nouveau-nés sont alors rapidement sensibles à la prosodie de leur langue maternelle. Cette compétence est d'autant plus accentuée par le *motherese* (ou *parentese* pour une terminologie plus inclusive) aussi appelé langage dirigé vers l'enfant ou « parler bébé ». Il s'agit d'un langage spécifique adressé au jeune enfant avec une modulation de la prosodie et de la voix et une accentuation des contours de la parole. De nombreux auteurs ont montré que les aspects prosodiques et linguistiques du *motherese* jouent un rôle important dans l'acquisition des langues (e.g. Saint-Georges et al., 2013 pour une revue de la littérature). Les indices prosodiques (pauses, allongement des dernières syllabes, variation de fréquence et d'intensité), propres à chaque langue, permettent au jeune enfant de segmenter le langage oral. De plus, les jeunes enfants disposent d'aptitudes phonologiques précoces (Kail, 2015). Certains indices phonémiques (séquences de phonèmes spécifiques au début ou à la fin des mots) permettent aussi à l'enfant de segmenter le langage oral et de discriminer les mots. Ils peuvent ainsi différencier des syllabes et sont sensibles aux contrastes acoustiques des différentes langues. A partir de six mois, le bébé discrimine de moins en moins les sons n'appartenant pas à sa langue maternelle. Il devient alors plus sensible aux sons spécifiques de sa langue maternelle. Certaines études ont d'ailleurs montré que dès l'âge de huit mois, le jeune enfant est capable de détecter et d'extraire des régularités dans des stimuli auditifs représentant des sons de parole (Aslin et al., 1998 ; Naigles, 2002).

Si le jeune enfant commence à comprendre sa langue maternelle dès l'âge de 8-10 mois, il existe néanmoins un décalage important entre la compréhension et la production langagière qui ne débute que vers 12-15 mois. Cette différence développementale pourrait s'expliquer du fait du temps important de maturation et de coordination de l'appareil vocal (larynx, palais, mâchoire, lèvres et langue). Plusieurs études ont d'ailleurs montré que dès les premiers mois de vie, le cerveau de l'enfant est organisé en réseaux fonctionnels proches de ceux de l'adulte (Dehaene-Lambertz, 2004). Cela suggère donc que l'exposition de l'enfant à sa langue maternelle façonne des réseaux neuronaux préexistants dans notre patrimoine génétique.

Afin de mesurer les compétences communicationnelles des jeunes enfants âgés de 8 à 30 mois, une échelle d'évaluation appelée *MacArthur Communicative Development Inventories* a été développée (Fenson et al., 1993). La taille du vocabulaire des enfants est mesurée à l'aide des réponses des parents concernant les mots compris et produits par leur enfant. Les jeunes

enfants français comprennent en moyenne 16 mots à l'âge de 8 mois contre 161 mots à l'âge de 16 mois et produisent en moyenne 0,5 mots à l'âge de 8 mois et 14,8 mots à 16 mois (Kern, 2007). Le vocabulaire est l'une des composantes principales du langage et de son acquisition (Pinker & Jackendoff, 2005). Cependant, il existe de nombreuses différences interindividuelles dans la trajectoire développementale du vocabulaire (Kern & Dos Santos, 2011).

Le babillage apparaît entre 6 et 9 mois et constitue la première production langagière du jeune enfant. L'enfant prononce alors des séquences consonne-voyelle, qu'il répète souvent. Entre 9 et 15 mois, l'enfant commence à produire des pré-mots en utilisant des associations consonne/voyelle présentes dans sa langue maternelle. Les phonèmes prononcés sont choisis en fonction du degré de difficulté articulatoire. Ainsi, la première voyelle prononcée par l'enfant est souvent le /a/ tandis que la première consonne est souvent le /p/ (Plaza, 2014). Les premiers mots sont généralement produits entre le 11^{ème} et le 14^{ème} mois. Une étude auprès d'un échantillon français a montré que la production de vocabulaire débutait vers l'âge de 12 mois (Kern, 2007). Après avoir produit ses premiers mots, le vocabulaire du jeune enfant augmentera très lentement, à hauteur de quelques mots par semaine. En français, un instrument a été développé afin de mesurer le vocabulaire en production de l'enfant âgé de 18 à 42 mois : le questionnaire sur le Développement du langage des enfants francophones (Bassano et al., 2020). Cet outil a permis d'observer que la phase d'explosion lexicale débute habituellement vers la fin de la 2^{ème} année de vie de l'enfant. Lors de cette phase, le rythme d'acquisition du vocabulaire s'accélère et l'enfant produit entre quatre et dix nouveaux mots par jour. A 38 mois, l'enfant arrive à prononcer en moyenne 1000 mots (Bassano et al., 2020). Les noms (communs et propres) constituent la part la plus importante du vocabulaire en émission et en réception (Kern, 2007). La production des noms est préférée à celle des verbes, car ceux-ci renvoient à des objets précis (Bassano, 2005). Le répertoire lexical du jeune enfant mettra ensuite plusieurs années à se développer. Ce développement lexical permettra alors à l'enfant d'associer un signifiant à un signifié et donc d'entrer dans le symbolique. Progressivement, l'enfant va associer des mots les uns avec les autres. Ce langage combinatoire va permettre à l'enfant d'articuler les mots les uns avec les autres afin d'exprimer et de transmettre des relations de sens. Cette phase précède la construction de phrases.

1.1.3. Les facteurs influençant le développement langagier du jeune enfant (de 0 à 3 ans)

La perspective socioconstructiviste soutient que le développement et les apprentissages sont des processus socialement médiatisés (Vygotsky, 1997). L'enfant est immergé dans un environnement culturel dans lequel les interactions sont centrales. Le langage semble alors être un outil fondamental dans le développement des apprentissages de l'enfant. Dans la théorie socio-constructiviste, les discussions sont cruciales pour la création de sens (Maria, 2000). Au cours d'activités partagées entre l'enfant et l'adulte comme par exemple les lectures partagées, l'adulte joue un rôle central d'étayage des apprentissages. L'adulte fournit alors à l'enfant des rétroactions, des conseils et pose des questions adaptées à son niveau de développement afin de faciliter les apprentissages (Bruner, 2015; Evans et al., 2003; Saracho, 2017).

Plusieurs recherches ont montré que de nombreux facteurs influençaient le développement langagier du jeune enfant. Le statut socioéconomique de la famille est l'un des facteurs fortement corrélés au développement du langage émergent (Hoff, 2006; Rowe et al., 2012). Le statut socioéconomique est un ensemble de variables, comprenant par exemple le niveau d'éducation des parents, les revenus de la famille ou encore la profession des parents. Ces variables déterminent généralement les conditions de vie de la famille. Plus particulièrement, le niveau d'étude de la mère serait l'un des facteurs les plus prédictifs des compétences langagières des enfants âgés de cinq ans (Dollaghan et al., 1999; Umek et al., 2006). Plus le niveau d'éducation de la mère est élevé et plus les compétences langagières des enfants sont importantes (Hoff, 2006; Noble et al., 2007; Rodriguez et al., 2009). Plus généralement, les enfants issus d'un milieu socioéconomique élevé présentent un développement lexical plus avancé que ceux issus d'un milieu socioéconomique moyen (Hoff-Ginsberg, 1998). Ainsi, le développement langagier du jeune enfant est sensible aux expériences langagières précoces qu'il a vécues, expériences qui sont liées au statut socio-économique de la famille (Miser & Hupp, 2012). L'environnement familial est considéré comme un agrégat de variables. Des travaux en psychologie de l'éducation font la distinction entre les variables familiales de « statut » tel que le statut socio-économique et celles de « processus » comme les pratiques éducatives familiales (Tazouti, 2013). Les pratiques éducatives familiales sont considérées comme des variables intermédiaires entre le statut socio-économique des familles et le développement et les apprentissages des enfants. Pace et al. (2017) ont identifié trois possibles facteurs intermédiaires entre le statut socio-économique et les compétences langagières de l'enfant : (1) les caractéristiques propres à l'enfant (*i.e.*

compétences socio-émotionnelles, fonctionnement exécutif ou encore la curiosité ou les compétences attentionnelles), (2) les interactions proximales avec l'enfant (*e.g.* qualité et quantité des interactions parents-enfants) et (3) la richesse des environnements dans lesquels l'enfant évolue.

Les travaux dans le champ de l'environnement d'apprentissage à domicile (*Home Learning Environment [HLE]*; Senechal, 2006; Senechal & LeFevre, 2002; Sénéchal & LeFevre, 2014; Skwarchuk et al., 2014) postulent que les interactions parents-enfants lors des activités en littératie émergente à la maison sont regroupées en deux catégories : d'une part, les activités formelles liées au code écrit comme l'apprentissage des lettres de l'alphabet et d'autre part, les activités informelles liées au sens comme les lectures conjointes. Les activités formelles en littératie émergente sont associés à la connaissance ultérieure des lettres, aux compétences de décodage de mots ou encore à la fluence de lecture (Lehrl et al., 2013; Senechal & LeFevre, 2002), tandis que les activités informelles sont associées plus spécifiquement à des compétences de langage oral comme le vocabulaire et la compréhension orale (Lehrl et al., 2013; Mol & Bus, 2011; Senechal & LeFevre, 2002). Enfin, d'autres auteurs ont également constaté que les activités formelles et informelles en littératie émergente prédisaient également les compétences mathématiques ultérieures (Anders et al., 2012; LeFevre, Polyzoi, et al., 2010; Lehrl et al., 2020; Manolitsis et al., 2013).

Les pratiques parentales jouent aussi un rôle important dans le développement du langage. Parmi ces pratiques, le langage dirigé vers l'enfant pourrait influencer les compétences langagières des jeunes enfants. Plus particulièrement, la quantité, la diversité lexicale et la complexité syntaxique du langage à destination de l'enfant prédisent le développement lexical chez les enfants de deux ans (Hoff & Naigles, 2002). Ainsi, les compétences cognitives et langagières du jeune enfant sont renforcées par l'exposition à un discours adulte riche et varié (*e.g.* Rowe et al., 2005). Par ailleurs, les lectures partagées sont des activités réalisées par les parents avec leurs enfants. La pratique des lectures partagées, dès l'âge de 8 mois, est corrélée avec l'augmentation des capacités langagières, plus particulièrement sur le langage expressif (Karrass & Braungart-Rieker, 2005). De plus, Tomopoulos et al., (2006) ont montré que les activités de lecture à l'âge de 18 mois prédisaient le développement cognitif et langagier à l'âge de 21 mois. Cette étude n'a cependant pas montré d'effet des lectures partagées dès l'âge de six mois sur les compétences ultérieures. Le style parental peut aussi avoir une influence sur le développement des compétences de l'enfant. Plus particulièrement, Gest et al., (2004) ont montré que la lecture partagée de livres est corrélée aux compétences de compréhension du

langage des enfants seulement chez les parents qui n'envisageaient pas de punitions physiques. De même, les pratiques d'écriture engageant l'enfant développent la connaissance des lettres, la conscience phonologique ou encore les connaissances des concepts liés à l'écrit (Evans & Shaw, 2008).

Les pratiques éducatives familiales impactent aussi fortement les compétences langagières du jeune enfant : lorsque celles-ci sont bien organisées et stimulantes, les enfants ont un vocabulaire plus développé. Certaines études ont alors montré que la présence de jouets, favorisant le langage ou les relations sociales, dans l'environnement influencerait positivement le développement langagier et cognitif du jeune enfant (Lacroix et al., 2001). Les jouets présents dans l'environnement familial de l'enfant de 6 et 18 mois prédisaient le développement du langage réceptif à 21 mois (Tomopoulos et al., 2006). De plus, certaines catégories de jouets sont plus associées que d'autres au développement langagier. Par exemple, chez des enfants de six mois, seuls les jouets premier âge ont un impact sur le langage (par exemple, des jeux d'emboîtement de formes ou des miroirs). À 18 mois, les jouets impliquant la motricité fine ou le jeu symbolique ont plus d'impact sur les compétences langagières de l'enfant. L'influence des jouets sur les compétences langagières de l'enfant est médiatisée par les interactions verbales entre les parents et les enfants (Tomopoulos et al., 2006). Enfin, lors de jeux libres semi-structurés, la sensibilité des mères et des pères au comportement et aux besoins de leur enfant, le regard positif et la stimulation cognitive vis-à-vis de l'enfant sont associés au développement cognitif et langagier de l'enfant à 24 et 36 mois (Tamis-LeMonda et al., 2004). L'histoire familiale du développement langagier, le sexe de l'enfant, le développement neurobiologique de l'enfant (Zubrick et al., 2007) ou encore le développement cognitif de l'enfant (Price et al., 2000) sont autant d'autres facteurs ayant une influence sur le développement des compétences verbales du jeune enfant.

1.2. La littératie émergente

1.2.1. Définition du concept de littératie émergente

Comme nous l'avons vu précédemment, bien avant d'entrer à l'école maternelle, les jeunes enfants développent des compétences émergentes en lien avec le langage oral et écrit. Ces compétences langagières renvoient à diverses composantes comme la sémantique, la syntaxe, le lexique ou encore la phonologie. Ainsi, le développement langagier du jeune enfant a une valeur prédictive concernant l'apprentissage de la lecture et de l'écriture. L'acquisition

de l'écrit se présente comme un continuum allant des compétences en littératie émergente jusqu'à la maîtrise de la lecture et de l'écriture (Sulzby & Teale, 1991; Whitehurst & Lonigan, 1998). De nombreux chercheurs se sont intéressés au concept de littératie émergente qui recouvre plusieurs compétences développées bien avant l'entrée des enfants dans l'enseignement préscolaire. Clay (1966) est la première à avoir introduit le terme de littératie émergente tandis que Teale et Sulzby (1986) ont réalisé une introduction plus formelle de ce concept. Pour eux, la littératie émergente comprend tous les comportements et concepts en lien avec la lecture et l'écriture qui précèdent le développement des compétences formelles de littératie. Plus spécifiquement, Snow et al. (1998) ainsi que Whitehurst et Lonigan (1998) ont explicité le développement de la littératie émergente et de ses composantes. Plusieurs compétences permettent à l'enfant d'entrer progressivement dans la lecture comme les compétences de langage oral, la conscience phonologique, la motivation à apprendre, la reconnaissance des formes liées à l'écrit, la conscience de l'écrit ou encore la connaissance des lettres (Snow et al., 1998).

La littératie émergente (LE) regroupe des connaissances, des compétences et des attitudes qui constitueraient des précurseurs développementaux des formes conventionnelles de la lecture et de l'écriture (Snow et al., 1998; Whitehurst & Lonigan, 1998). Certaines définitions plus élargies du concept de littératie émergente incluent l'environnement qui supporte ces développements (*e.g.* Lonigan, 1994). La littératie émergente constituerait alors un concept multidimensionnel en interaction constante avec de nombreuses variables environnementales, familiales, scolaires et personnelles (Carroll et al., 2019; Dulay et al., 2018; Niklas et al., 2016). Toutes ces variables interagissent pour permettre à l'enfant d'acquérir des compétences et des connaissances nécessaires à ses apprentissages ultérieurs. Pour résumer, la littératie émergente se développe durant la période préscolaire avant l'apprentissage formel de la lecture et englobe différents apprentissages en lien avec l'écrit et les activités de lecture et d'écriture. La littératie émergente s'acquiert au travers d'activités formelles et informelles réalisées à la maison ou à l'école maternelle et facilite l'acquisition des connaissances spécifiques à la lecture.

Les diverses compétences en littératie émergente peuvent être mesurées dès les premières années de l'enseignement préscolaire (Lonigan et al., 2008). Teale et Sulzby (1986) ont d'ailleurs montré que les compétences émergentes, développées par les jeunes enfants, seraient prédictives de la réussite ultérieure en lecture. Duncan et ses collaborateurs (2007) ont également montré que le langage émergent et les compétences émergentes en lecture (*e.g.* vocabulaire, connaissance des lettres, ...) étaient des prédicteurs des apprentissages futurs.

Ainsi, ces compétences spécifiques constituent un enjeu majeur pour les apprentissages des jeunes enfants. Les compétences acquises par les enfants avant d'entrer à l'école servent de base au développement ultérieur des compétences en lecture (Whitehurst & Lonigan, 1998). Le *National Early Literacy Panel* (Lonigan et al., 2008) a mené une méta-analyse afin d'identifier les compétences en littératie émergente associées aux compétences futures en lecture et en écriture. Pour considérer une compétence comme étant spécifiquement une compétence en littératie émergente, celle-ci doit remplir deux conditions. En premier lieu, la compétence doit être présente avant l'apprentissage des compétences conventionnelles de littératie, et en second lieu, la compétence doit être corrélée et prédictive avec les compétences ultérieures de littératie. Onze compétences en littératie émergente ont ainsi été mises en évidence (Shanahan & Lonigan, 2010):

- * ***La connaissance de l'alphabet*** : connaître les noms et sons des lettres ;
- * ***La conscience phonologique*** : détecter, manipuler ou analyser les aspects sonores du langage indépendamment du sens ;
- * ***La dénomination rapide et automatique des lettres ou des chiffres/nombres*** : nommer rapidement des séquences aléatoires de chiffres ou de lettres ;
- * ***La dénomination rapide et automatique d'objets ou de couleurs*** : nommer rapidement des séquences aléatoires d'images, d'objets ou de couleurs ;
- * ***L'écriture ou l'écriture du prénom*** : écrire des lettres isolées ou écrire son propre prénom ;
- * ***La mémoire phonologique*** : se remémorer des informations orales dans une courte période de temps ;
- * ***Les concepts sur l'écrit*** : connaître les conventions de l'écrit (e.g. sens de lecture gauche-droite dans les sociétés occidentales, de haut en bas) et certains concepts (e.g. page de couverture, auteur) ;
- * ***Les connaissances liées à l'écrit*** : ensemble de plusieurs éléments de la connaissance de l'alphabet, des concepts sur l'écrit et de décodage émergent ;
- * ***La préparation à la lecture*** : ensemble de plusieurs éléments de la connaissance de l'alphabet, des concepts sur l'écrit, du vocabulaire, de la mémoire et de la conscience phonologique ;
- * ***Le langage oral*** : produire et comprendre du langage oral ;
- * ***Le traitement visuel*** : assembler ou discriminer des symboles présentés visuellement.

Ces onze dimensions ont toutes une valeur prédictive concernant les compétences futures en littératie des élèves et plus particulièrement avec le décodage, la compréhension de lecture et l'orthographe. Les six premières dimensions gardent leur pouvoir prédictif même lorsque les variables telles que le statut socio-économique (SES) ou le quotient intellectuel des enfants sont statistiquement contrôlées.

1.2.2. Les différents modèles de la littératie émergente

Dans la suite de cette partie, nous aborderons les différents modèles de la littératie émergente. Bien qu'actuellement, onze dimensions de la littératie émergente aient été repérées par le *National Early Literacy Panel* (NELP, 2008), tous les auteurs ne s'accordent pas sur le même modèle de la littératie émergente. Nous pouvons toutefois noter que certaines dimensions sont plus représentées comme les connaissances liées à l'écrit (*print knowledge* en anglais), la conscience phonologique ou le langage oral.

1.2.2.1. Le modèle Outside-In, Inside-Out (Whitehurst & Lonigan, 1998)

Comme pour Mason et Stewart (1990), Whitehurst et Lonigan (1998) considèrent la littératie émergente comme un vaste domaine qui comprend la connaissance de l'écrit, le langage et les compétences métalinguistiques. Dans leur modèle (cf. Figure 1), les composants de la littératie émergente sont divisés en deux ensembles de compétences et de processus : le premier est appelé « *Inside-out* » et le second « *Outside-in* » (Whitehurst & Lonigan, 1998).

Les processus « *Inside-out* » font référence à la connaissance du nom des lettres, à la conscience phonologique ou encore à la correspondance phonème-graphème. Tandis que les processus « *Outside-In* » renvoient aux conventions de l'écrit (e.g. sens de lecture) ou encore aux compétences langagières (syntaxiques, sémantiques et conceptuelles). Les unités de langage, que sont les mots, se trouvent au centre de ce modèle et représentent la jonction entre les processus « *Inside-out* » et les processus « *Outside-In* ». Pour Whitehurst et Lonigan (1998), la lecture fluente nécessite de nombreux processus et compétences. Un lecteur doit être capable de décrypter les graphèmes, pour les transformer en unité sonores, les phonèmes. Ces phonèmes seront ensuite traduits en unités langagières que sont les mots. Ce décodage est considéré par les auteurs comme un processus « *Inside-out* ». Le lecteur doit ensuite comprendre les mots et textes lus, ce qui implique un cadre sémantique et contextuel. La compréhension est alors considérée comme un processus « *Outside-in* ».

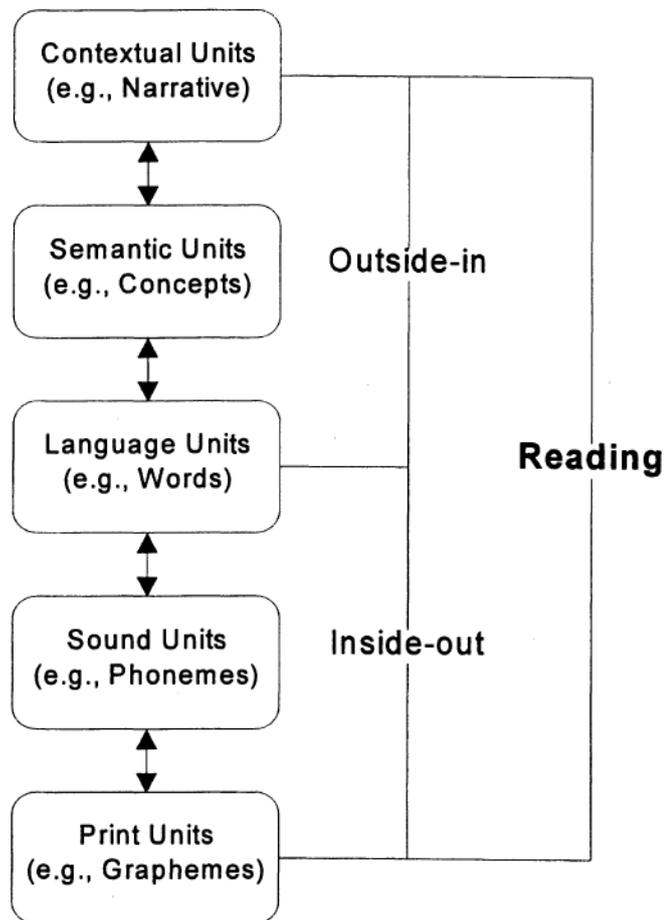


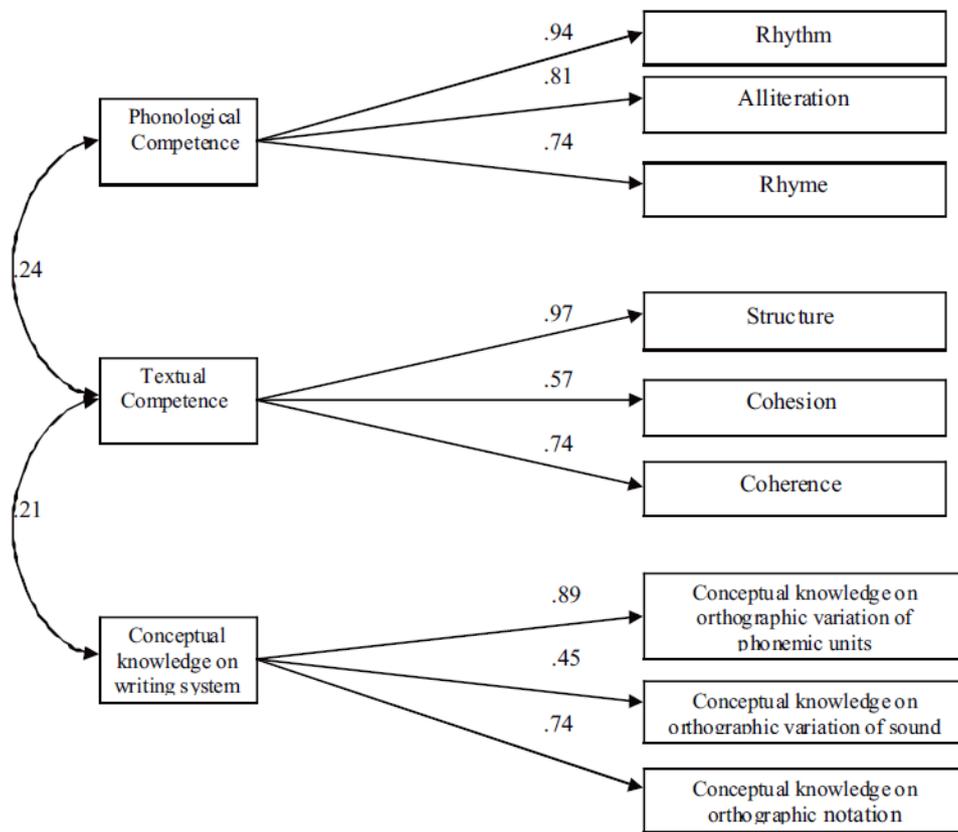
Figure 1. Le modèle *Outside-In, Inside-Out* (Whitehurst & Lonigan, 1998)

Note. Figure provenant de l'article "Child Development and Emergent Literacy", par G.J. Whitehurst, et C.J. Lonigan, 1998, *Child Development*, 69(3), p. 855.

1.2.2.2. Le modèle de littératie émergente de Pinto et al. (2008, 2009)

Pinto et al. (2008) ont élaboré un modèle de littératie émergente pour les langues avec une orthographe transparente. Ce modèle considère la littératie émergente dans une perspective multidimensionnelle, tout en prenant en compte les composantes mises en évidence par Sénéchal et al. (2001) et Whitehurst & Lonigan (1998). Ainsi, Pinto et ses collègues (2008) ont tout d'abord, développé un modèle composé de quatre facteurs auprès d'enfants italiens âgés de cinq à six ans. Les quatre facteurs repérés sont : les compétences phonologiques, les compétences textuelles, les compétences orthographiques et les compétences cognitivo-linguistiques.

Puis, dans un second temps, ces mêmes auteurs (Pinto et al., 2009) ont mis à jour un modèle de la littératie émergente à trois facteurs (cf. Figure 2) : les compétences phonologiques, les connaissances conceptuelles du système écrit et les compétences textuelles. Ce modèle a été élaboré auprès d'enfants âgés de cinq à six ans. Les compétences phonologiques correspondent à la capacité de l'enfant à détecter des unités sonores dans le flux du langage et à les manipuler intentionnellement. Les connaissances conceptuelles du système écrit renvoient plus spécifiquement à l'écriture de mots, à la variation du nombre de syllabes dans des mots et à la variation des unités phonémiques dans les mots. Enfin, les compétences textuelles correspondent à la capacité de l'enfant à aller au-delà de la seule unité de sens portée par le mot pour construire un réseau de relations entre les mots présents dans un texte.



**Figure 2. Le modèle de littératie émergente de Pinto et al. (2009)
Analyse factorielle confirmatoire**

Note. Figure provenant de l'article "Emergent literacy and learning to write: A predictive model for Italian language", par Pinto et al., 2009, *European Journal of Psychology of Education*, 24(1), p. 70.

1.2.2.3. Le Comprehensive Emergent Literacy Model (Rohde, 2015)

Rohde (2015) constate que les différents modèles de littératie émergente préexistants ne prennent pas en compte l'impact de l'environnement sur le développement des compétences en littératie émergente. En réponse à ce manque, Rohde (2015) a développé le CELM (*Comprehensive Emergent Literacy Model*). Ce modèle (cf. Figure 3) représente les trois principales dimensions de la littératie émergente en interaction les unes avec les autres (e.g. la conscience de l'écrit, le langage oral et la conscience phonologique). Ce modèle apporte trois contributions supplémentaires aux modèles préexistants. Premièrement, chaque composante de la littératie émergente a sa propre séquence développementale. Ensuite, chaque dimension se développe en interaction avec les autres dimensions. Enfin, l'environnement dans lequel vit l'enfant et sa famille est désormais pris en compte.

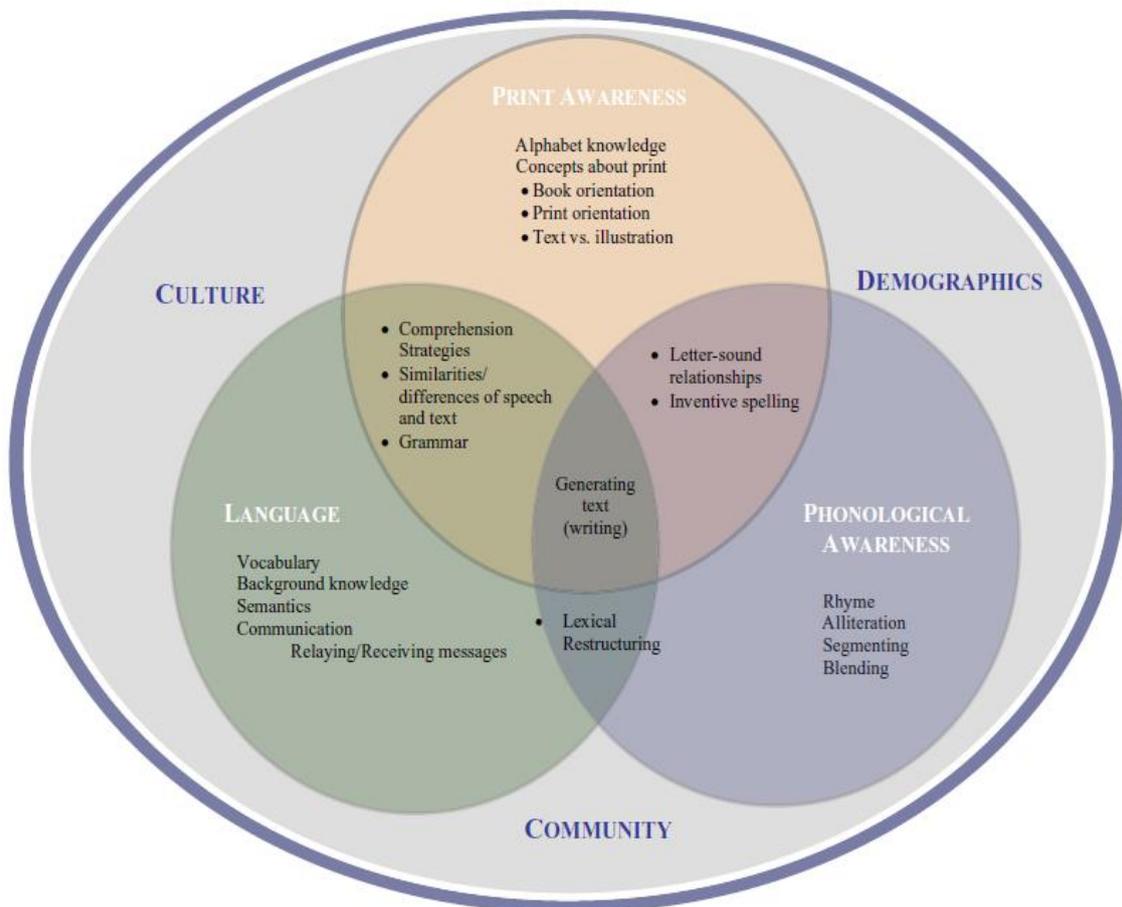


Figure 3. Le Comprehensive Emergent Literacy Model (Rohde, 2015)

Note. Figure provenant de l'article "The Comprehensive Emergent Literacy Model : Early Literacy in Context", par Rohde, 2015, *SAGE Open*, 5(1), p. 8.

La conscience de l'écrit comprend la connaissance de l'alphabet et les concepts liés à l'écrit (par exemple, le sens de manipulation des livres ou de lecture). La conscience phonologique comprend des compétences comme l'identification de rimes et la segmentation de mots en syllabes ou phonèmes. Enfin, le langage oral inclut la compréhension et l'utilisation du vocabulaire et la sémantique. Dans ce modèle, les dimensions s'entrelacent afin de montrer les interactions entre les différentes composantes. Aux trois grands domaines, précédemment cités, s'ajoutent les différentes compétences qui allient plusieurs domaines comme la connaissance du son des lettres ou encore la grammaire. Enfin, au centre du modèle apparaît l'écriture, qui entretient de fortes relations avec les trois principales composantes. Toutefois, ce modèle n'a pas encore été validé empiriquement.

En résumé, les modèles exposés présentent tous des structures différentes mais ciblent les mêmes compétences. Malgré l'existence de ces modèles, la plupart des chercheurs considèrent la littératie émergente comme un agrégat de différentes compétences qui se développent chez l'enfant durant la période préscolaire. Dans les recherches actuelles, trois principales dimensions de la littératie émergente apparaissent : les connaissances liées à l'écrit (e.g. connaissance de l'alphabet), la conscience phonologique et le langage oral (e.g. vocabulaire et compréhension orale). Dans le cadre de cette thèse, l'enfant et son environnement proche sont considérés comment en interaction et sont au cœur du développement de compétences en littératie et en numératie émergentes. Nous nous situons donc plus particulièrement dans une perspective socio-constructiviste dans laquelle l'environnement exerce une influence importante sur le développement des compétences en littératie émergente. Ainsi, le modèle théorique de Rohde (2015) semble être celui se rapprochant le plus de cette conception. Ce modèle nécessiterait cependant d'être validé empiriquement.

1.2.3. Les principales composantes de la littératie émergente

Avant l'apprentissage formel de la lecture au cours préparatoire, les enfants développent principalement trois composantes en littératie émergente : la connaissance de l'écrit ou « *print knowledge* » (Whitehurst & Lonigan, 1998), les capacités de traitement phonologique (Wagner & Torgesen, 1987) et les compétences de langage oral (Storch & Whitehurst, 2002). Ces trois compétences sont les plus puissants prédicteurs des compétences de lecture de l'enfant (Lonigan et al., 2008; Rabiner et al., 2016) et permettent à terme de déchiffrer des symboles

écrits et de comprendre des textes. Ils représentent une part importante des différences individuelles dans les compétences ultérieures en lecture (Lonigan et al., 2000).

1.2.3.1. Les connaissances liées à l'écrit (« print knowledge »)

Les connaissances liées à l'écrit (appelées « *print knowledge* ») englobent toutes les connaissances et conceptions que l'enfant a vis-à-vis de l'écrit ainsi que ses connaissances alphabétiques (Justice et al., 2006). Toutes ces connaissances se développent bien avant l'entrée à l'école maternelle au travers de diverses activités socio-culturelles liées à l'écrit (Teale & Sulzby, 1986; Whitehurst & Lonigan, 1998). Dans leur environnement familial, les enfants sont exposés à l'écrit par l'intermédiaire des livres d'histoires pour enfants (Justice & Ezell, 2002) mais aussi par l'environnement écrit qui englobe les logos sur les denrées alimentaires, les emballages de jouets, les vêtements, les panneaux routiers et les affichages divers. Ces contacts répétés avec des symboles écrits procurent aux jeunes enfants leurs premières expériences avec l'écrit : l'enfant est capable de percevoir et de comprendre des données écrites comme mentionné par Frith (1985) dans le stade de lecture logographique.

Ces connaissances liées à l'écrit constituent un construit multidimensionnel regroupant diverses composantes telles que la connaissance des livres et de l'organisation de l'écrit, le sens porté par l'écrit, la connaissance de l'alphabet, la connaissance du nom et du son des lettres et encore l'identification de lettres ou de mots (Puranik et al., 2011; Storch & Whitehurst, 2002). Ces connaissances renvoient aux informations portées par les lettres (nom et son) mais aussi à la différence entre écrit et image, à la différence entre lettres et chiffres et aux conventions liées à l'écrit, comme le sens de lecture ou encore le fait que les mots soient séparés par des espaces. Toutes ces connaissances des fonctions et conventions de l'écrit sont liées au développement de la littératie émergente mais aussi au développement des compétences formelles de littératie (Storch & Whitehurst, 2002; Whitehurst & Lonigan, 1998). Ces connaissances préalables sont une étape nécessaire au développement des compétences en littératie émergente du jeune enfant. Plus spécifiquement, le jeune enfant a besoin d'acquérir le sens de l'écrit pour pouvoir, par la suite, commencer à écrire ou encore pour comprendre les relations entre lettres et sons.

Plusieurs études ont examiné les liens entre les connaissances liées à l'écrit, les connaissances en littératie émergente et les compétences ultérieures. Tout d'abord, ces connaissances liées à l'écrit sont corrélées à d'autres dimensions de la littératie émergente comme la conscience phonologique, le vocabulaire (Dickinson et al., 2003) ou encore l'écriture

du prénom ou de lettres isolées (Puranik et al., 2011). De plus, des liens modérés ont été observés entre les connaissances liées à l'écrit et l'orthographe, la lecture de mots et la compréhension de textes lus (Lonigan et al., 2008; Storch & Whitehurst, 2002). Dans la suite de cette partie, nous allons nous intéresser plus spécifiquement à la connaissance des lettres et à son influence sur le développement des autres dimensions de littératie émergente.

Comme mentionné précédemment, les connaissances alphabétiques regroupent diverses dimensions comme la connaissance de l'alphabet, la connaissance du nom des lettres, la connaissance du son des lettres et l'écriture de lettres isolées (Puranik et al., 2011). La connaissance de l'alphabet ainsi que la connaissance du nom et du son des lettres représentent une composante importante de la littératie émergente et sont l'un des plus forts prédicteurs des compétences de lecture (Foulin, 2005; National Early Literacy Panel (NELP), 2008; Puranik et al., 2013; Whitehurst & Lonigan, 1998). Même si ces connaissances sont liées, elles suivent des trajectoires développementales différentes : la connaissance du nom des lettres précédant généralement celle du son des lettres (Share, 2004). De plus, la reconnaissance des lettres implique de percevoir les formes des lettres tout en portant son attention sur l'orientation de la lettre en distinguant par exemple les lettres miroir (e.g., p/q, b/d, M/W) et sur les détails qui permettent de différencier les lettres (e.g., l/t, n/r, C/G).

Les recherches sur le développement de la connaissance de l'alphabet indiquent que les enfants n'apprennent pas simultanément toutes les lettres et leurs sons. Lorsque les jeunes enfants entrent à l'école maternelle, ils ne connaissent pas tous le même nombre de lettres, ni les mêmes lettres (Justice et al., 2006; Piasta, 2014; Sigmundsson et al., 2017). L'hétérogénéité des niveaux de connaissance des élèves au sein des classes représente donc un défi pour les enseignants afin de répondre aux besoins spécifiques de chaque élève. Aux Etats-Unis, Carr et al., (2020) ont observé les trajectoires développementales de la connaissance des lettres durant la moyenne et la grande section de maternelle (*pre-kindergarten* et *kindergarten*). Ils ont ainsi observé trois trajectoires développementales différentes : (1) les élèves « apprenants précoces » (*early learners*) qui connaissaient déjà la plupart du nom des lettres dès le début de la moyenne section ; (2) les *pre-K Gainers* c'est-à-dire ceux qui développent leur connaissance des lettres durant la moyenne section et (3) les *kindergarten Gainers* qui développent leur connaissance des lettres seulement durant la grande section. Certains noms et sons de lettres sont plus faciles à apprendre que d'autres (Justice et al., 2006; McBride-Chang, 1999). Par exemple, les enfants ont tendance à apprendre la première lettre de leur prénom avant les autres (Justice et al., 2006; Phillips et al., 2012; Treiman & Broderick, 1998). De même, les jeunes enfants ont tendance à

reconnaitre les noms et les sons des lettres présentes au début de l'alphabet plutôt qu'à la fin de l'alphabet (Justice et al., 2006; McBride-Chang, 1999). Les lettres majuscules sont généralement reconnues avant celles en minuscules. Les lettres minuscules semblables à leur majuscule (i.e., Cc, Oo ou Vv) sont plus correctement identifiées par les jeunes enfants que les lettres dont les formes majuscules et minuscules ne sont pas similaires (Justice et al., 2006). De plus, les noms des voyelles sont plus faciles à apprendre que les noms des consonnes (Cormier, 2006; Ecalle, 2004). Jones et Reutzel (2012) ont présenté les différents facteurs pouvant contribuer à l'acquisition du nom et du son des lettres chez le jeune enfant. Ainsi, la position de la lettre dans l'alphabet ; la fréquence d'apparition de la lettre dans la langue de l'enfant ; la présence de la lettre dans le prénom de l'enfant ; la présence du son de la lettre dans son nom (par exemple, le sons /p/ dans la lettre P) ou encore la période durant l'acquisition du langage lors de laquelle l'enfant apprend à prononcer le phonème représenté par une lettre particulière, sont autant de facteurs ayant une influence sur les développement de la connaissance des lettres. De plus, Zhang et al. (2019) ont également montré que des enfants de quatre ans et demi écrivaient significativement avec moins d'erreurs les lettres présentes dans leur prénom que les autres.

L'apprentissage du son des lettres serait lié à l'apprentissage préalable du nom des lettres (Share, 2004). Certains auteurs ont d'ailleurs développé l'hypothèse de l'effet de structure du nom de la lettre, qui expliquerait comment les jeunes enfants utilisent les connexions entre le nom des lettres et leurs sons pour apprendre le nom et le son des lettres. De nombreuses recherches ont ainsi montré que les lettres dont le son est identifiable facilement dans leur nom, sont plus faciles à apprendre et sont plus susceptibles d'être connues par de jeunes enfants (Cardoso-Martins et al., 2011; Evans et al., 2006; Piasta & Wagner, 2010; Share, 2004; Treiman et al., 1998; Treiman & Broderick, 1998). En français comme en anglais, les noms des consonnes peuvent se prononcer de deux manières différentes. Certaines consonnes possèdent leurs sons au début de leur nom : il s'agit de consonnes de types CV (consonne-voyelle) comme les lettres b, p ou q. A l'inverse, les autres possèdent leurs sons à la fin de leur nom : il s'agit de consonnes de type VC (voyelle-consonne) comme les lettres f, l ou m. Enfin, certains noms de lettres ne sont pas associés avec leurs sons comme pour les lettres c, h ou encore w. Treiman et Broderick (1998) ont observé un avantage pour les lettres de type CV par rapport aux lettres de type VC. Cependant, McBride-Chang (1999) n'a trouvé aucune différence entre les deux structures de prononciation.

La ou les formes sonores de certaines lettres sont plus difficiles à apprendre que d'autres (Huang & Invernizzi, 2014). Par exemple, les lettres dont le son ressemble à celui d'autres lettres ont une plus forte probabilité d'être confondues. Ainsi, la relation entre le nom et le son de la lettre, la difficulté possible pour identifier et isoler le son de la lettre ou encore le nombre de sons représentant la lettre sont autant de facteurs qui peuvent influencer l'apprentissage du son des lettres ou rendre nécessaire un enseignement explicite du son de la lettre (Evans et al., 2006; Huang & Invernizzi, 2012; Justice et al., 2006; McBride-Chang, 1999; Treiman et al., 1998). D'autres compétences peuvent aussi favoriser le développement de la connaissance des sons des lettres : par exemple, si l'enfant sait comment écrire son propre prénom, s'il est capable de reconnaître et d'identifier les noms des lettres ou encore s'il a développé de bonnes compétences en conscience phonologique (Evans et al., 2006; Foy & Mann, 2006; Kim et al., 2010; Treiman et al., 1998).

1.2.3.2. Les capacités de traitement phonologique

Wagner et Torgesen (1987) ont identifié trois clusters interdépendants des capacités de traitement phonologique : la conscience phonologique, la mémoire phonologique et la dénomination phonologique. Tout d'abord, la conscience phonologique correspond à la capacité de détecter et de manipuler la structure sonore du langage oral (Whitehurst & Lonigan, 2001). Cette composante peut être perçue au travers des tâches d'assemblage de syllabes orales ou de phonèmes pour former des mots, des tâches de suppression de syllabes ou de phonèmes, ou encore des tâches d'identification de rimes. Ensuite, la mémoire phonologique fait, quant à elle, référence au codage de l'information sous forme de représentation sonore pour son stockage temporaire en mémoire à court-terme (Baddeley & Salame, 1986). Cette composante est utilisée lors de toutes les tâches cognitives qui impliquent une information sonore (Anthony et al., 2007a). La mémoire phonologique est généralement mesurée par des tâches de rappel immédiat de mots présentés verbalement. Enfin, la dénomination phonologique correspond à la récupération des informations phonologiques stockées dans la mémoire à long terme : il s'agit de l'accès phonologique au stockage lexical. Les capacités de dénomination phonologique sont généralement mesurées à l'aide de tâches de dénomination rapide automatique (*Rapid Automated Naming*, RAN) d'objets, de lettres ou de chiffres. Elles peuvent aussi être mesurées par des tâches de dénomination isolées, dans lesquelles l'enfant doit nommer un objet présenté visuellement. Dans ces tâches, le temps nécessaire pour nommer l'objet est mesuré. Plusieurs recherches ont montré que la conscience phonologique, la mémoire phonologique et la

dénomination phonologique sont des habiletés phonologiques bien distinctes (Anthony et al., 2007; de Jong & van der Leij, 1999; Sprugevica & Høien, 2004). Cependant, chez les enfants d'âge préscolaire, ces trois habiletés phonologiques peuvent être moins distinctes (Wagner & Torgesen, 1987).

Ces trois processus phonologiques sont fortement corrélés aux compétences ultérieures de décodage et les différences individuelles dans ces processus sont très stables à partir de la fin de la période préscolaire (Lonigan et al., 2000; Wagner et al., 1994). Ainsi, de faibles compétences de traitement phonologique sont le signe distinctif des faibles lecteurs. Plus spécifiquement, la conscience phonologique apparaît comme étant la compétence de traitement phonologique la plus fortement corrélée avec les compétences de lecture (Anthony et al., 2007a). Le développement de la conscience phonologique chez le jeune enfant progresse de la sensibilité des unités larges et concrètes du langage jusqu'à la discrimination fine des unités petites et abstraites comme le phonème (Whitehurst & Lonigan, 2001).

Le développement de la mémoire phonologique pendant l'enfance est presque multiplié par trois entre quatre et onze ans. Ce développement se réalise parallèlement à celui des compétences langagières du jeune enfant (Hulme et al., 1984). Les enfants ayant une bonne mémoire phonologique ont un vocabulaire plus développé dans leur langue maternelle que ceux ayant une mauvaise mémoire phonologique (Gathercole et al., 1999). Une mémoire phonologique efficace permet aux enfants de conserver une représentation précise des phonèmes associés aux lettres d'un mot durant le décodage. Elle permet ainsi de consacrer davantage de ressources cognitives aux processus de décodage et de compréhension (Whitehurst & Lonigan, 2001).

La dénomination phonologique est un prédicteur important des compétences de décodage chez des enfants de plus de six ans (Wagner et al., 1994). Cette compétence va influencer la facilité avec laquelle l'enfant va retrouver les informations phonologiques associées avec les lettres, les syllabes et les mots et augmente la probabilité que l'enfant utilise l'information phonologique lors du décodage (Whitehurst & Lonigan, 2001). Par ailleurs, les tâches de RAN, permettant de mesurer les capacités de dénomination phonologique, sont aussi fortement corrélées à la lecture de mots et à la compréhension de lecture (Sprugevica & Høien, 2004; Wagner & Torgesen, 1987) mais aussi aux compétences émergentes de littératie (Anthony et al., 2007a). De Jong et van der Leij (1999) ont mis en évidence l'aspect prédictif de la conscience phonologique et de la dénomination rapide automatique au cours préparatoire (*first grade*) sur les compétences en littératie au CE1 (*second grade*).

La conscience phonologique peut être perçue comme étant une compétence métalinguistique de manipulation d'unités sonores du langage oral (Briquet-Duhazé & Rezrazi, 2014). L'identification des unités segmentales de la parole et leur manipulation mentale et délibérée constitue ce que l'on peut appeler la conscience phonologique (Desrochers et al., 2009). La conscience phonologique se réfère ainsi à une sensibilité individuelle implicite et explicite aux structures sublexicales du langage oral (Pullen & Justice, 2003). D'après Liberman (1973), la conscience des différents sons de la parole (mots, syllabes et phonèmes) peut être définie comme la capacité d'effectuer des manipulations sur ces unités, telles que les compter ou les changer de place dans une séquence de parole. Enfin, pour Bosse et Zagar (2015), la conscience phonologique comprend la conscience des mots, la conscience des syllabes et la conscience phonémique. Même si diverses épreuves sont utilisées pour mesurer la conscience phonologique (mots, syllabes, rimes, phonèmes), de nombreuses études s'accordent sur l'unidimensionnalité de ce concept (Schatschneider et al., 1999). Ainsi, les différentes aptitudes phonologiques renvoient à la même capacité ou à des capacités fortement corrélées : il s'agit donc d'une sensibilité générale des enfants à la structure sonore de la langue (Anthony & Lonigan, 2004; Desrochers et al., 2009).

Lors du développement du langage oral, l'enfant n'est pas conscient de la structure du langage et se centre plus spécifiquement sur la compréhension du message oral (Shankweiler & Fowler, 2004). Cependant dès l'âge de trois-quatre ans, l'enfant devient capable de distinguer les syllabes dans certains contextes spécifiques. Actuellement, différents points de vue s'opposent concernant le développement de la conscience phonologique. Pour certains auteurs, la conscience phonologique se développerait formellement au cours de l'apprentissage de la lecture. Certaines études auprès d'adultes illettrés ont montré que la conscience phonologique se développerait suite à un apprentissage spécifique de l'alphabet (Dehaene et al., 2015). Ainsi, des adultes lettrés chinois, dont la langue n'était pas alphabétique, ont de faibles scores aux tâches auditives de conscience phonologique (Dehaene et al., 2015). D'autres études ont montré que dans les langues alphabétiques, la conscience phonologique et plus spécifiquement la conscience phonémique sont nécessaires et importantes pour l'apprentissage de la lecture (Caravolas et al., 2012). D'autres auteurs ont proposé une conception développementale de la conscience phonologique. La conscience phonologique serait représentée par un continuum de compétences qui émergent en suivant une hiérarchie développementale tout au long du développement des enfants typiques (Adams, 1990). Ce continuum partirait d'une sensibilité des unités phonologiques plus larges comme le mot et les syllabes, jusqu'à une conscience plus

fine des petites unités phonologiques comme l'attaque, la rime et le phonème (Anthony et al., 2003; Whitehurst & Lonigan, 2001). L'attaque correspond à la consonne initiale ou le groupe consonantique placés au début du mot : il s'agit du premier son entendu au début d'un mot. La rime correspond quant à elle à la consonne ou la voyelle finale ou au groupe consonantique placé à la fin du mot.

Adams (1990) utilise cinq niveaux pour décrire le développement de la conscience phonologique chez l'enfant d'âge préscolaire. Tout d'abord, l'enfant commence par écouter des mots et leurs sons. Le second niveau consiste plus spécifiquement à comparer des mots de même consonance dans ce que l'on appelle des tâches d'étrangeté. Par exemple, l'élève doit trouver quel mot ne se termine pas comme les autres /chat/, /mat/, ou /chien/. Le troisième niveau correspond au dénombrement et à l'identification des syllabes dans un mot. Ensuite, l'enfant devient capable de diviser un mot en phonèmes (par exemple, /lit/ en /l/ /i/). Enfin, le cinquième niveau est le plus difficile : l'enfant doit alors être capable d'isoler un phonème dans un mot, le supprimer, puis le remplacer par un autre phonème pour former un nouveau mot. A ce modèle, Schatschneider et al. (1999) ont ajouté un sixième niveau où les enfants développent une sensibilité à l'allitération, la capacité d'identifier le début des mots. De leur côté, Carroll et al. (2003) ont divisé en deux le développement de la conscience phonologique chez des élèves d'âge préscolaire. Tout d'abord, une première forme de sensibilité implicite émergerait à partir du développement langagier normal de l'enfant. Cette sensibilité implicite porterait sur les plus larges unités langagières comme le mot et la syllabe. Puis, sur la base de ces connaissances initiales, l'enfant développerait la conscience phonémique. Ainsi, le développement de la conscience phonologique se terminerait alors par l'acquisition de la conscience des phonèmes, qui sont les plus petites unités sonores du langage.

Bien qu'il ait été prouvé que la conscience morphologique joue un rôle important dans le décodage, la fluence de lecture, la compréhension et l'orthographe (Desrochers et al., 2018; Muroya et al., 2017; Vaknin-Nusbaum et al., 2016), cette compétence n'a pas été retenue ici. La conscience morphologique correspond à la compréhension explicite des relations entre la forme des mots et leur signification ainsi qu'à la capacité à manipuler la structure morphologique des mots (Carlisle, 1995).

1.2.3.3. Les compétences de langage oral

Le langage oral fait référence à la capacité de l'enfant pour s'exprimer et comprendre le sens d'un énoncé. Les compétences de langage oral englobent différentes compétences comme la sémantique (connaissances de mots, vocabulaire en émission et en réception), la syntaxe (connaissance de l'ordre des mots et des règles grammaticales) et le discours narratif (Storch & Whitehurst, 2002). Pour Snow et al., (1998) le langage oral peut se définir comme un système complexe reliant les sons à leur signification à l'aide de trois composantes : la conscience phonologique, la sémantique et la syntaxe.

L'environnement langagier du jeune enfant influence le développement de ses compétences de langage oral. Ainsi, les enfants issus d'un milieu socio-économique plus défavorisé sont généralement exposés à un environnement langagier plus restreint et de moins bonne qualité (Huttenlocher et al., 2010). Les différences de statut socio-économique sont fortement associées à la variation des compétences langagières des enfants. Dès l'âge de 24 mois, un écart de 6 mois peut être observé concernant les compétences langagières et le niveau de vocabulaire entre des enfants issus de milieux socio-économiques défavorisés et favorisés (Fernald et al., 2013). Dès l'entrée à l'école maternelle, les enfants issus de milieux défavorisés diffèrent sensiblement de leurs pairs plus favorisés en termes de capacités verbales et des autres capacités cognitives (Ramey & Ramey, 2004). Le développement de compétences langagières durant les années préscolaires est donc fondamental pour l'acquisition des compétences en littératie émergente (Kendeou et al., 2009; Storch & Whitehurst, 2002).

Dans les langues alphabétiques, avant d'apprendre à lire formellement, les jeunes enfants doivent maîtriser le langage oral. Il s'agit de disposer d'un "lexique mental", dans lequel la forme sonore des mots et leur signification sont stockées (Ziegler, 2018). Les compétences préscolaires de langage oral telles que le vocabulaire et les connaissances syntaxiques jouent un rôle important dans la compréhension de la lecture (Hjetland et al., 2020; Kendeou et al., 2009). Ainsi, de nombreux auteurs ont montré que les compétences précoces de langage oral sont nécessaires à la fois pour la lecture de mots et mais aussi pour l'acquisition de la compréhension de la lecture (Lonigan et al., 2008; Muter et al., 2004; Oakhill & Cain, 2012; Storch & Whitehurst, 2002). Par ailleurs, ces compétences de langage oral favorisent aussi le développement du vocabulaire et de la compréhension (Storch & Whitehurst, 2002). Torppa et al. (2010) ont montré que les compétences langagières réceptives et expressives à l'âge de 2,5 ans prédisent la lecture de mots à l'âge de 9 ans. Cependant ces compétences langagières influencent le développement de la connaissance de lettres, de la conscience phonologique ou

encore de la dénomination rapide (RAN) qui influencent à leur tour la lecture à l'âge de 8-9 ans.

De plus, les capacités langagières orales affectent le développement de plusieurs compétences en littératie émergente nécessaires pour le décodage, comme la conscience phonologique ou la connaissance des lettres (Caravolas et al., 2012). Les compétences en matière de décodage de mots sont par la suite impliquées dans la compréhension de la lecture. De même, les compétences de langage oral (*i.e.*, vocabulaire, compréhension) et les compétences liées au code (*i.e.* conventions liées à l'écrit, conscience phonologique) sont fortement corrélées chez les enfants d'âge préscolaire (Storch & Whitehurst, 2002). Le langage précoce influencerait aussi la conscience phonologique, les tâches de RAN et la connaissance des lettres chez les enfants d'âge préscolaire ainsi que le vocabulaire et la compréhension de lecture chez des enfants plus âgés (Duff et al., 2015; van Viersen et al., 2018). De même, Hulme et al. (2015) ont montré que les compétences langagières à 3,5 ans prédisaient certaines compétences en littératie émergente comme la conscience phonologique, la dénomination rapide automatique ainsi que la connaissance des correspondances graphèmes-phonèmes à 4,5 ans. Ils ont également montré un effet indirect des compétences langagières sur la lecture et l'orthographe. De plus, ces mêmes auteurs ont aussi observé un effet des compétences langagières précoces sur la compréhension de lecture. Les compétences langagières du jeune enfant sont aussi liées à un meilleur niveau de littératie et de numératie à l'âge de cinq ans mais aussi à l'âge de sept ans (Melhuish et al., 2008), à une meilleure compréhension à l'âge de sept ans (Downer & Pianta, 2006), et à de meilleures compétences mathématiques et attentionnelles à l'âge de huit ans (Peisner-Feinberg et al., 2001). Ainsi, les compétences de langage oral ont un rôle important dans le développement de la lecture, de l'orthographe et de la compréhension de lecture mais aussi dans le développement des compétences mathématiques.

1.2.3.3.1. Le vocabulaire

Le vocabulaire correspond généralement à l'usage des mots de la langue utilisée couramment par la personne. On peut distinguer le vocabulaire réceptif, aussi appelé vocabulaire passif et le vocabulaire expressif ou actif. Le vocabulaire réceptif représente les termes dont le locuteur connaît la définition mais qu'il n'utilise pas, tandis que le vocabulaire expressif correspond aux mots connus et couramment employés par le locuteur. Le vocabulaire permet à l'enfant de comprendre et de communiquer avec le monde environnant. A l'âge de 18 mois, l'enfant dispose d'un vocabulaire limité de 10 à 20 mots en moyenne. Rapidement, le

vocabulaire des enfants va augmenter et atteindre environ 1000 mots à l'âge de trois ans (Florin, 2016). A partir de l'âge de trois ans, la mesure du vocabulaire de l'enfant devient plus difficile. De plus, les mots compris par l'enfant sont toujours plus nombreux que ceux qu'il utilise. Enfin, on estime que vers l'âge de cinq ans, l'enfant connaît en moyenne entre 4000 et 5000 mots et ce répertoire lexical va doubler avant l'âge de six ans (Japel et al., 2009). L'étendue du vocabulaire dont dispose l'enfant augmente sa compréhension du langage oral. L'enfant devient alors capable de deviner correctement la signification des mots peu familiers (Storch & Whitehurst, 2002).

Beck et al. (2005) ont développé une conception du vocabulaire en trois niveaux. Tout d'abord, le premier niveau correspond aux mots usuels qui peuvent être perçus et compris rapidement grâce à une illustration. Ces mots nécessitent donc un enseignement minimal et sont les premiers appris par le jeune enfant. Le deuxième niveau fait référence à des mots plus complexes ou abstraits, nécessaires pour comprendre le langage des adultes, pour parler, lire et même écrire. Enfin, le troisième niveau correspond à des mots spécifiques dans des domaines particuliers. Ces mots nécessitent un enseignement long, spécifique et spécialisé.

Précédemment, nous avons vu l'importance du contexte environnemental dans le développement des compétences langagières. Pour les jeunes enfants, le développement du vocabulaire se réalise essentiellement au contact du langage oral. Ce contact répété permettra ainsi à l'enfant d'apprendre de nouveaux mots et leur signification. Certaines études ont montré l'importance des lectures partagées pour le développement du vocabulaire (Grøver et al., 2020; Sénéchal & Whissell, 2016) que ce soit pour le vocabulaire expressif (Mol et al., 2008) ou pour le vocabulaire réceptif. La recherche menée par le National Early Literacy Panel (NELP ; 2008) a montré que les lectures partagées favorisaient l'acquisition de diverses composantes du langage oral et plus particulièrement du vocabulaire. De même, des lectures répétées d'un même livre favorisent l'acquisition du vocabulaire (Robbins & Ehri, 1994).

1.2.3.3.2. La compréhension

Dans la littérature, de nombreux termes sont utilisés comme synonymes de la compréhension orale comme par exemple la compréhension du langage ou encore les compétences de langage oral. Dans les compétences de langage oral, de nombreux auteurs incluent le vocabulaire en réception et la compréhension narrative (Kendeou et al., 2009). La compréhension n'est donc pas un construit unique mais plutôt un regroupement de compétences

et d'activités (van den Broek et al., 2005). D'après Bianco (2016), la compréhension d'un texte suppose que nous soyons capables de construire une représentation cohérente et unifiée des informations délivrées par le texte, lorsque nous entendons ou lisons. Pour cela, il faut être en mesure d'identifier les mots entendus, de mobiliser diverses connaissances sur le langage, sur les structures textuelles ou sur le thème du discours et de comprendre des inférences. Dans les différentes définitions de la compréhension, plusieurs éléments ressortent particulièrement. Ainsi, la compréhension correspond à l'interprétation des informations contenues dans un texte et à l'utilisation de connaissances préalables pour interpréter ces informations. Ces deux processus permettent ainsi de construire une représentation cohérente de ce dont parle le texte. Cette représentation permet alors au lecteur de raconter l'histoire qu'il a entendue ou lue (Kendeou et al., 2007). Les liens de causalité sont au centre du processus de compréhension, de même que les inférences.

Différentes composantes langagières et cognitives sont impliquées dans la compréhension. Les compétences verbales, la mémoire de travail, les différents composants du texte ou du discours (par exemple, les compétences inférentielles) contribuent spécifiquement à la compréhension orale (Cain et al., 2004; Oakhill et al., 2003; van den Broek et al., 2011). De même, certaines compétences initiales de conscience phonologique ainsi que le vocabulaire participent positivement au développement de la compréhension orale (Bianco et al., 2010). Ainsi, la compréhension du langage se base sur de nombreuses connaissances comme le vocabulaire ou encore les compétences syntaxiques et morphologiques (i.e. forme des mots). Peu d'études ont travaillé spécifiquement sur le développement de la compréhension chez des enfants d'âge préscolaire. A cet âge, la compréhension peut être mesurée dans un contexte de non-lecture en présentant des histoires par l'intermédiaire d'autres médias (présentation à l'aide d'images, par voie orale ou encore par la télévision). Tout d'abord, pour des enfants d'âge préscolaire, lors de la compréhension orale l'information explicite est plus facile à traiter que l'information implicite (Florit et al., 2011). De plus, Tompkins et al. (2013) ont montré que le nombre d'inférences comprises par l'enfant avait un impact sur sa compréhension d'une histoire lue. Plus spécifiquement, trois types d'inférences sont corrélées à la compréhension d'histoire : celles sur les objectifs, celles sur les actions qui ont permis d'atteindre ces objectifs et celles sur les pensées et perceptions du personnage. Les enfants ayant de faibles compétences de compréhension montrent des difficultés spécifiques dans la compréhension d'inférences, ce qui impacte par la suite la compréhension de textes lus. Bianco et al. (2010) ont montré que les

enfants issus de milieux socioéconomiques défavorisés avaient significativement de plus faibles scores de compréhension que leurs pairs issus de milieux plus favorisés.

Conclusion

Ce premier chapitre nous a permis de faire l'état des lieux des principales connaissances concernant la littératie émergente. Tout d'abord, le jeune enfant développe très tôt des compétences en lien avec le langage oral et écrit. Ces compétences sont influencées par de nombreux facteurs comme par exemple le statut socio-économique de la famille, les pratiques éducatives familiales ou plus généralement l'environnement dans lequel évolue l'enfant. Toutes ces compétences peuvent être regroupées sous le terme de littératie émergente. Celle-ci est composée de trois facteurs principaux : la connaissance de l'écrit, la conscience phonologique et le langage oral. Nous avons abordé dans ce chapitre le développement de ces compétences durant la période préscolaire. Dans la suite de ce manuscrit, nous aborderons la littératie émergente par l'intermédiaire de quatre facteurs (*i.e.* connaissance de lettres, conscience phonologique, vocabulaire et compréhension), ce qui nous permettra d'observer dans un premier temps l'évolution de ces compétences, puis les liens entre celles-ci.

Chapitre 2 : Le développement des compétences en numératie émergente

Bien avant d'entrer à l'école, les jeunes enfants appréhendent de nombreux concepts mathématiques. La numératie émergente représente l'ensemble des compétences et des concepts mathématiques développés par les enfants durant la période préscolaire et ne nécessitant pas forcément un apprentissage formel. Ces compétences en numératie émergente conditionnent la performance scolaire ultérieure des enfants en mathématiques (Aunio & Räsänen, 2016; Merkley & Ansari, 2016; Starkey et al., 2004). Les interactions de l'enfant avec son environnement immédiat (e.g. parents, fratrie, enseignant, système de garderie) encouragent le développement de ces compétences (e.g. LeFevre et al., 2009). Dans ce chapitre, nous nous proposons donc d'aborder dans un premier temps le développement des compétences numériques de zéro à trois ans et les facteurs qui y sont associés. Puis, dans un second temps, nous définirons la numératie émergente, les différents modèles théoriques la représentant ainsi que le développement des différentes composantes de la numératie émergente.

2.1. Le développement des compétences en numératie émergente de 0 à 3 ans

Dès leur plus jeune âge, les enfants développent des capacités numériques précoces avant même l'apparition du langage oral. Pica et al. (2004) ont montré que l'intuition numérique des peuples, n'utilisant que des noms de nombre allant entre un et cinq, allait bien au-delà de cinq. Deux systèmes peuvent alors être différenciés : un système non verbal d'approximation des nombres et un système de comptage basé sur le langage pour les quantités exactes et l'arithmétique (Pica et al., 2004). Ainsi, bien avant de comprendre le concept de nombre, l'être humain possède des habiletés numériques nécessaires au développement des compétences mathématiques ultérieures.

2.1.1. Différentes approches théoriques de l'acquisition des compétences en numératie émergente

2.1.1.1. L'acquisition du nombre selon Piaget

De nombreuses recherches ont été menées afin d'identifier le développement et les trajectoires d'apprentissage de compétences mathématiques précoces. Avec son approche constructiviste, Piaget s'est longuement intéressé à la définition du concept de nombre et à son acquisition. Piaget considère le nombre comme un invariant abstrait (Piaget & Inhelder, 1941; Piaget & Szeminska, 1941). Pour arriver à la notion de nombre, l'enfant doit développer son raisonnement logique en suivant différents « sous-stades ». Ainsi, le nombre ne se base pas sur les caractéristiques des objets (taille, espacement, disposition spatiale, ...) représentant la quantité. Le concept de nombre serait construit par l'enfant à l'aide de trois capacités logiques : la sériation, la classification et la conservation. La sériation consiste à ordonner des objets en fonction de leurs caractéristiques comme la taille ou le poids. La classification consiste à construire des classes logiques pour ranger différents objets malgré leurs différences apparentes. Enfin, la conservation correspond à la compréhension que deux quantités égales restent égales malgré des transformations d'ordre visuel. Selon la théorie Piagétienne, le concept de nombre ne serait acquis qu'au début du stade opératoire concret, c'est-à-dire vers l'âge de 6-7 ans. Pour Piaget, « comprendre le concept de nombre » renvoie à comprendre que le nombre est un invariant abstrait, indépendant des caractéristiques physiques des éléments qui le composent et aussi à comprendre la dimension ordinale et cardinale du nombre. La dimension ordinale renvoie à l'ordre des nombres et plus particulièrement à l'itération de l'unité. Le cardinal d'une collection correspond à la quantité totale d'objets dans la collection, quel que soit l'ordre dans lequel ils ont été comptés. Il peut s'obtenir soit par correspondance terme-à-terme soit par dénombrement (*e.g.* Brissiaud, 2011; Fayol, 2018). À la suite des travaux de Piaget, de nouvelles méthodes expérimentales ont été employées afin d'étudier le développement des compétences numériques du jeune enfant. Ainsi, le contexte socio-culturel dans lequel vit l'enfant a été reconnu comme fondamental dans le développement du concept du nombre. De plus, d'autres auteurs ont défendu l'idée que les premières capacités numériques du jeune enfant apparaîtraient bien plus tôt et pourraient être innées (Feigenson et al., 2004; Gelman & Gallistel, 1978).

2.1.1.2. L'approche socio-constructiviste du nombre

L'approche socio-constructiviste, développée par Vygotsky (1962), repose sur l'idée générale que la connaissance se construit principalement grâce aux interactions avec les autres lors d'une situation d'apprentissage. Plus généralement, les auteurs socioconstructivistes pensent que l'on apprend en construisant activement du sens autour d'activités et par le biais d'interactions avec les autres. Désormais, il est reconnu que les échanges sont au cœur de la construction des connaissances (Hung, 2015). La théorie de Vygotsky ne s'applique alors pas uniquement à l'apprentissage des nombres, mais également à l'acquisition de concepts et de compétences mathématiques plus complexes (Berger, 2005). La notion de zone proximale de développement (ZPD) postule que les progrès des élèves sont optimaux lorsque les activités d'apprentissages proposées nécessitent des compétences supérieures aux compétences actuelles de l'élève et lorsque les enseignants fournissent une guidance et un soutien pertinent à l'élève (Goos, 2004). La théorie de Vygotsky accorde aussi beaucoup d'importance au jeu comme outil permettant le développement cognitif et scolaire des enfants. Chez les enfants d'âge préscolaire, le jeu est considéré comme une activité importante favorisant par exemple le développement de leurs compétences d'autorégulation ou encore de leurs compétences sociales.

2.1.1.3. Les principes de Gelman et Gallistel (1978)

Gelman et Gallistel (1978) ont tenté de définir le comptage comme un mécanisme d'appréhension du nombre. Pour ces auteurs, des principes innés guident l'enfant dans le développement de ses compétences de comptage. Cette théorie des « principes-en-premiers » repose sur cinq principes :

- 1) Le principe d'ordre stable : pour dénombrer différentes collections, l'enfant doit être en mesure d'utiliser toujours la même séquence de mots.
- 2) Le principe de correspondance terme à terme : pour chaque élément compté, un seul mot-nombre peut être associé.
- 3) Le principe cardinal : pour satisfaire ce principe, l'enfant doit comprendre que le dernier mot-nombre prononcé a une signification particulière. En effet, celui-ci représente la numérosité de la collection, c'est-à-dire la quantité d'éléments présents dans la collection.
- 4) Le principe d'abstraction : l'enfant doit comprendre que le comptage peut être appliqué à toute sorte de collection (homogène, hétérogène, visuelle ou non).

- 5) Le principe de non-pertinence de l'ordre : quel que soit l'ordre dans lequel les objets sont comptés, le résultat ne change pas.

Les principes de correspondance terme à terme, d'ordre stable, et de cardinalité définissent les règles du comptage et représentent le squelette des compétences émergentes de comptage chez le jeune enfant. Le principe d'abstraction détermine le type d'éléments sur lequel peut porter le comptage. Enfin, le principe de non pertinence de l'ordre permet de distinguer le comptage du simple étiquetage (Gelman & Meck, 1983). En opposition à la théorie des « principes-en-premier », Briars et Siegler (1984) ont développé une autre théorie du dénombrement. Pour eux, les enfants apprennent par cœur les mots-nombres puis acquièrent petit à petit les concepts du dénombrement : c'est la théorie des « principes-après ». Ainsi, les procédures de dénombrement sont acquises par imitation et par répétition. L'enfant découvre alors progressivement les règles du dénombrement. De plus, Briars et Siegler (1984) ont décrit quatre règles qui ne sont pas nécessaires au comptage mais respectées par la plupart des jeunes enfants : compter successivement des objets adjacents, pointer du doigt chaque objet compté, commencer à une extrémité de la collection et compter de gauche à droite.

2.1.1.4. L'acquisition de la chaîne numérique par Fuson et al (1982)

Fuson et al. (1982) se sont longuement intéressés à l'acquisition de la chaîne numérique verbale et corroborent la théorie des « principes-après ». Une première phase initiale d'acquisition de la chaîne numérique verbale est nécessaire pour que l'enfant apprenne la séquence de mots de nombres. Cependant, à ce niveau la chaîne numérique verbale ne peut être produite qu'en récitant la séquence entière. L'élaboration de la séquence est un long processus qui nécessite d'une part, la différenciation des mots dans la séquence et d'autre part, la construction des relations entre ces mots. Cette phase d'élaboration de la chaîne numérique est divisée en cinq niveaux :

- 1) Le niveau chapelet : à ce niveau, les mots ne sont produits que dans le cadre de la récitation de la chaîne numérique. Les mots de nombres constituent un bloc sans aucune signification numérique. L'enfant peut alors utiliser la séquence des mots de nombre lors du comptage, mais sans effectuer de correspondance terme-à-terme.
- 2) Le niveau de chaîne insécable : les mots de la séquence sont reconnaissables et peuvent être "entendus". L'enfant prend alors conscience que la chaîne numérique verbale se compose de mots de nombres individualisés. L'enfant est seulement capable de compter à partir du nombre un et de compter jusqu'à X. Le dénombrement et les

correspondances terme-à-terme sont désormais possibles et le principe cardinal s'acquiert progressivement.

- 3) Le niveau de chaîne sécable : l'enfant commence alors à faire des liens entre les mots de nombres et comprend les relations entre ceux-ci. Il utilise la chaîne numérique plus souplesment et devient capable de compter à partir d'un nombre X, de compter de X à Y, de compter à rebours ou encore de déterminer la relation existante entre deux nombres.
- 4) Le niveau de la chaîne numérique : les mots de nombre dans la séquence peuvent être pris comme des unités distinctes et l'enfant peut utiliser des segments de la chaîne numérique. À ce niveau, les mots numériques servent à compter et sont associés à un ensemble d'éléments connus (par exemple, cinq doigts). L'enfant peut compter à rebours de X à Y et peut commencer à utiliser la chaîne numérique pour faire des additions et soustractions simples.
- 5) Le niveau de la chaîne bidirectionnelle : les précédentes compétences deviennent automatisées et principalement le comptage en avant et en arrière. Ainsi, l'enfant peut changer la direction de comptage rapidement et avec flexibilité. Cela permet à l'enfant de choisir le sens le plus efficace à utiliser pour résoudre un problème particulier.

2.1.1.5. Le sens du nombre (Dehaene, 2010)

Dès sa naissance, le jeune enfant posséderait une acuité numérique appelée « sens du nombre » ou « intuition numérique » (Dehaene, 2010). Le sens du nombre correspond à la capacité de détecter intuitivement des modifications liées au nombre sans nécessairement maîtriser le concept de nombre (Anobile et al., 2018; Kersey & Cantlon, 2017). Les recherches à ce sujet ont montré que le sens du nombre était prédictif de la réussite mathématique ultérieure de l'enfant et qu'il était important de développer cette compétence dans les premières années de vie de l'enfant (Geary & vanMarle, 2016; Wang et al., 2017). Le sens du nombre impliquerait deux systèmes : un système pour représenter les grandeurs numériques approximatives, appelé « Système Approximatif du Nombre » (SAN) ; et un second système pour la représentation précise des petites numérosités inférieures à trois, appelé « système des petits ensembles » (Feigenson et al., 2004). Le système approximatif du nombre ne représente les nombres que de façon approximative et joue un rôle important dans l'apprentissage des mathématiques (Jordan et al., 2007). Grâce à ses capacités attentionnelles et à ces deux systèmes, le nourrisson aurait la capacité de *subitizer* des petits ensembles et d'estimer des quantités grâce au SAN. Les

différences individuelles dans le sens du nombre sont détectables tôt dans la vie, persistent dans le développement ultérieur et sont liées à l'intelligence générale. Le système approximatif du nombre se développerait donc tout au long de l'enfance, bien après le début de l'enseignement formel des mathématiques. Des liens forts ont ainsi été observés entre le sens du nombre du très jeune enfant et les compétences mathématiques ultérieures (Jordan et al., 2006). Bonny et Lourenco (2013) ont montré que la précision du SAN était corrélée avec les résultats en numératie émergente des élèves, mais aussi que cette relation n'était pas linéaire. Plus précisément, la corrélation entre la précision du SAN et les compétences mathématiques était plus forte pour les enfants ayant de plus faibles résultats en mathématiques que pour les enfants ayant des résultats plus élevés.

2.1.2. Le développement des compétences numériques du jeune enfant (de 0 à 3 ans)

2.1.2.1. Avant le développement du langage oral

De nombreuses études se sont intéressées au développement des compétences numériques chez les bébés et les jeunes enfants. De nombreuses recherches en psychologie cognitive et développementale supportent l'idée que les êtres humains naissent avec des compétences quantitatives innées (Wynn, 1992a). Ces compétences primaires englobent la compréhension implicite de la numération, de l'ordinalité, du comptage et de l'arithmétique simple (Geary, 2000). Ainsi, les nourrissons humains sont capables de se représenter des quantités discrètes (Feigenson et al., 2004; Xu & Spelke, 2000). Les capacités de discrimination du bébé sont très souvent évaluées à l'aide du paradigme d'habituation. Dans ce paradigme, dans un premier temps des collections de même taille sont présentées aux enfants. Puis, une collection de taille différente sera présentée à l'enfant avec des quantités plus ou moins grandes. Ce paradigme se base alors sur le principe suivant : un enfant regardera plus longtemps une collection nouvelle ou non attendue. Ainsi, si le bébé arrive à percevoir la différence entre la collection présentée et les collections précédentes alors il regardera plus longtemps la nouvelle collection. Izard et al. (2009) ont montré que les nouveau-nés de quelques jours associent spontanément des représentations visuelles fixes de 4 à 18 objets à des séquences auditives comportant le même nombre de sons. Les nourrissons regardaient plus longtemps les représentations visuelles comportant le même nombre d'éléments que de sons entendus, que celles avec trois fois plus ou trois fois moins d'éléments que de sons entendus. Cependant, cette différence n'a pas été observée lorsque le rapport entre les nombres était multiplié ou divisé par deux. Par ailleurs, d'autres études ont montré que les nourrissons âgés de 4,5 à 6 mois sont

capables de distinguer des nombres qui diffèrent dans un rapport de 1/2 quelle que soit la représentation choisie : des séries de points (Xu, 2003; Xu & Spelke, 2000), des séquences de sons (Lipton & Spelke, 2003) ou des séquences d'actions (Wood & Spelke, 2005). De même, Kobayashi et al. (2005) ont aussi observé qu'à six mois, le nourrisson est capable d'associer des ensembles de deux ou trois objets à différentes modalités sensorielles, avec des sons de différentes durées. Les nouveau-nés possèdent ainsi une représentation abstraite et imprécise des grandes numérosités.

D'autres auteurs ont travaillé plus spécifiquement sur la capacité des jeunes enfants à comprendre les manipulations effectuées sur des quantités. Ainsi, les nourrissons sont sensibles aux ajouts et aux retraits bien avant l'apparition du langage (Antell & Keating, 2020; Wynn, 1992b). Les bébés âgés de quelques semaines arrivent à identifier des collections de deux ou trois objets (Starkey & Cooper, 1980). Wynn (1992b) a aussi montré que les nourrissons âgés de cinq mois étaient capables d'effectuer des opérations simples (addition et soustraction) sur de petites quantités. Une poupée était présentée à l'enfant puis celle-ci était cachée par un rideau. L'expérimentateur ajoutait alors une seconde poupée derrière le rideau. Puis, le rideau se levait et le temps de fixation des poupées par l'enfant était mesuré. Ainsi, les jeunes enfants maintenaient davantage leur regard lorsqu'une situation incongruente était présentée (Christodoulou et al., 2017). Bremner et al. (2017) ont répliqué cette expérience, toujours auprès d'enfants âgés de cinq mois, en utilisant un système d'*eye-tracking*, permettant de suivre les mouvements oculaires et les fixations des enfants. Cette étude a montré des résultats similaires à celle de Wynn (1992b). De plus, dans la condition $2-1 = 2$, les enfants regardaient plus longtemps l'objet qui ne devait pas être présent (objet exposé du côté par lequel la main venait de retirer l'objet).

McCrink et Wynn (2004) ont également montré que des bébés de 9 mois pouvaient faire des calculs approximatifs et étaient capables de repérer un calcul erroné. Différents calculs étaient présentés à des nourrissons comme $10-5 = 5$, $10-5 = 10$, $5+5 = 10$ ou $5+5 = 5$. Lorsque l'addition $5+5$ était présentée, les nourrissons ont regardé plus longtemps le résultat de 5 que le résultat 10, tandis que lorsque la soustraction $10-5$ était présentée, ceux-ci ont regardé plus longtemps le résultat 10 que le résultat 5. Dès leur plus jeune âge, les nourrissons sont donc capables d'énumérer des éléments visuels (McCrink & Wynn, 2004; Xu, 2003; Xu & Spelke, 2000), des entités auditives (Lipton & Spelke, 2003), et même des actions (Wood & Spelke, 2005) qui représentent des quantités discrètes. Pour des quantités continues, Brannon et al. (2006) ont observé que les enfants de six mois étaient capables de discriminer des changements

de surface d'éléments visuels pour les proportions suivantes 1:4, 1:3 et 1:2. Hespos et al. (2012) ont quant à eux montré que des enfants âgés entre 3 et 13 mois arrivent à différencier des quantités de sable avec un ratio de 1 pour 4 (N= 88). La majorité des filles de leur échantillon étaient même capables de différencier des quantités avec un rapport de 1 pour 2.

2.1.2.2. *Après le développement du langage oral*

Avec l'apparition du langage, les enfants énoncent progressivement des noms de nombres. Dès l'âge de deux ou trois ans, les enfants commencent à compter, c'est-à-dire qu'ils peuvent montrer une aptitude à réciter la chaîne numérique verbale tout en pointant les objets qu'ils comptent. Dans un premier temps, les enfants apprennent la chaîne numérique verbale avant même de comprendre que les mots de nombre correspondent à des valeurs cardinales spécifiques, uniques et exactes (Condry & Spelke, 2008). Puis progressivement, les jeunes enfants apprennent à faire les correspondances entre les quantités et les mots de nombres : vers l'âge de deux ans, l'enfant arrive à associer la quantité un avec le mot de nombre un. Vers l'âge de deux ans et demi, les enfants arrivent à associer la quantité « deux » avec sa représentation verbale. Et seulement quelques mois plus tard l'enfant maîtrise la quantité « trois » (Wynn, 1992a).

2.1.3. *Les facteurs influençant le développement numérique du jeune enfant (de 0 à 3 ans)*

Dès l'entrée à l'école maternelle, des différences individuelles importantes existent déjà concernant les compétences numériques, comme le montrent les tests standardisés ainsi que les tâches expérimentales (Starkey et al., 2004). Comme nous l'avons vu précédemment, de nombreuses études se sont intéressées aux facteurs influençant le développement des compétences langagières du très jeune enfant. Cependant, peu d'études se sont intéressées aux facteurs influençant le développement des connaissances numériques précoces.

Plusieurs études ont observé l'influence du milieu socio-économique sur le développement numérique du jeune enfant (Saxe et al., 1987; Starkey et al., 2004). Les différences de connaissances mathématiques liées au statut socioéconomique apparaissent dès la petite enfance, car les jeunes enfants issus de familles économiquement défavorisées reçoivent moins de soutien pour leur développement mathématique que leurs camarades de classe moyenne. Un écart significatif lié au statut socioéconomique dans les connaissances

mathématiques a été constaté avant l'entrée en maternelle (Starkey et al., 2004). Ces différences de connaissances englobent les connaissances numériques informelles, les capacités spatiales/géométriques, la reproduction de modèles et les compétences en matière de mesure (Starkey et al., 2004). La fréquence, le type et la complexité des activités mathématiques pratiquées par les parents avec leurs enfants d'âge préscolaire varient considérablement. Ces variations sont associées au milieu socio-économique des familles (Saxe et al., 1987). Saxe et al. (1987) ont constaté que les activités numériques réalisées par les familles de statut socio-économique faible ou moyen ne diffèrent pas en fréquence mais en complexité. A titre d'exemple, les mères de classe moyenne fixent des objectifs plus difficiles pour leurs enfants que les mères de classe ouvrière. Les recherches sur l'environnement d'apprentissage à la maison indiquent qu'il existe des différences liées au statut socioéconomique concernant le nombre et la fréquence des pratiques parentales visant à soutenir le développement précoce des mathématiques (Starkey et al., 2004). De plus, ces pratiques parentales semblent avoir des conséquences sur le développement mathématique ultérieur des enfants.

L'apport linguistique est crucial pour l'apprentissage des mots de nombre et du cardinal par l'enfant. Les étiquettes verbales favorisent la formation de catégories en orientant l'attention sur une dimension chiffrée et en invitant l'enfant à faire des comparaisons entre les ensembles (Mix, 2008). Levine et al. (2010) se sont intéressés aux interactions parent-enfant engageant le nombre chez de jeunes enfants de 14 à 30 mois. Dans leur étude, ils ont montré que les petits nombres étaient les plus utilisés par les dyades parents-enfants. De plus, à 30 mois, la majorité des conversations sur les nombres entre enfants et parents concernaient le comptage et l'étiquetage des valeurs cardinales des ensembles (Levine et al., 2010).

Enfin, certaines recherches se sont intéressées aux facteurs influençant le développement numérique du jeune enfant. Certains processus génétiques, neurologiques et psychologiques peuvent entraver l'apprentissage des compétences numériques de base et entraîner des coûts individuels et sociaux (Geary, 2000).

2.2.La numératie émergente

2.2.1. Définition du concept de numératie émergente

Comme nous l'avons vu précédemment, bien avant d'entrer à l'école maternelle, les jeunes enfants développent des compétences émergentes en lien avec les quantités, les nombres ou encore les surfaces et les volumes. Ces compétences mathématiques précoces renvoient à

plusieurs domaines comme le calcul, la géométrie, la modélisation et la résolution de problèmes (Jordan et al., 2009; National Research Council (U.S.), 2009). Ces compétences se développent en interaction pour construire les compétences mathématiques plus avancées (Aunola et al., 2004; Purpura et al., 2013). Dans cette thèse, nous nous intéresserons principalement aux compétences en numératie émergente. Le développement des compétences en numératie émergente constitue la base des compétences mathématiques ultérieures (Duncan et al., 2007).

Les compétences mathématiques se développent de manière cumulative : les compétences émergentes constituant une base nécessaire pour l'acquisition des compétences ultérieures (Aunio & Niemivirta, 2010; Jordan et al., 2009; Purpura et al., 2013). Plusieurs études longitudinales ont montré que les compétences en numératie émergente jouent un rôle important concernant la trajectoire développementale d'apprentissage des mathématiques à l'école primaire (Aunio & Niemivirta, 2010; Jordan et al., 2009; Krajewski & Schneider, 2009b). Les enfants qui obtiennent de plus faibles résultats en numératie émergente peuvent présenter de graves déficits dans toutes les compétences numériques (Salminen et al., 2018).

Les expressions numératie précoce ou numératie émergente (*early numeracy or emergent numeracy*) sont principalement employées dans les travaux internationaux (Kleemans et al., 2012). Cependant, il n'existe pas encore de consensus concernant la terminologie employée pour les compétences mathématiques préscolaires : certains utilisent le terme de numératie précoce, d'autres le terme de numératie émergente et d'autres encore les termes nombre ou mathématiques. D'après Purpura et Napoli (2015), la numératie précoce correspond à une panoplie de compétences et de concepts qui forment un système interconnecté de connaissances (comme par exemple : nommer des chiffres simples, différencier des quantités). La numératie émergente est un terme général qui englobe plusieurs compétences telles que le comptage verbal, la connaissance des symboles numériques, la reconnaissance des quantités, la comparaison des magnitudes numériques et la manipulation des quantités comme l'addition ou la soustraction (Raghubar & Barnes, 2017). Ainsi, apprendre à compter, à identifier des nombres, à comparer et à manipuler des quantités sont des compétences clefs de la numératie émergente. Les compétences mathématiques informelles s'acquièrent, pour la plupart, avant ou en dehors du cadre scolaire. En revanche, les connaissances mathématiques formelles sont acquises à l'aide d'un enseignement explicite dans le cadre scolaire, principalement réalisé à partir du cours préparatoire (CP) dans le système éducatif français.

Les compétences en numératie émergente sont généralement représentées en trois domaines différents : la compréhension de relations numériques (relations), les compétences de

comptage (nombres) et les compétences arithmétiques de base (opérations) (Jordan et al., 2009; National Research Council (U.S.), 2009; Purpura & Lonigan, 2013). Les relations numériques font référence à la compréhension des relations quantitatives et non quantitatives entre les éléments (Aunio & Räsänen, 2016) et sont des prérequis des compétences arithmétiques de base. La compréhension des relations numériques comprend un ensemble de domaines comme la comparaison des nombres, la valeur cardinale, la correspondance terme à terme, les premiers principes logico-mathématiques et la compréhension du système en base-10 (Aunio & Räsänen, 2016). Les compétences de comptage se réfèrent à la connaissance des nombres et leur représentation, à la connaissance de la chaîne numérique et le dénombrement (Aunio & Räsänen, 2016). Les compétences arithmétiques de base correspondent aux tâches d'additions et de soustractions.

2.2.2. Les différents modèles de la numératie émergente

2.2.2.1. Le modèle du triple code (Dehaene, 1992; Dehaene & Cohen, 1995)

Le modèle du triple code permet d'aborder le concept de nombre d'un point de vue cognitif (Dehaene, 1992; Dehaene & Cohen, 1995). Ce modèle se base sur diverses observations neuropsychologiques, des recherches aussi bien sur le nouveau-né que chez l'adulte dans le domaine de la cognition numérique ainsi que des travaux de neuro-imagerie.

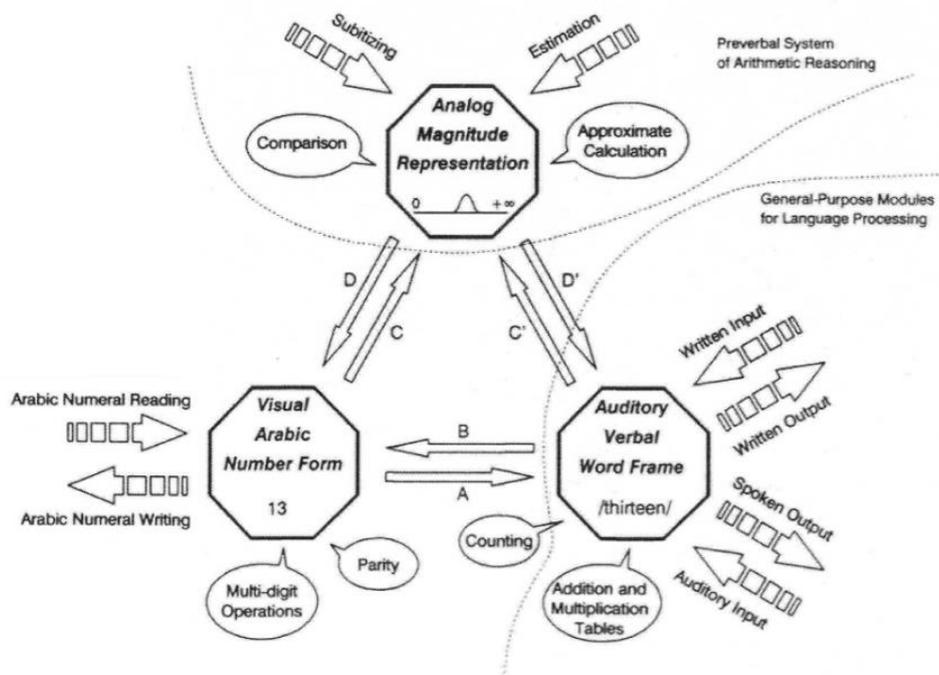


Figure 4. Modèle du Triple Code (Dehaene, 1992)

Note. Figure provenant de l'article "Varieties of numerical abilities", par S. Dehaene, 1992, *Cognition*, 44, p. 31.

Trois types de représentations mentales existeraient chez l'adulte et seraient censées intervenir lors du traitement des quantités : le système verbal, le système visuel arabe et le système de quantités. Dans ce modèle (cf. figure 4), les trois systèmes sont interconnectés.

Tout d'abord, le système verbal permettrait de traiter le code verbal des nombres. Les nombres seraient représentés lexicalement, phonologiquement et syntaxiquement dans ce système. Cette représentation n'est présente que dans les sociétés où il existe un code verbal dans lequel les nombres représentent une séquence bien organisée. Le système verbal renvoie plus spécifiquement aux formes auditives et verbales des quantités ainsi qu'à l'écriture et à la lecture des mots de nombre. Il serait impliqué dans le traitement des mots de nombre, du comptage et dans les faits additifs ou multiplicatifs simples qui ont fait l'objet d'un apprentissage systématique. Au niveau cérébral, ce système se situe dans le gyrus angulaire gauche pour les manipulations verbales des informations numériques. Le système visuel arabe correspond à la forme visuelle des nombres. Les nombres sont alors encodés sous la forme d'une chaîne de chiffres arabes. Cette représentation utilise la base 10 et serait indépendante du langage (car elle est utilisée dans de nombreuses langues différentes). Ce système se situerait dans la région occipito-temporale bilatérale. Enfin, le système de quantités représente la dimension sémantique du nombre. Il serait indépendant du langage et présent chez le nouveau-né et chez l'animal. Ce système permet d'accéder à la numérosité des nombres, d'estimer et de comparer des quantités et de faire des calculs approximatifs. Si le nombre est présenté de manière symbolique, celui-ci sera au préalable traité par le système verbal ou par le système visuel arabe avant d'être traité par le système de quantités. Dehaene et al. (2003) assimilent métaphoriquement le système de quantités et la ligne numérique mentale. Ainsi, les petites quantités seraient beaucoup plus espacées les unes des autres que les grandes quantités. Le système de quantités serait présent dans les deux hémisphères au niveau du sillon interpariétal bilatéral : cette zone est en charge des processus attentionnels visuo-spatiaux nécessaires lors de l'exécution d'une tâche numérique.

2.2.2.2. *Le modèle du développement mathématique (Krajewski & Schneider, 2009)*

Dans leur modèle, Krajewski et Schneider (2009) postulent que les compétences précoces de quantité-nombre se développent via trois niveaux permettant à l'enfant une meilleure compréhension du lien entre quantités et mots de nombre. Les trois niveaux développés dans ce modèle (cf. figure 5) sont les suivants :

- 1) Les compétences numériques de base
- 2) Les liens entre les mots de nombre et les quantités
- 3) Les relations entre les quantités numériques

Le premier niveau de ce modèle correspond aux compétences numériques de base. Ces compétences sont présentes chez le très jeune enfant et ne nécessitent pas forcément l'usage du langage oral. Dans ce niveau, les séquences des noms de nombres sont isolées des quantités. L'enfant est alors capable de discriminer des quantités, de réciter les mots de nombre ou encore de réciter la chaîne numérique verbale mais sans pour autant décrire des quantités. Après avoir développé ces compétences, l'enfant va commencer à faire des liens entre la chaîne numérique et les quantités. Il s'agit donc du second niveau : celui des liens entre les mots de nombre et les quantités. Ces liens entre quantités et noms de nombres se développent en deux temps. Dans un premier temps, l'enfant va développer une conception imprécise et vague de l'attribution du mot à la quantité correspondante. Il commence donc à employer des termes tels que « un peu », « beaucoup » ou « vraiment beaucoup ». Et dans un second temps, l'enfant va associer précisément un mot à sa quantité. Pour cela, l'enfant doit au préalable réciter correctement la chaîne numérique verbale. Dans ce niveau, l'enfant commence à réaliser qu'une quantité peut être divisée puis se recomposer et que les quantités ne changent que si on enlève ou on ajoute une quantité à la quantité initiale. De plus, il comprend aussi que la quantité ne change pas selon le positionnement spatial. Enfin dans le troisième niveau, l'enfant développe des compétences sur les relations entre les quantités et les noms de nombres. Ainsi, l'enfant comprend les compositions et les décompositions de nombres tel que $5 = 3 + 2$ ainsi que les différences entre les nombres. La différence entre deux nombres correspond à un troisième nombre qui n'est pas accessible par le biais de la perception.

Ce modèle décrit la transition d'une perception procédurale à une perception conceptuelle de la compréhension des noms de nombres (Krajewski, 2008a). Les deux premiers niveaux représentent des compétences qui peuvent être considérées comme de véritables

précurseurs des mathématiques. De plus, il faut aussi noter que les niveaux ne sont pas forcément passés simultanément pour l'utilisation verbale des nombres et pour l'utilisation écrite des chiffres arabes comme spécifié dans le modèle du triple code de Dehaene (1992) avec le système verbal et le système visuel arabe. Un enfant peut alors se situer à différents niveaux de ce modèle selon la partie de la chaîne numérique qui est considérée. Par exemple, un enfant de trois ans est capable de distinguer les nombres entre un et quatre et leur quantité, mais pas les nombres entre cinq et neuf.

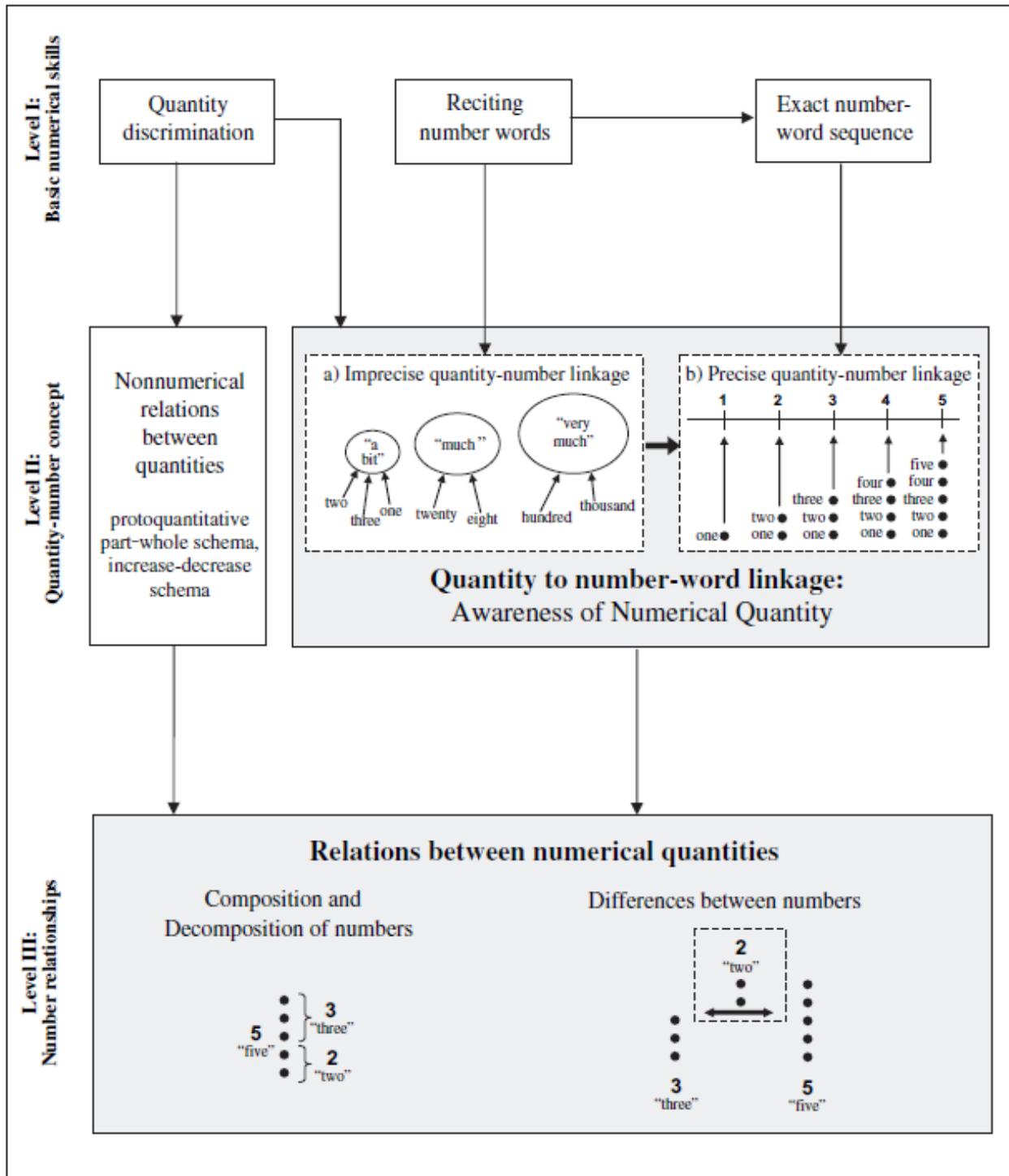


Figure 5. Modèle du développement mathématique précoce (Krajewski & Schneider, 2009)

Note. Figure provenant de l'article "Early development of quantity to number-word linkage as a precursor of mathematical school achievement and mathematical difficulties : Findings from a four-year longitudinal study", par K. Krajewski et W. Schneider, 2009, *Learning and Instruction*, 19(6), p. 515.

2.2.2.3. Le modèle des phases développementales de la numératie émergente (Purpura et al., 2013)

Dans ce modèle (cf. figure 6), la trajectoire des compétences en numératie émergente englobe trois phases principales qui se chevauchent : la numératie informelle, les connaissances numériques et la numératie formelle. Bien que la numératie informelle et les connaissances numériques se développent en parallèle, les enfants doivent faire correspondre leurs connaissances informelles à la connaissance des chiffres pour acquérir des connaissances formelles (Purpura et al., 2013). Ce modèle ne s'intéresse qu'au domaine symbolique de la numératie (des quantités exactes associées à des chiffres ou à des mots de nombres) et se base sur les travaux de Ginsburg (1975).

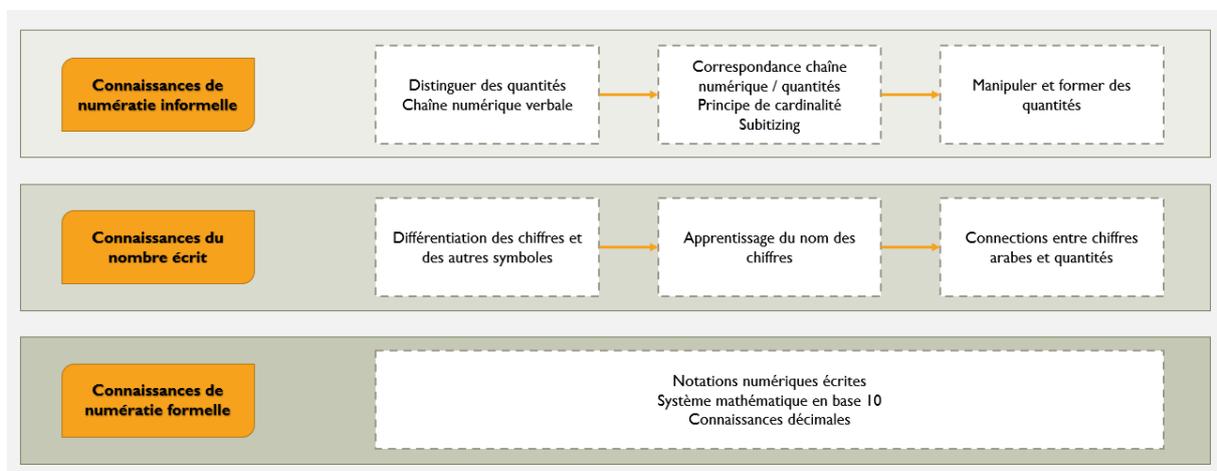


Figure 6. Le modèle des phases développementales de la numératie émergente (Purpura et al., 2013)

Les connaissances de numératie informelle renvoient aux connaissances que l'enfant va acquérir avant l'entrée à l'école maternelle, sans symboles écrits ou opératoires (+/-). Cette phase se focalise principalement sur les liens entre les quantités et les mots de nombres ainsi que sur les relations entre les quantités. Les auteurs s'appuient sur le modèle de Krajewski (2008) pour décomposer cette phase entre 3 niveaux. Dans le premier niveau, les enfants apprennent à distinguer les quantités en comparant des ensembles et apprennent en parallèle la séquence verbale des mots de nombres. Dans le deuxième niveau, les enfants commencent à faire des liens entre leurs précédents apprentissages : correspondance de la chaîne numérique verbale à des ensembles par l'intermédiaire du comptage terme à terme, développement du principe de cardinalité et des capacités de subitizing. Dans le troisième niveau, les enfants utilisent les connaissances qu'ils ont développées dans les deux précédents niveaux pour

manipuler des quantités et former de nouvelles quantités (additions et soustractions simples = problèmes à histoire).

Le passage des connaissances mathématiques informelles aux connaissances mathématiques formelles enseignées à l'école est une étape particulièrement importante du développement des mathématiques (Ginsburg, 1975; Starkey et al., 2004). Avant que les enfants puissent appliquer leurs connaissances informelles dans le domaine formel, ils doivent faire des liens entre leurs connaissances et le système des chiffres arabes. Les connaissances numériques correspondent ainsi aux liens entre leurs connaissances informelles et le système de chiffres/nombres arabes. Ce processus débute par la différenciation entre les chiffres et les autres symboles. L'enfant doit alors se rendre compte que les chiffres sont différents des lettres. Ensuite, l'enfant doit apprendre les noms des nombres et finalement faire des connexions entre les chiffres arabes et leurs représentations quantitatives.

Enfin, la numératie formelle renvoie aux concepts et aux compétences mathématiques qui sont développés à l'école comme les notations opératoires, le système mathématique en base-10 ou encore les connaissances décimales.

2.2.2.4. Les compétences numériques de base pour l'apprentissage des mathématiques chez les enfants de cinq à huit ans (Aunio & Räsänen, 2016)

Aunio et Räsänen (2016) ont théorisé un modèle des facteurs numériques cruciaux pour le développement des compétences mathématiques des enfants âgés de 5 à 8 ans. Leur modèle se base sur les résultats d'études longitudinales et sur une série de tests standardisés destinés à mesurer le développement des compétences mathématiques. Ce modèle, (cf. figure 7) représentant les compétences numériques de base pour l'apprentissage des mathématiques chez les enfants de cinq à huit ans, se compose de quatre facteurs :

- 1) Le sens symbolique et non symbolique des nombres qui correspond au subitizing, à la comparaison de magnitude des mots de nombres et à la représentation spatiale des quantités. Il s'agit plus précisément du sens du nombre préverbal et d'une représentation approximative des quantités et de leurs différences.
- 2) La compréhension des relations mathématiques se réfère à la compréhension des relations quantitatives et non quantitatives entre les éléments et inclut les principes mathématico-logiques précoces, les principes arithmétiques de base, les symboles opérationnels mathématiques ou encore la place et la valeur des nombres et le système

en base-10. Les principes mathématico-logiques correspondent aux compétences de sériation, de classification, de comparaison, de correspondance terme-à-terme et de cardinalité.

- 3) Les compétences de comptage qui comprennent la connaissance des symboles des nombres, la récitation de la chaîne numérique et le dénombrement. Compter les éléments d'un ensemble d'objets signifie que l'enfant utilise ses compétences en matière de séquence de mots de nombres pour dénombrer.
- 4) Les compétences de base en arithmétique qui englobent les combinaisons arithmétiques et les compétences d'addition, de soustraction, de multiplication et de division avec des symboles de nombres. Ces compétences ont été testées soit de manières verbale ou visuelle, soit seulement visuellement, soit seulement verbalement.

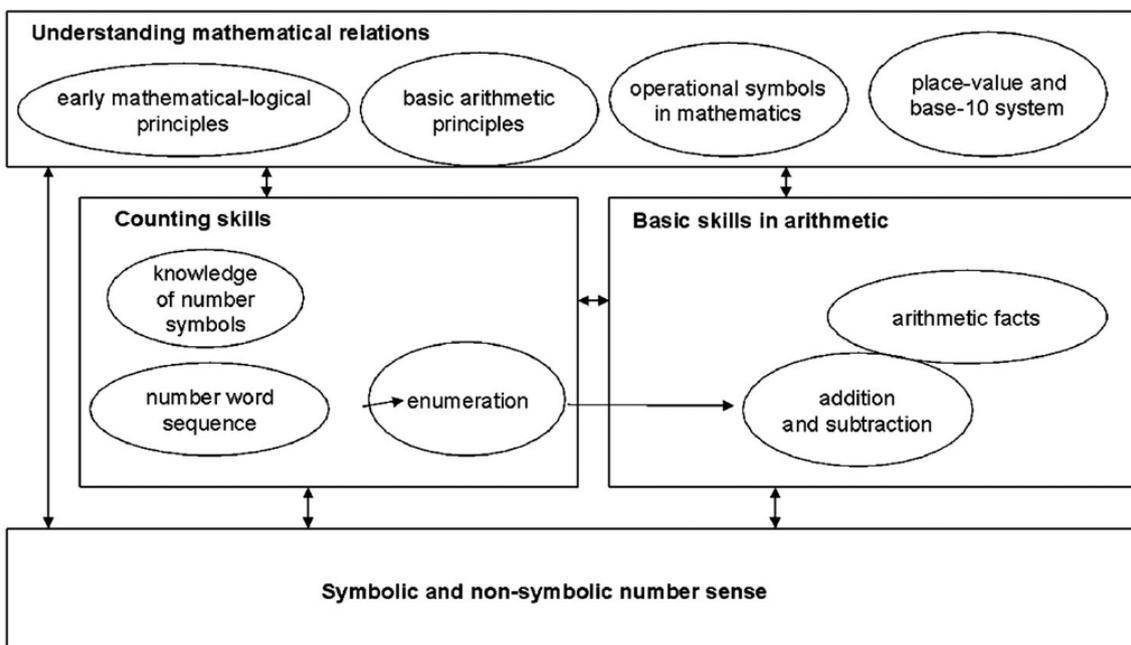


Figure 7. Compétences numériques de base nécessaires à l'apprentissage des mathématiques chez les enfants de cinq à huit ans (Aunio & Räsänen, 2016)

Note. Figure provenant de l'article “Core numerical skills for learning mathematics in children aged five to eight years – a working model for educators”, par Aunio et Räsänen, 2016, *European Early Childhood Education Research Journal*, 24(5), p. 699.

Le modèle développé par Aunio et Räsänen (2016) a pour objectif de permettre aux éducateurs de porter leur attention sur les compétences mathématiques pertinentes et de s'assurer d'accorder le temps nécessaire aux divers apprentissages mathématiques. Ce modèle développemental des compétences mathématiques de l'enfant de cinq à huit ans permet aussi

de suivre l'évolution des compétences des enfants dans une perspective longitudinale, permettant de faire la transition entre la période préscolaire et l'enseignement élémentaire.

2.2.3. Les principales composantes de la numératie émergente

Les compétences en numératie émergente impliquent la compréhension et la manipulation de nombres symboliques et non symboliques. Les premières compétences en matière de nombres symboliques comprennent l'apprentissage de la chaîne numérique verbale et la compréhension de la signification numérique des mots de nombres et des chiffres arabes. On considère que les enfants connaissent la signification des symboles une fois qu'ils ont acquis le principe de cardinalité. Tandis que les compétences et les représentations non symboliques des nombres font référence aux manières de représenter les nombres sans utiliser de symboles et impliquent généralement des manipulations ou des transformations numériques sur des objets ainsi que des comparaisons de quantités (Raghubar & Barnes, 2017).

Le jeune enfant commence tout d'abord par apprendre la chaîne numérique verbale, par comparer des quantités, par dénombrer et associer des quantités à des chiffres ou encore par manipuler des quantités à travers les problèmes à histoire (Purpura et al., 2015). En parallèle de ces compétences, l'enfant apprend à reconnaître les chiffres. Dès l'âge de quatre ans, 25% des enfants sont capables d'identifier les chiffres de un à neuf (Ginsburg & Baroody, 2003). Cependant, l'enfant ne doit pas seulement être capable d'identifier les chiffres, mais il doit également être en mesure d'associer un chiffre à sa quantité et inversement. Lorsque les enfants connaissent les chiffres arabes et savent comment les manipuler à des fins mathématiques, ils peuvent effectuer des comparaisons de chiffres et ordonner les chiffres (Purpura et al., 2015). Dès l'entrée à l'école maternelle, des différences individuelles ont été constatées au niveau de leurs connaissances numériques des élèves, aussi bien par des tests standardisés (e.g., Starkey et al., 2004) que par des tâches expérimentales (e.g., Clements & Sarama, 2007). Mieux comprendre le développement de ces compétences en numératie émergente permettrait alors aux éducateurs d'agir sur les variables favorisant l'acquisition de ces compétences.

2.2.3.1. La connaissance des chiffres

La connaissance des chiffres correspond à la compréhension conceptuelle et procédurale des nombres entiers (Okamoto & Case, 1996). Elle se développe progressivement tout au long des premières années de vie de l'enfant (Rieunaud, 1989) et est liée au développement des

compétences mathématiques ultérieures (Duncan et al., 2007; National Research Council (U.S.), 2009; Nguyen et al., 2016a; Watts et al., 2014). La connaissance des chiffres proviendrait de l'intégration des compétences de sens du nombre et du système numérique symbolique enseigné à l'école ou à la maison (Feigenson et al., 2013). Garon-Carrier et al. (2018) ont montré que le développement de la connaissance des chiffres n'est pas linéaire. Le niveau initial de connaissance des chiffres est varié, de même que le taux de progression entre la période préscolaire et l'entrée à l'école élémentaire. Les enfants ayant les plus faibles scores de connaissance des chiffres à la maternelle maintenaient ces difficultés à l'école élémentaire. Ce qui suggère donc que les déficits initiaux en connaissance des chiffres entravent la réussite mathématique et scolaire ultérieure (Garon-Carrier et al., 2018). Comme le suggère le modèle du triple code (Dehaene & Cohen, 1995), la représentation symbolique du nombre se développe de manière séquentielle. Les quantités numériques sont d'abord traitées de manière non-symbolique grâce au code analogique, ce qui permet à l'enfant d'estimer des quantités. Ensuite, avec l'exposition au langage et les activités informelles, l'enfant apprend à réciter la chaîne numérique verbale (code verbal) et à identifier les chiffres écrits (code visuel).

La connaissance des chiffres implique que le jeune enfant associe le nom de nombres avec le système numérique arabe qui lui correspond. Les enfants passent progressivement de l'utilisation de formes écrites idiosyncrasiques non figuratives comme des gribouillages, à l'utilisation de représentations plus iconiques et enfin à l'utilisation du système de numération conventionnel. La connaissance des chiffres et leur écriture nécessite donc un apprentissage spécifique. Les enfants apprennent les mots de nombre avant d'être initiés aux chiffres écrits (Hurst et al., 2017). Ainsi, les liens entre quantités et mots de nombres se développeraient bien avant les liens entre quantités et chiffres écrits (Benoit et al., 2013). Le langage aurait une influence sur le développement de l'apprentissage de la signification des premiers mots de nombre. Par exemple, les enfants qui parlent anglais ou russe apprennent plus tôt la signification de la quantité « un » que des enfants parlant le japonais ou le mandarin (Le Corre et al., 2016; Sarnecka et al., 2007). En effet, la langue anglaise comme le russe distingue le singulier et le pluriel tandis que le japonais et le mandarin distinguent rarement le pluriel.

La reconnaissance des nombres à deux chiffres est logiquement considérée comme plus avancée que la reconnaissance des chiffres seuls (Claessens et al., 2014). Parmi les chiffres, il semblerait que le chiffre un soit le mieux connu par les jeunes enfants (Litkowski et al., 2020). Pour les nombres composés de deux chiffres, le nombre dix serait mieux reconnu par les enfants que tous les autres nombres à deux chiffres. Ainsi, au sein de leur échantillon de 801 enfants

américains d'âge préscolaire, 45,9 % des enfants de quatre ans et 65,1 % des enfants de cinq ans identifiaient correctement le nombre 10 (Litkowski et al., 2020).

2.2.3.2. *La récitation de la chaîne numérique*

L'acquisition de la chaîne numérique verbale est une étape importante dans le développement de l'enfant. La récitation de la chaîne numérique ou comptage verbal correspond à la capacité à réciter des mots numériques dans le bon ordre en avant et en arrière d'un nombre donné. La récitation du début de la chaîne numérique est l'une des premières choses apprises par l'enfant. Pour Fuson et al. (1982), la chaîne numérique verbale s'acquiert entre deux et six ans. A partir de l'âge de 48 mois (petite section de maternelle), l'enfant est capable de réciter la chaîne numérique verbale jusqu'à 10 (California Department of Education, 2008). Clements et Sarama (2014) ont montré que les enfants âgés de trois ans pouvaient généralement compter jusqu'à 10, tandis que compter jusqu'à 20 et au-delà est une compétence généralement développée vers l'âge de cinq ans. Litkowski et al. (2020) ont quant à eux montré que seuls 48,1% des enfants de trois ans étaient capables de compter jusqu'à 10 et seulement la moitié des enfants de cinq ans était capable de compter jusqu'à 20. L'acquisition de la chaîne numérique verbale par l'enfant suit donc les différentes étapes explicitées plus en détail dans la première partie de ce chapitre. L'enfant récite d'abord la chaîne numérique verbale comme un tout sans réaliser de séparation entre les mots et sans aucune correspondance terme à terme. Progressivement l'enfant acquiert la capacité de commencer son comptage à partir d'un chiffre quelconque et commence à compter à rebours. Les enfants apprennent à réciter la chaîne numérique verbale bien avant d'avoir compris l'association de chaque mot de nombre à sa numérosité spécifique (Condry & Spelke, 2008).

Lorsque les enfants apprennent la signification des mots de nombre, ils apprennent tout d'abord les trois ou quatre premiers mots l'un après l'autre et dans l'ordre (Sarnecka & Lee, 2009; Wynn, 1992a). Ce développement est généralement appelé « niveau de connaissance » (*knower-levels account*), et permet de catégoriser « n-connaisseur », c'est-à-dire un enfant qui connaît les nombres jusqu'à n. Cela fait également référence à la progression des jeunes enfants dans l'apprentissage des nombres. L'enfant progresse alors du niveau « un » à « deux » puis à « trois » et pour certains enfants à « quatre ». A ce stade, la cardinalité de chaque mot de nombre est encore représentée par le système de capacité limitée (Sarnecka & Lee, 2009). En français comme en anglais, l'apprentissage de la séquence des mots de nombres de 11 à 19 est particulièrement difficile car ces nombres ne suivent pas un schéma cohérent (Aunio et al.,

2008; Lefevre et al., 2002; Miller et al., 1995). Par exemple, en français, les nombres onze, douze, treize, quatorze, quinze et seize ne suivent pas un schéma régulier tandis que les nombres dix-sept, dix-huit et dix-neuf gardent la même structure (LeFevre et al., 2018). Pour la suite de la chaîne numérique verbale, certaines spécificités françaises sont encore à constater. Ainsi, le mot vingt ne semble pas être lié ni à deux, ni à dix. De même, les dizaines 70 (soixante-dix), 80 (quatre-vingts) et 90 (quatre-vingt-dix) sont irrégulières. Toutes ces irrégularités semblent expliquer pourquoi les enfants français acquièrent plus lentement la chaîne numérique verbale. En revanche, dans de nombreuses langues asiatiques, les mots de nombres suivent une séquence prévisible qui combine la dizaine avec l'unité (Miller et al., 1995).

2.2.3.3. *Le dénombrement et la cardinalité*

Le dénombrement permet de comptabiliser les éléments contenus dans une collection, de manière précise. Le dénombrement consiste à faire la correspondance entre la chaîne numérique verbale et chaque élément de la collection afin de déterminer la cardinalité de la collection. Il s'agit alors de comprendre que chaque objet d'un ensemble n'est compté qu'une seule fois, que les mots de nombres sont toujours utilisés dans le même ordre et que le dernier nombre du décompte indique le nombre total d'objets de l'ensemble, qui fait référence à la propriété cardinale des nombres (Gelman & Gallistel, 1978). Le dénombrement suppose donc que l'enfant ait acquis la chaîne numérique verbale dans son niveau sécable (Fuson et al., 1982). Enfin, compter le nombre total d'éléments est également nécessaire pour comparer les collections dès que l'estimation perceptuelle n'est plus suffisante (Halberda & Feigenson, 2008). Dès l'âge de quatre ans, l'enfant devient capable d'associer les mots « un », « deux » et « trois » à leurs quantités respectives, de compter jusqu'à cinq objets sans faire d'erreur (California Department of Education, 2008). Dans l'étude de Litkowski et al. (2020), 71,9% des enfants pouvaient dénombrer six en réalisant une correspondance terme-à-terme à l'âge de quatre ans et 71,7% pouvaient dénombrer onze à l'âge de 5 ans. Avec le temps, l'enfant va développer et stabiliser ses compétences de dénombrement.

L'acquisition du principe cardinal est généralement considérée comme une compétence plus difficile que le dénombrement car elle requiert la capacité de relier le comptage verbal à la quantité. Le développement du principe cardinal débute tout d'abord par l'apprentissage des mots de nombre et de la chaîne numérique verbale (Fuson et al., 1982; Gelman & Gallistel, 1978). Comme nous l'avons vu précédemment, ces apprentissages sont généralement effectués entre deux et trois ans (Le Corre et al., 2006; Wynn, 1992a). VanMarle et al. (2018) ont montré

que le système approximatif du nombre contribuait à l'émergence de la compréhension du principe cardinal chez l'enfant. Cependant, dès lors que le principe cardinal est acquis, les compétences mathématiques ultérieures sont bien plus influencées par le principe cardinal que par le système approximatif du nombre (Chu et al., 2015). Le principe cardinal est généralement évalué par le biais des tâches de comptage structuré. Ainsi, à la fin de chaque item, les enfants sont invités à indiquer combien d'éléments il y avait en tout. Un autre type de tâche est aussi utilisé pour tester le principe cardinal : on demande alors à l'enfant de nous « *donner x jetons* ». Sarnecka et Carey (2008) ont d'ailleurs montré que de nombreux enfants arrivent à répondre à la question « *combien y avait-il de ?* » sans comprendre le principe du comptage. Ils ont aussi démontré que cette tâche pouvait surestimer la connaissance du principe cardinal chez les enfants. Dans l'étude de Litkowski et al. (2020), à l'âge de 5 ans, 86,5% des enfants pouvaient répondre avec succès à la question « *combien y avait-il d'éléments ?* » dans un ensemble de 16 éléments, mais seulement 32,8% des enfants pouvaient « *donner 16 éléments* » lorsqu'on leur demandait.

2.2.3.4. *Le subitizing et l'estimation*

Le subitizing est un traitement particulier qui permet de dénommer rapidement et précisément de petites numérosités. Le subitizing est défini comme un processus cognitif qui permet de porter un jugement numérique rapide, sûr et précis sur de petits ensembles numériques sans avoir besoin de compter (Kaufman et al., 1949). Certains auteurs pensent que le subitizing ne serait qu'une forme de dénombrement très rapide (Gallistel & Gelman, 1992), tandis que d'autres pensent qu'il s'agirait d'une estimation précise (Dehaene & Changeux, 1993). Cependant, il existerait bien deux traitements différents : le subitizing pour les petites quantités et l'estimation pour les grandes quantités. Le subitizing est un processus rapide et automatique, qui est remplacé par le comptage lorsque la quantité est supérieure ou égale à quatre. Cette limitation à trois ou quatre éléments s'expliquerait par les capacités de notre système attentionnel. L'étude de Burr et al. (2010) a montré que pour le traitement des petites numérosités, lorsque le système attentionnel visuel était disponible alors le subitizing était utilisé et exact. Tandis que si l'attention visuelle était occupée par une autre tâche, alors le traitement devenait inexact car l'estimation était utilisée à la place du subitizing. Pour les grandes numérosités, l'estimation peut être utilisée pour différencier rapidement deux quantités. Plusieurs études ont montré que le subitizing se développait entre trois et cinq ans (Le Corre & Carey, 2007; Starkey & Cooper, 1995). Dans leur étude, Starkey et Cooper (1995) ont observé

que, chez des enfants de deux à cinq ans, le subitizing était une compétence distincte du comptage verbal. Ainsi, lorsque l'on présente des ensembles de points à de jeunes enfants de quatre ans, pendant une durée de 200 ms, ils peuvent nommer les quantités d'un à trois facilement, mais pas la quantité quatre. En revanche, des enfants de cinq ans arrivent plus facilement à nommer la quantité quatre (Starkey & Cooper, 1995). Le subitizing semble être nécessaire pour le développement du sens des premiers mots des nombres, car il permet à l'enfant de saisir la totalité et les différents éléments d'une quantité en même temps (Benoit et al., 2004). En utilisant le subitizing, l'enfant peut faire des liens entre de petites quantités et le mot de nombre correspondant (Le Corre et al., 2006; Wynn, 1992b).

L'estimation permet une évaluation approximative de la quantité d'éléments d'un ensemble. L'estimation permet alors à l'enfant de distinguer des collections à condition que celles-ci diffèrent entre elles par un rapport numérique suffisant. Ces compétences se développent avec l'âge (Halberda & Feigenson, 2008) et seraient un prédicteur de la performance en calcul dans les classes supérieures (Mazzocco et al., 2011). Cependant, les capacités d'estimation varient d'une personne à l'autre.

2.2.3.5. Les correspondances chiffre/quantité

Afin de développer une meilleure compréhension du concept de nombre, l'enfant doit être capable de faire des liens entre les chiffres arabes et leurs quantités respectives (Purpura & Napoli, 2015). De nombreuses études suggèrent ainsi que les liens entre les chiffres écrits et les quantités exactes sont centraux dans le développement des compétences en numératie émergente (Jiménez Lira et al., 2017; Krajewski & Schneider, 2009b; Zhang et al., 2014). Benoit et al. (2013) se sont intéressés aux correspondances entre quantités, mots de nombres et chiffres écrits chez des enfants de trois à cinq ans, aussi bien pour des petites quantités (un à trois) que pour des quantités plus grandes (quatre, cinq et six). Les auteurs ont ainsi montré que les enfants apprennent d'abord à faire correspondre les mots de nombres aux quantités, puis à faire correspondre les chiffres écrits aux quantités et enfin à faire correspondre les mots de nombres aux chiffres écrits. Les tâches de correspondances chiffre/quantité sont souvent présentées avec un chiffre en haut de la page ou de l'écran et plusieurs séries d'éléments en bas. L'enfant doit alors sélectionner la série d'éléments correspondant au chiffre présenté. Inversement, pour cette tâche, une série d'éléments peut être présentée en haut et plusieurs chiffres en bas : l'enfant doit alors sélectionner le chiffre correspondant à la quantité représentée.

2.2.3.6. *Les problèmes à histoire*

Certaines tâches mathématiques, comme le raisonnement arithmétique ou les calculs simples, sont souvent formulées sous la forme de problèmes à histoire (Purpura et al., 2011). Les problèmes à histoire décrivent très brièvement une situation arithmétique sous la forme d'une petite histoire et sont généralement contextualisés dans de petits scénarios facilement compréhensibles par les enfants. Cependant, les performances des jeunes enfants à ces épreuves dépendent fortement de leur niveau de compréhension verbale et de la complexité des situations présentées (Fayol, 1991).

L'étude de Litkowski et al. (2020) a montré qu'à l'âge de trois ans, 40,4% des enfants étaient capables de répondre correctement au problème $0 + 2$ et seulement 5,8% au problème $2 + 2$. Progressivement, la proportion des élèves réussissant ces problèmes additifs augmente. A quatre ans, 47% des élèves répondent correctement au problème $0 + 2$ et 19,1% au problème $2 + 2$. Enfin, à l'âge de cinq ans, 64,7% des élèves réussissent le problème $0 + 2$ et 33,7% des élèves réussissent le problème additif $2 + 2$. Des résultats semblables ont été observés pour les problèmes à histoire soustractifs. Levine et al. (1992) ont également montré que des enfants de cinq ans étaient capables de résoudre des additions et des soustractions présentées sous la forme de problèmes à histoire. Ainsi, dès la période préscolaire, les enfants sont donc capables de résoudre des problèmes à histoire mais ils doivent tout d'abord comprendre et apprendre les mots de nombres et les symboles (Levine et al., 1992). Les épreuves de problèmes à histoire sont généralement considérées comme trop difficiles pour des élèves d'âge préscolaire. Cependant, certaines études ont montré que les problèmes à histoire représentent des compétences que les jeunes enfants développent plus tôt que l'on ne le pensait et ce même chez des enfants de trois ans (*e.g.* Fischer, 1981; Litkowski et al., 2020).

Conclusion

Ce second chapitre a été consacré à l'état des lieux des principales connaissances concernant la numératie émergente. Tout comme pour les compétences en littératie émergente, le jeune enfant développe très tôt des compétences mathématiques. Certaines études ont montré que dès les premiers mois de vie de l'enfant, celui-ci perçoit des changements de quantités et utilise des mots de nombre. Ces apprentissages se construisent par l'intermédiaire des interactions entre l'enfant et son environnement proche. Ces diverses compétences sont

regroupées sous le concept de numératie émergente. La numératie émergente renvoie entre autres aux compétences de connaissance des chiffres, de récitation de la chaîne numérique, de dénombrement ou encore de subitizing. Dans ce chapitre, nous avons abordé surtout le développement de chacune de ces compétences durant la période préscolaire et les différents modèles expliquant le développement des compétences en numératie émergente. Toutes les compétences en numératie émergente suivent des trajectoires développementales spécifiques. Dans la suite de cette thèse, nous aborderons l'évaluation et les liens entre les compétences en littératie et en numératie émergente.

Chapitre 3 : L'évaluation des compétences en littératie et numératie émergentes chez des élèves de maternelle

L'utilisation des tablettes tactiles et des applications éducatives pour supporter les apprentissages des élèves en classe est devenu une pratique courante (Neumann & Neumann, 2017; Northrop & Killeen, 2013). Cependant, les applications sur tablettes tactiles pour évaluer les apprentissages des élèves sont moins courantes (Carson et al., 2015; Carson, 2017). Peu de recherches ont questionné l'utilisation des tablettes pour évaluer les apprentissages, malgré les avantages que cette technologie peut présenter. Les tablettes peuvent administrer des questions et collecter des réponses par le biais de multiples modalités, standardiser la passation, calculer automatiquement des scores, supprimer des coûts et inconvénients liés à l'utilisation du papier ou encore offrir la possibilité de donner des feedbacks immédiatement aux enfants (Carson et al., 2011). De plus, l'interface intuitive de la tablette et sa mobilité permettent d'étendre son utilisation auprès de jeunes enfants qui ont plus de difficultés à utiliser un clavier et une souris d'ordinateur (Neumann, 2014; Neumann & Neumann, 2014).

3.1.L'évaluation des élèves de maternelle

De nombreux pays considèrent l'évaluation comme étant une composante importante de l'éducation préscolaire. L'évaluation permet alors de collecter des informations sur les connaissances des élèves et à terme d'éclairer la conception et la mise en œuvre des programmes scolaires. Les méthodes d'évaluation traditionnelles des compétences en littératie et en numératie émergente des enfants d'âge préscolaire impliquent souvent l'observation en classe des enfants par l'enseignant. Ces évaluations informelles peuvent être utiles pour les enseignants mais ne sont pas standardisées et ne permettent donc pas de comparer les compétences des élèves par rapport à une norme. Les mesures standardisées permettent quant à elles de comparer les élèves entre eux ou de suivre l'évolution d'un même élève. Ces évaluations ont des critères d'administration et de notation clairs et cohérents et sont généralement fiables et valides. La mesure est alors la même pour chaque enfant évalué et les scores sont convertis pour refléter les performances de l'enfant vis-à-vis de son groupe normatif.

Epstein et al. (2004) ont recensé plusieurs objectifs liés à l'utilisation d'évaluations auprès des enfants d'âge préscolaire. Tout d'abord, l'évaluation peut avoir pour objectif d'identifier

les enfants ayant besoin d'un accompagnement ou d'une intervention spécifique. L'utilisation d'outils d'évaluation auprès d'élèves d'âge préscolaire fournit de surcroît des informations sur les possibles retards et difficultés éprouvés par l'enfant dans les différents domaines de la littératie et de la numératie émergentes. Par ailleurs, les données de l'évaluation peuvent aussi être utilisées par les enseignants pour soutenir les apprentissages de chaque enfant et pour planifier des activités pédagogiques pour l'ensemble de la classe. L'évaluation fournit aux enseignants des informations sur les connaissances en numératie et en littératie de leurs élèves et peut permettre d'identifier la trajectoire d'apprentissage des élèves dans les différentes compétences (Clements & Sarama, 2014). Ces données peuvent également être partagées avec les parents pour leur permettre de comprendre les compétences que leurs enfants développent à l'école maternelle.

L'évaluation peut aussi être utilisée afin de fournir des données sur les programmes d'intervention déployés dans les classes et ainsi orienter les politiques éducatives du pays (Epstein et al., 2004). L'évaluation peut également permettre de mesurer l'effet d'une intervention spécifique dans une classe. Dans ce cas particulier, l'évaluation ne s'intéresse pas directement aux compétences des élèves mais se focalise plutôt sur l'apport du programme mis en place.

3.2. Les outils d'évaluation existants

De nombreux outils d'évaluation existent pour évaluer les compétences en littératie et en numératie émergentes. L'évaluation de ces compétences peut être réalisée grâce à deux types d'épreuves : les épreuves « expressives » et les épreuves « réceptives ». Les épreuves « expressives » nécessitent que les enfants répondent oralement aux questions qui leur sont posées (par exemple : quel est le nom de cette lettre ?). Tandis que les épreuves « réceptives » demandent à l'enfant de sélectionner la réponse qui est demandée, parmi plusieurs choix possibles (par exemple : l'enfant doit pointer la lettre ou l'objet qui est demandé). Les épreuves « réceptives » sont plus faciles à développer et peuvent être plus fiables en format numérique car elles ne nécessitent pas d'attribuer un score au langage de l'enfant ou à ses vocalisations (Neumann & Neumann, 2019). Dans leur étude, Carson et al. (2011) ont également montré que, dans le cadre d'un test de connaissance des lettres, l'évaluation sur ordinateur nécessitait 20% de temps en moins à administrer et montrait des scores comparables au test papier-crayon. De plus en plus d'outils, initialement développés en format papier-crayon, ont désormais une

version numérisée. De rares outils évaluent conjointement les compétences numériques et les compétences langagières des jeunes enfants. C'est le cas par exemple du *Woodcock–Johnson III Tests of Achievement [WJ-AP]* (Woodcock et al., 2001). Cet outil peut être utilisé avec des élèves de grande section de maternelle et dispose de 22 subtests mesurant l'identification de lettres, la conscience phonémique, la compréhension orale, le vocabulaire ou encore les compétences de calcul. Dans la suite de ce chapitre, quelques outils seront présentés plus en détails. Dans la perspective de notre recherche, nous ne nous intéresserons qu'aux tests élaborés pour des élèves d'âge préscolaire.

3.2.1. Les outils d'évaluation de la littératie émergente

La plupart des outils d'évaluation de la littératie émergente ont été élaborés en langue anglaise. Certains outils tendent à mesurer les principales dimensions de la littératie émergente (connaissance des lettres, conscience phonologique et langage oral) tandis que d'autres se spécialisent sur un domaine spécifique. Dans son article Carson (2017) a recensé la plupart des outils d'évaluation des compétences en littératie émergente utilisés auprès d'élèves d'âge préscolaire en langue anglaise. Sur les 26 outils d'évaluation repérés par Carson (2017), un seul utilise une interface sur tablette tactile : le *Profile of Phonological Awareness [PRO-PA]* (Coyle, 2012). Le PRO-PA mesure uniquement la conscience phonologique en allant des unités phonologiques les plus grandes, comme les mots et les syllabes, jusqu'aux unités phonologiques plus petites, telles que les phonèmes. Cet outil se décompose en six sections : (1) identification et production de rimes ; (2) segmentation de syllabes et de phonèmes ; (3) isolation de phonèmes (initial, final et intermédiaire) ; (4) segmentation de mots, syllabes et phonèmes ; (5) suppression de la syllabe ou du phonème initial ; et (6) inversion de sons. Cependant, cet outil n'administre pas le test lui-même mais donne des instructions à l'administrateur pour que celui-ci pose les questions et entre manuellement les réponses dans l'application.

Le *Test of Preschool Early Literacy [TOPEL]* (Lonigan et al., 2007) est l'un des principaux tests utilisés en langue anglaise pour mesurer les compétences en littératie émergente. C'est un instrument conçu pour identifier les enfants d'âge préscolaire en risque de développer des problèmes d'alphabétisation. Le TOPEL peut être utilisé dans le cadre de l'identification des connaissances des élèves, dans le cadre du suivi des progrès des élèves ou dans le cadre de la recherche. Cet outil se compose de trois subtests distincts : un premier

mesurant les connaissances liées à l'écrit (connaissance du nom et du son des lettres, identification de mots et de sons), un second le vocabulaire en émission et en réception et un dernier la conscience phonologique (suppression de sons, combinaison de sons pour former un mot). Un outil d'évaluation plus récent a été développé par Kaminski et al. (2014) : le *Preschool Early Literacy Indicators [PELI-PreK]*. Il s'agit d'une évaluation des compétences en littératie émergente intégrée dans un livre de littérature jeunesse. L'évaluation est conçue pour identifier les enfants âgés de trois à cinq ans, qui éprouvent des difficultés dans l'acquisition des compétences nécessaires au développement de la lecture. Le PELI-PreK mesure la connaissance de l'alphabet, le vocabulaire, le langage oral, la conscience phonologique et la compréhension orale. L'outil d'évaluation *Assessment of Literacy and Language [ALL]* (Lombardino et al., 2005) est un test utilisé auprès d'enfants de moyenne et de grande section de maternelle et de CP. Il mesure la connaissance des lettres, la conscience phonologique (e.g. rimes, suppression de syllabe) et phonémique, le vocabulaire réceptif ou encore la compréhension orale. Enfin, afin de suivre l'évolution des compétences en littératie de la grande section de maternelle jusqu'à la quatrième, le *Dynamic Indicators of Basic Early Literacy Skills [DIBELS]* (Good & Kaminski, 2002) est régulièrement utilisé. Le DIBELS est un outil d'évaluation mesurant principalement la conscience phonologique, le vocabulaire et la compréhension. Le DIBELS permet de comparer les résultats des élèves et suivre l'évolution de leurs compétences de la grande section de maternelle (*kindergarten*) jusqu'à la quatrième (*grade 8*). Ces outils d'évaluation permettent ainsi de mesurer les différentes composantes de la littératie émergente. À notre connaissance, aucun outil en langue française ne permet de mesurer toutes les compétences en littératie émergente.

Une multitude d'outils vise à mesurer les compétences langagières des enfants d'âge préscolaire. Par exemple, l'outil d'évaluation *Clinical Evaluation of Language Fundamentals [CELF-P :2]* (Wiig et al., 2004) est un test utilisé auprès d'enfants d'âge préscolaire, de trois à six ans. Il mesure la structure des phrases et des mots, le vocabulaire expressif, la répétition de phrases ou encore les classes de mots. Une version française de cet outil a été développée. De même, l'outil d'évaluation *Reynell Developmental Language Scale—4th Edition [NRDLS]* (Edwards et al., 2011) mesure aussi bien la compréhension que la production de langage oral. Il est utilisé auprès d'enfants de trois à sept ans. Le *Test of Early Language Development [TELD-3]* (Hresko et al., 1999) mesure également le langage oral chez les enfants de trois à sept ans. D'autres outils ne mesurent que le vocabulaire comme le *Peabody Picture Vocabulary Test – Fourth Edition [PPVT-4]* (Dunn & Dunn, 2007). C'est un test administré

individuellement, utilisé pour mesurer le vocabulaire réceptif. Cet outil peut aussi être utilisé pour estimer le développement verbal de l'enfant. Les items sont présentés sous la forme d'images : quatre images sont présentées simultanément. L'examineur prononce un mot et l'enfant doit sélectionner l'image qui représente le mieux le mot. Enfin, les concepts de BOEHM-3 Maternelle (Boehm, 2009) sont utilisés pour mesurer la compréhension de concepts de base auprès d'enfants âgés de trois à six ans. Les concepts évalués sont des concepts de relation, qualité, espace, temps et quantité, qui sont importants pour le développement du langage et de la cognition. Chaque concept est évalué par l'intermédiaire de deux contextes différents. Par exemple, le concept « court » sera évalué par l'intermédiaire de deux items : (1) montre-moi l'autobus le plus court et (2) montre-moi la bouteille la plus courte. Enfin, le *Test of Early Reading Ability, 3rd Edition [TERA-3]* (Reid et al., 2001) mesure les compétences de lecture des enfants âgés de trois ans et demi à huit ans et demi. Les items évaluent la connaissance de l'alphabet, les conventions de l'écrit et le sens porté par l'écrit. Le subtest « connaissance de l'alphabet » comprend vingt-neuf items et mesure la connaissance de l'alphabet et de la conscience phonologique. Le subtest « convention de l'écrit » comprend vingt et un items et mesure les connaissances de l'élève sur des aspects arbitraires de l'écrit (par exemple, le sens de lecture). Enfin, le subtest « sens porté à l'écrit » correspond à l'environnement écrit de l'enfant et inclut la compréhension de la signification des signes, logos et mots dans des contextes figuratifs et situationnels.

De nombreux outils mesurent la conscience phonologique par l'intermédiaire d'un ou de plusieurs subtests. D'autres outils ont été développés uniquement dans l'objectif de fournir une évaluation complète des compétences phonologiques de l'enfant. C'est le cas par exemple du *Phonological Awareness Literacy Screening - PreKindergarten [PALS-PreK]* (Invernizzi et al., 2004), un outil de dépistage, de diagnostic et de suivi des progrès, qui se focalise sur les compétences de conscience phonologique et sur la connaissance des lettres des enfants de quatre à cinq ans. Il est composé de six tâches distinctes mesurant l'écriture du prénom de l'enfant, la connaissance de l'alphabet, l'identification du phonème initial d'un mot, la reconnaissance des composants de l'écrit, l'identification de rimes et la production de rimes.

Comme mentionné ci-dessus, aucun outil en langue française ne permet de mesurer l'ensemble des compétences en littératie émergente chez des élèves d'âge préscolaire. Cependant, plusieurs outils standardisés évaluent les compétences langagières du jeune enfant. C'est le cas de l'ELO - Evaluation du Langage Oral, développé par Khomsi (2001). Cet outil a été conçu spécifiquement pour repérer et analyser les troubles du développement du langage.

Cet outil permet d'évaluer le vocabulaire en réception et en production, la compréhension orale, la phonologie et la production linguistique des enfants de la petite section de maternelle jusqu'au CM2. Enfin, d'autres épreuves mesurent également la compréhension du langage oral comme par exemple l'ECOSSE (Lecocq, 1998) qui est une épreuve de compréhension syntaxico-sémantique permettant d'évaluer la compréhension des enfants de quatre à onze ans.

Enfin, les chercheurs utilisent de brèves mesures spécialement conçues pour la recherche afin de mesurer les compétences en littératie émergente. Par exemple, Gabriel et Poncelet (2009) ont développé une batterie de tests évaluant le niveau de conscience phonologique des enfants. Cette batterie mêle des épreuves de reconnaissance rimique et syllabique, d'identification syllabique, d'inversion et de fusion syllabique ou encore d'identification ou de suppression phonémique. De même, dans le cadre de leur recherche, Bara et al. (2008) ont utilisé conjointement des épreuves standardisées et de brèves mesures de conscience phonologique, de connaissance des lettres et de lecture de pseudo-mots développées pour les besoins de la recherche.

3.2.2. Les outils d'évaluation de la numératie émergente

La plupart des outils d'évaluation fournissent généralement un score global en numératie émergente, destiné à refléter les compétences générales des enfants en mathématiques. Ces outils peuvent aussi identifier le niveau de développement d'un enfant par rapport à ses pairs du même âge ou de la même classe. Ces tests sont essentiels pour mesurer les effets des programmes scolaires ou des programmes d'intervention. Ils permettent aussi d'identifier les compétences dans lesquelles les enfants ont le plus de difficultés. Bien que ces tests soient composés d'items qui mesurent un large éventail de compétences et de concepts mathématiques, ils ne sont pas conçus pour mesurer individuellement chacune de ces compétences et chacun de ces concepts. Par exemple, le *Test of Early Mathematics Ability-Third Edition [TEMA-3]* (Ginsburg & Baroody, 2003) comporte des items qui mesurent la plupart des compétences en numératie émergente comme la correspondance terme-à-terme, les problèmes à histoire ou encore le principe cardinal. Cependant, cet outil ne mesure que globalement les compétences en numératie émergente des élèves. Les auteurs précisent de surcroît que les différentes sous-échelles ne peuvent pas être utilisées indépendamment des autres car elles ne sont pas validées dans ce sens (Ginsburg & Baroody, 2003). De même, le *Tools for Early Assessment in Mathematics [TEAM]* (Sarama et al., 2011) est une évaluation

diagnostique qui mesure la plupart des compétences en numératie émergente. Cet outil, à destination des enseignants et des chercheurs, permet d'identifier la trajectoire d'apprentissage en numératie émergente des élèves. Plus précisément, cet outil mesure la récitation de la chaîne numérique verbale, la correspondance terme-à-terme, la cardinalité, le dénombrement d'ensembles et de sous-ensembles, le subitizing, la comparaison de chiffres et de quantités, l'ordre des nombres ou encore les correspondances quantités-chiffres. Enfin, le *Child Math Assessment [CMA]* (Klein & Starkey, 2006) comporte sept tâches différentes : (1) le dénombrement d'objets, (2) le dénombrement de sous-ensembles, (3) l'ordre des nombres, (4) la comparaison de nombres, (5) le principe ordinal, (6) la reproduction d'ensembles et (7) les additions et soustractions avec objets. Cet outil ne mesure pas l'ensemble des compétences en numératie émergente mais se centre plus particulièrement sur le comptage.

Les trois outils d'évaluation que nous venons de présenter mesurent les différentes compétences en numératie émergente avec un ou plusieurs items, mais ne disposent pas d'un subtest spécifique pour chaque compétence. Tandis que le *Preschool Early Numeracy Skills [PENS]* (Purpura & Lonigan, 2015) mesure douze compétences en numératie émergente à l'aide de subtests distincts. Cet outil couvre les différents précurseurs développementaux des compétences mathématiques que les enfants sont censés développer durant la période préscolaire. Les douze subtests du PENS évaluent : la correspondance terme-à-terme, la cardinalité, le dénombrement d'un sous-ensemble, le subitizing, la comparaison de nombres, la comparaison de quantités, l'ordre des nombres, les correspondances quantités-chiffres, les problèmes à histoire, les additions et soustractions simples et la récitation de la chaîne numérique verbale. Ces mesures sont faciles à utiliser et peuvent permettre de mesurer les effets d'une intervention ou les progrès des élèves sur les différentes compétences en numératie émergente.

Plusieurs équipes de recherche ont développé des outils ciblés évaluant différentes compétences en numératie émergente. Ces outils se présentent alors sous la forme de brèves mesures et peuvent être utilisés aussi bien en classe que pour la recherche (Lei et al., 2009; Polignano & Hojnoski, 2012; Reid et al., 2006; Vanderheyden et al., 2004). Cependant, ces mesures sont limitées en termes de compétences évaluées et ne permettent pas d'obtenir une vision globale des compétences en numératie émergente de l'enfant. Par exemple, les épreuves développées par Vanderheyden et al. (2004) n'évaluent que le dénombrement, la récitation de la chaîne numérique verbale et la reconnaissance des chiffres. Les épreuves de Lei et al. (2009) et de Reid et al. (2006) mesurent également le dénombrement, la récitation de la chaîne

numérique verbale et la reconnaissance des chiffres ainsi que le subitizing. Enfin, Polignano & Hojnoski (2012) se sont principalement concentrés sur la géométrie, les formes et les séries, mais mesurent également le principe cardinal.

Certains outils ont été développés en langue française comme par exemple le *Test diagnostique des compétences de base en mathématique [TEDI-Maths]* (Van Nieuwenhoven et al., 2001). Le TEDI-Maths permet de faire un bilan des premiers apprentissages numériques de la moyenne section de maternelle jusqu'au CE2. Cet outil évalue la maîtrise de la chaîne numérique verbale, le dénombrement, la connaissance des chiffres, les problèmes à histoire ou encore l'estimation de quantités.

3.3.L'élaboration d'un outil d'évaluation papier-crayon

Dans le cadre du projet LINUMEN, nous nous sommes lancés dans l'élaboration d'un outil d'évaluation des compétences en littératie et en numératie émergentes chez des élèves de moyenne et de grande section de maternelle (voir figure 8). La première phase de co-conception de l'outil d'évaluation a débuté en janvier 2017 et s'est terminée en mars-avril 2017. Après un état de l'art et un examen préalable des différents outils d'évaluation existants, nous avons sélectionné les compétences en littératie et en numératie émergentes à évaluer en lien avec les programmes de l'école maternelle (Ministère de l'Éducation nationale, 2015). Pour cela, nous nous sommes inspirés de divers tests préexistants comme l'ELO (Khomsi, 2001), le TOPEL (Lonigan et al., 2007), le DIBELS (Good & Kaminski, 2002), le TEDI-Maths (Van Nieuwenhoven et al., 2001), le TEMA-3 (H. P. Ginsburg & Baroody, 2003) ou encore le PENS (Purpura & Lonigan, 2015). Cette première étape s'est déroulée avec une équipe pluridisciplinaire (chercheurs en psychologie et en sciences de l'éducation, inspectrice de l'éducation nationale, conseillers pédagogiques et enseignants), ce qui a permis de coconstruire les différentes épreuves. Cette phase de co-conception de l'outil d'évaluation avait pour objectif de cibler au mieux les diverses compétences en littératie et en numératie émergentes développées à l'école maternelle. L'élaboration des outils d'évaluation est généralement réalisée par des chercheurs en psychologie ou en éducation. La spécificité de notre outil est de combiner le travail de chercheurs et des acteurs éducatifs. Ainsi, les acteurs éducatifs ont apporté leur expertise concernant la formulation des consignes, qui devaient être adaptées à des enfants de quatre à six ans. De plus, ils ont aussi guidé la construction des épreuves de

conscience phonologique. Enfin, ils sont les garants des compétences travaillées à l'école maternelle.

Pour construire et valider cet outil d'évaluation, nous avons tout d'abord observé les qualités psychométriques de chaque subtest. Cet outil a été initialement testé auprès d'enfants scolarisés en petite, moyenne et grande section de maternelle afin d'observer la difficulté des items pour chaque tranche d'âge. Ainsi, toutes les épreuves ont été pré-testées en mai-juin 2017 dans quatre écoles partenaires auprès de 313 élèves appartenant à 19 classes de petite, moyenne et grande section de maternelle. À la suite de ce premier recueil de données, les qualités psychométriques de chacune des épreuves ont été vérifiées. Certaines épreuves ont été remaniées car leurs qualités psychométriques n'étaient pas assez satisfaisantes. De plus, certaines épreuves ont été supprimées et de nouvelles épreuves et de nouveaux items ont été ajoutés.

Une seconde version de l'outil d'évaluation a été élaborée entre septembre 2017 et février 2018. Ainsi, la plupart des épreuves ont été repensées et améliorées afin d'obtenir une nouvelle version de l'outil. Cette version comprenait 14 épreuves en littératie émergente et 11 épreuves en numératie émergente. Les différents subtests de littératie émergente mesuraient :

Connaissance des lettres	(1) La reconnaissance de lettres isolées (2) La dénomination orale des lettres (3) La prononciation du son des lettres
Vocabulaire	(4) Le vocabulaire « mots courants » (5) La dénomination des parties du corps (6) La fluence verbale sémantique
Conscience phonologique	(7) La suppression de la syllabe de la fin du mot (8) La suppression de la syllabe du début du mot (9) L'inversion des syllabes d'un mot (10) La reconnaissance et la discrimination d'une syllabe dans un mot (11) L'identification de rimes
Compréhension	(12) La compréhension de consignes simples (13) La compréhension de textes courts (14) La compréhension d'inférences.

De même, les différents subtests en numératie émergente évaluaient :

- (1) La reconnaissance de chiffres et nombres
- (2) La dénomination orale des chiffres
- (3) La récitation de la chaîne numérique verbale
- (4) Le dénombrement d'une collection
- (5) Le principe cardinal
- (6) L'estimation comparative
- (7) Le subitizing
- (8) Les correspondances collection/nombre et nombre/collection
- (9) Les problèmes à histoire

Toutes ces différentes épreuves ont été testées en février-mars 2018 auprès de 167 élèves de moyenne et de grande section provenant de trois différentes écoles maternelles. Après avoir recueilli toutes les données, les qualités psychométriques de chaque épreuve et de chaque item ont été évaluées. En s'appuyant sur les moyennes et les écarts-types de chaque item, ceux-ci ont été ordonnés en fonction de leur degré de difficulté afin de constituer deux entrées différentes pour chaque subtest : une entrée pour les élèves de moyenne section et une entrée pour les élèves de grande section. La consistance interne de chaque épreuve a été mesurée par un Alpha de Cronbach. Celle-ci permet d'indiquer si les différents items d'une épreuve mesurent bien la même dimension. Les Alpha de Cronbach des épreuves se situaient entre .62 et .91 (pour plus de précisions, voir les articles 1 et 2). La plupart des épreuves avaient des Alpha de Cronbach se situant aux alentours de .80, ce qui montre globalement que les épreuves sont bien homogènes. De même, l'ordre des épreuves a aussi été évalué : plusieurs ordonnancements ont ainsi été utilisés avec les élèves. Aucune différence significative n'a été observée concernant l'ordre des subtests. Enfin, le temps de passation moyen était d'environ 32 minutes pour les épreuves de littératie et de 31 minutes pour les épreuves de numératie. Cette seconde phase de pré-test a ainsi conduit à l'implémentation des épreuves sur tablette tactile. Certaines épreuves ont été supprimées car elles ne discriminaient pas assez les élèves ou pouvaient être difficilement implémentées sur tablette.

Notre outil d'évaluation peut se décomposer en deux échelles distinctes : la première mesurant les compétences en littératie émergente et la seconde évaluant les compétences en numératie émergente de l'enfant. Les articles 1 et 2 présentent plus en détail leur développement ainsi que leur validation.

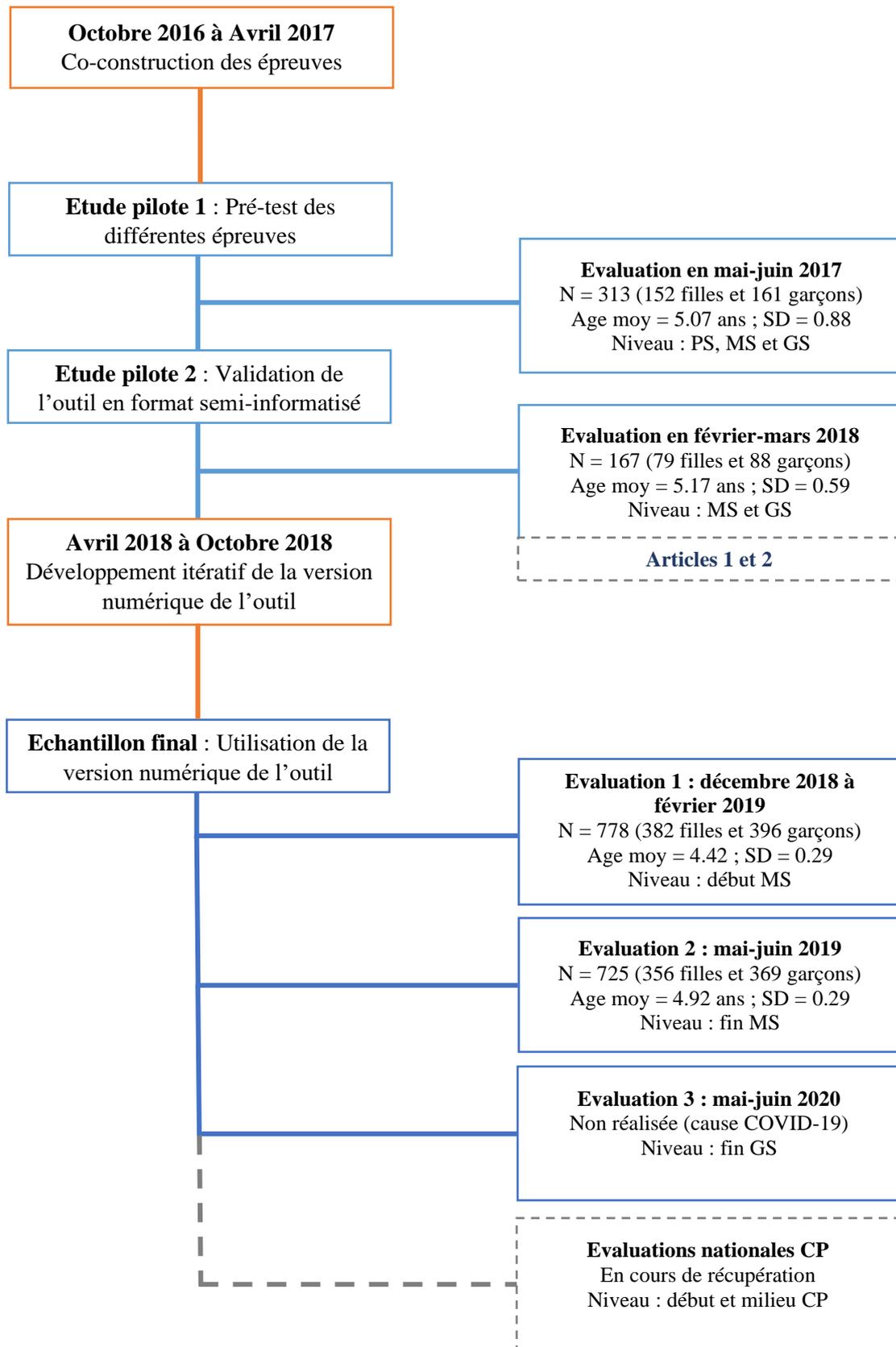


Figure 8. Processus de développement de l'application LINUMEN Evaluation

Article 1: Development of a French-language early literacy scale: Structural analysis and links between the dimensions of early literacy.

Résumé en français :

Comme nous l'avons vu précédemment, de nombreux tests et outils existent pour évaluer les compétences en littératie émergente des enfants d'âge préscolaire (*e.g.* Invernizzi et al., 2004; Jacquier-Roux et al., 2010; Lonigan et al., 2007). Après un examen approfondi de la littérature existante, nous avons constaté que la majorité des outils préexistants étaient conçus et testés auprès d'échantillons anglo-saxons. Dans cet article, nous avons souhaité d'une part, développer et valider un outil d'évaluation de la littératie émergente en langue française et d'autre part, d'examiner les liens entre les différentes compétences en littératie émergente et les caractéristiques de l'enfant (âge, sexe, statut socio-économique). Les données de la littérature mettent généralement en exergue trois composantes principales de la littératie émergente : la connaissance de l'alphabet et de l'écrit, la conscience phonologique et le langage oral. En ce qui concerne notre étude, nous avons fait le choix de travailler sur quatre composantes de la littératie émergente en divisant le langage oral en deux composantes distinctes : le vocabulaire et la compréhension. La batterie élaborée dans le cadre de cet article évalue donc de nombreuses compétences en littératie émergente renvoyant à ces trois composantes.

Pour cela, 167 enfants scolarisés en moyenne et grande section dans plusieurs écoles maternelles françaises ont été évalués en début d'année 2018. Par l'intermédiaire de questionnaires distribués aux parents, le statut socio-économique de la famille a été opérationnalisé. L'évaluation des enfants consistait en la passation de quatorze différents subtests présentés dans une version semi-informatisée de l'outil. La passation des différentes épreuves était individuelle et nécessitait la présence d'un évaluateur formé à l'utilisation de l'outil. L'enfant était invité soit à donner une réponse verbale aux stimuli qui lui étaient présentés sur un écran d'ordinateur, soit à montrer du doigt l'élément demandé ou encore à répondre verbalement à des items présentés sans aucun support visuel. La plupart des tâches s'inspirent d'outils préexistants.

Les qualités psychométriques de l'EPL (Echelle Préscolaire de Littératie Emergente) sont bonnes puisque les coefficients alpha des différentes épreuves dépassent tous le seuil de .70. Les épreuves ont donc une cohérence interne satisfaisante. L'analyse factorielle confirmatoire de l'EPL révèle quatre facteurs de premier ordre distincts (voir figure 9) : (1) la connaissance de l'alphabet, (2) le vocabulaire, (3) la conscience phonologique et (4) la

compréhension orale.

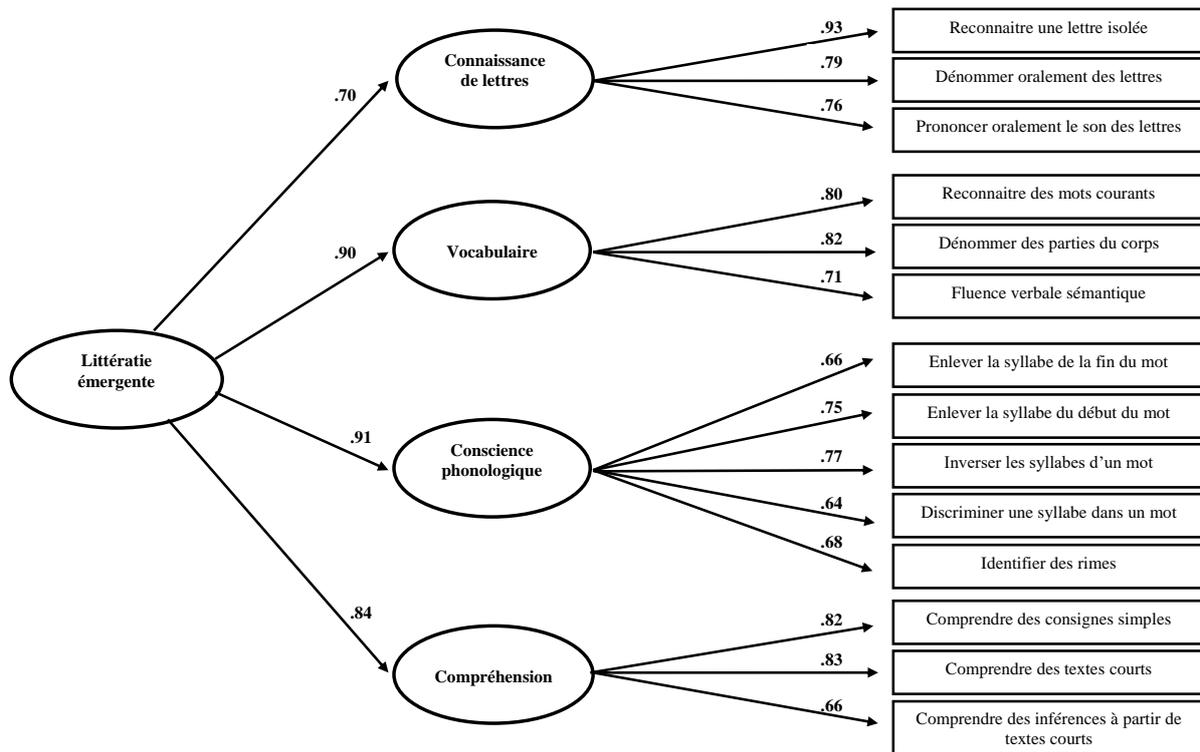


Figure 9. Analyse factorielle confirmatoire des épreuves en littératie émergente (N=167)

Nb. Les ovales représentent les variables latentes et les rectangles représentent les variables observées. Toutes les valeurs correspondent à des coefficients standardisés. Tous les facteurs sont significatifs à .001.

Afin de tester l'influence des caractéristiques de l'enfant sur l'acquisition des différentes dimensions en littératie émergente, nous avons également adopté une approche par modèle compétitif. Ainsi, plusieurs modèles ont été testés et comparés. Le modèle en pistes choisi explique l'acquisition de la conscience phonologique chez l'enfant (voir figure 10).

Ainsi, le statut socio-économique et l'âge de l'enfant influencent tous deux positivement et significativement la connaissance des lettres, le vocabulaire et la compréhension orale. Ces deux caractéristiques ont également un effet indirect sur la conscience phonologique : cet effet est médiatisé par les trois autres dimensions de la littératie émergente. Enfin, les filles de notre échantillon obtiennent de meilleurs scores en compréhension orale que les garçons. Le modèle avec la conscience phonologique comme variable dépendante ultime est le modèle le plus robuste statistiquement. Tout comme notre étude, d'autres articles ont démontré des liens existants entre les différentes compétences en littératie émergente (*e.g.* Goodrich & Lonigan,

2015; Koponen et al., 2007; Lerner & Lonigan, 2016). De plus, de nombreux auteurs postulent que les compétences langagières et la connaissance des lettres contribueraient au développement de la conscience phonologique (e.g. Cooper et al., 2002; Lerner & Lonigan, 2016) : ces résultats corroborent aussi notre modèle.

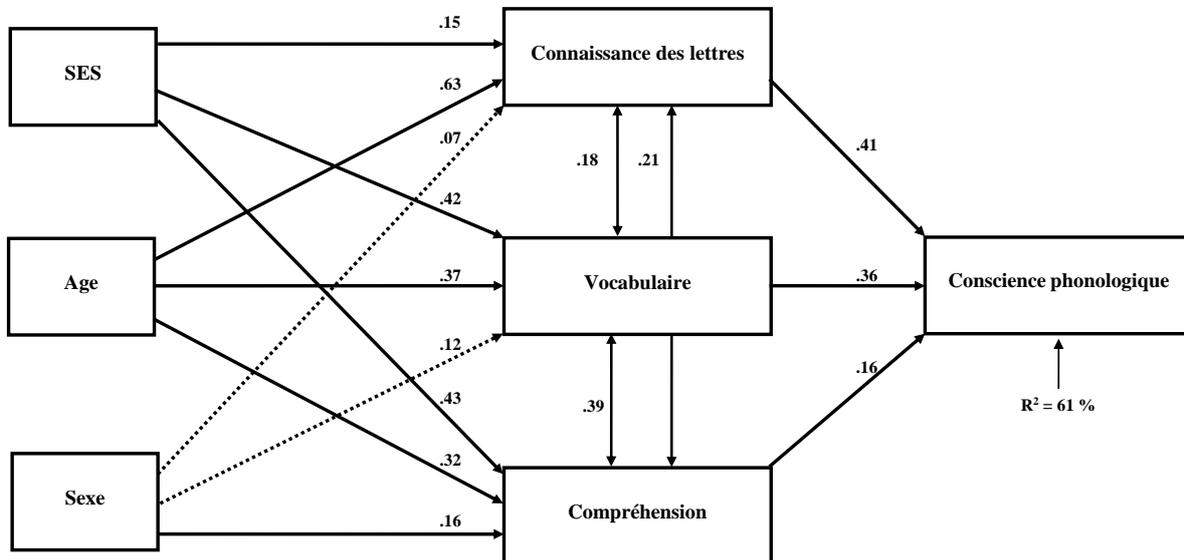


Figure 10. Modèle en pistes expliquant l'acquisition de la conscience phonologique

Nb. $\chi^2 = 5.79$ pour 3 degrés de liberté ; RMSEA (résidus) = .075 ; CFI = .99 ; NNFI = .96

Comme le soulignent Justice et al. (2002), les outils de dépistage précoce doivent répondre à trois critères importants : (a) donner des scores avec de bonnes qualités psychométriques, (b) mesurer des compétences spécifiques qui sont prédictives des résultats ultérieurs et (c) détecter les enfants à risque de difficultés. La validation de l'Échelle Préscolaire de Littératie Émergente permet donc de fournir un test en langue française mesurant la plupart des compétences en littératie émergente développées durant la période préscolaire. Toutes les compétences mesurées par l'EPLÉ sont prédictives des compétences ultérieures de l'enfant. À terme, cet outil pourra donc être utilisé afin de mieux appréhender les liens entre les différentes compétences en littératie émergente mais aussi pour identifier les compétences et les difficultés des enfants de quatre à six ans. De même, il pourra également être utilisé pour évaluer des interventions spécifiques, informer sur le rythme et le contenu de l'enseignement et guider en fonction des besoins de chaque élève.

Development of a French-language early literacy scale: Structural analysis and links between the dimensions of early literacy

Aude Thomas¹, Youssef Tazouti¹, Lara Hoareau¹, Christophe Luxembourger¹, Blandine Hubert¹, Jean-Paul Fischer¹ and Annette Jarlégan².

¹ Université de Lorraine, 2LPN

² Université de Lorraine, LISEC

Shorter title: French-language early literacy scale

En révision pour publication au *Journal of Research in Reading*

Keywords: kindergarten; early literacy; confirmatory factor analysis

Abstract:

Background: The development of early literacy skills in preschoolers is an important predictor of future academic performance. Four main domains of early literacy are currently observed: letter knowledge, vocabulary, phonological awareness, and oral comprehension. A multiplicity of tasks or tests measures these domains in English-language. However, there are currently no French-language tools for evaluating and monitoring the early literacy abilities of young children in Francophone contexts. This paper addresses this lack by presenting a new French-language scale—the Echelle Préscolaire de Littératie Emergente (EPLÉ)—for assessing the early literacy skills of preschoolers. **Methods:** In addition to examining the EPLÉ's psychometric properties, we used path analysis to determine possible links between different dimensions of early literacy and children's characteristics (sex, age, socioeconomic status). This study involves 167 French preschoolers (*Mean* = 5.17 years, *Standard Deviation* = 0.59) attending kindergarten. All the participants were tested individually, and a specific entry in the tasks were proposed depending on the age of the children. **Results:** First, the EPLÉ had good psychometric properties. Then, factor analysis of the data collected revealed a similar hierarchical factor structure as found as the literature. In addition, we found links between the four dimensions of early literacy measured by the EPLÉ and both children's age and socioeconomic status. **Conclusions:** The EPLÉ creates several new opportunities for early literacy research in French-speaking contexts. First, this tool reduces the gap in the field of testing young children skills. Then, it allows the comparison with worldwide researches. Moreover, this tool proposes pedagogical implications. In the next few years, the EPLÉ will be used by teachers or school psychologists to test the early competences of French children.

Abbreviations: EPLÉ = Echelle Préscolaire de Littératie Emergente ; EL = Early Literacy

Implications for Practice

What is already known about this topic

- Early literacy greatly impacts future academic success.
- Early literacy is a multidimensional concept that is influenced by numerous personal, family, and educational variables.
- Examining the factor structure underlying measures of early literacy skills is essential to obtaining a better understanding of the relations between these skills.

What this paper adds

- A new tool was constructed to assess the four major dimensions of early literacy in a French sample. The psychometrics properties of this French-language scale are examined.
- The relationships between the dimensions of early literacy and children's characteristics (e.g., sex, age, SES) are examined. These relations have rarely been investigated.
- Findings show links between phonological awareness, letters knowledge, vocabulary and oral comprehension.

Implications for theory, policy or practice

- Factor analysis of the data collected revealed a hierarchical factor structure a two-level.
- The children's early literacy measure is a potentially useful tool in identifying children at risk of literacy difficulties.
- The early literacy measure can be used to assess children's responses to an intervention, guide the pace and content of a teaching program, and ensure instruction is provided according to each student's needs.

Children begin acquiring early literacy (EL) knowledge and skills at a very young age, and this early learning greatly impacts future academic and professional success (Duncan et al., 2007; National Early Literacy Panel [NELP], 2008; Rabiner et al., 2016). EL is a multidimensional concept that is influenced by numerous personal, family, and educational variables (Carroll et al., 2019; Dulay et al., 2018; Niklas & Schneider, 2013; Niklas et al., 2015), whose interactions enable children to acquire the knowledge and skills needed for future learning. Children who have difficulties at the EL stage are highly likely to continue having difficulties later in their school careers (e.g., Hooper et al., 2010).

Although EL has been widely researched in France, studies have tended to focus on single aspects of EL, rather than on the concept in its globality (e.g., Bara et al., 2008). Moreover, there is no single French-language tool that simultaneously assesses all the different facets of EL. The present study was designed to remedy this situation by constructing and validating a new, French-language scale—the Echelle Préscolaire de Littératie Emergente (EPLÉ)—for evaluating preschoolers' EL skills. The data collected also allowed us to investigate possible links between the dimensions of EL and children's characteristics (sex, socioeconomic status, age).

The dimensions of EL

EL is the acquisition of the skills, knowledge, and attitudes that are the developmental precursors of conventional forms of reading and writing (Whitehurst & Lonigan, 1998). Thus, learning to write involves a continuum from acquiring EL skills to mastering reading and writing (Sulzby & Teale, 1991; Whitehurst & Lonigan, 1998).

In their meta-analysis, Lonigan and Shanahan (2009) stressed that a skill must meet two conditions before it can be considered a specifically EL skill: it must be acquired before conventional literacy skills are learned and it must predict future literacy skills.

When constructing and validating the EPLE, we decided to focus on four dimensions of EL: alphabet knowledge, phonological awareness, vocabulary, and oral comprehension. We did this for several reasons. First, these dimensions predict future skills (Catts et al., 2015; Duncan et al., 2007; Kendeou et al., 2009; Piquard-Kipffer & Sprenger-Charolles, 2013). Second, they are some of the most widely studied aspects of (Lonigan et al., 2008). Finally, skills relating to all four dimensions are described explicitly in the official curriculum France's kindergartens (*écoles maternelles*) are expected to follow (MEN, 2015).

Alphabet knowledge

Alphabet knowledge (e.g. letter name and letter sound) is one of the most powerful predictor of later reading (National Early Literacy Panel (NELP), 2008; Puranik et al., 2013). Results show letter naming fluency to be the most powerful predictor of word recognition (Negro & Genelot, 2009). Similarly, knowing the names and sounds of the letters is one of the most powerful predictors of future reading skills (Ecalte et al., 2008; Foulon, 2007; Muter et al., 2004; Puranik et al., 2013; Rabiner et al., 2016). Letter naming fluency is also predictive of future performance in reading comprehension (Schatschneider et al., 2004). Moreover, letter-name knowledge is essential to developing phonological awareness (Castles & Coltheart, 2004; Foulon, 2005), and children who know more letter names have better phonological abilities than other children (Biot-Chevrier et al., 2008). In the case of the sounds of letters, acquiring this knowledge may be linked to the prior learning of letter names (Share, 2004). Letter sound knowledge helps children to understand the alphabetic principle and is required to start

decoding words, as well as providing the basis for developing phonological awareness (Huang et al., 2014).

Phonological awareness

Phonological awareness is the ability to detect and manipulate the sound structure of oral language (Whitehurst & Lonigan, 2002). Young children's phonological awareness skills appear to be the best predictor of future reading performance (Lonigan et al., 2008) and have been shown to facilitate acquisition of the alphabetic principle. In addition, phonological awareness is the best predictor of future decoding abilities (Anthony et al., 2007) and is linked to word-reading and comprehension abilities (Lonigan et al., 2008).

Vocabulary

Vocabulary is a fundamental component of learning to read (National Reading Panel, 2000). Some studies have shown the importance of shared reading in developing vocabulary (Grøver et al., 2020; Sénéchal & LeFevre, 2014), whether productive vocabulary or receptive vocabulary (Mol et al., 2008). The National Early Literacy Panel (2008) also showed that shared reading promotes the acquisition of several components of oral language, especially vocabulary. Similarly, weak vocabulary skills have consequences for the development of reading in young children. Thus, four-year-old children with poorer vocabulary are more likely to develop reading problems (Scarborough, 1990). More generally, students with early difficulties in developing vocabulary and grammar skills are more likely to experience difficulties in learning to read and write (Whitehurst & Lonigan, 2002). In addition, oral language skills, including vocabulary, are important foundations for reading comprehension (Hjetland et al., 2020; Muter et al., 2004).

Oral comprehension

Kendeou et al. (2007) define comprehension as the interpretation of information contained within a text, the use of prior knowledge to interpret this information, and the construction of a coherent representation or mental image of the text by the reader. Three aspects of oral comprehension can be evaluated: sentence comprehension, literal comprehension, and inference-making comprehension (Kintsch & Kintsch, 2005; van den Broek, et al., 2005).

Oral language skills are essential precursors for developing word-reading and reading-comprehension skills as children progress from kindergarten to primary school (Lyster et al., 2020; Massonnié et al., 2019). Indeed, numerous studies have shown that oral comprehension during preschool has a large impact on reading comprehension (e.g., Kendeou et al., 2009). Similarly, training programs focusing on the skills needed to understand language have produced long-term gains in reading comprehension (Lyster et al., 2016).

In the case of inference-making comprehension, children from a very young age use this skill to interpret the events they experience (van den Broek et al., 2005). Inference-making has been shown to correlate with reading comprehension in children of school age (Cain et al., 2004).

Links between children's characteristics and EL skills

Children's EL skills are impacted by a number of personal and situational characteristics. First, some studies of preschoolers have shown differences between boys and girls. For example, Below et al., (2010) reported significantly higher scores on a variety of EL measures for girls than for boys of the same age. These differences tend to increase until first grade, so girls tend to start elementary school with better EL skills than boys.

Links have also been found between socioeconomic status (SES) and EL skills. Compared with children from more advantaged socioeconomic backgrounds, those from disadvantaged backgrounds have less extensive vocabulary (Hoff, 2003), have weaker phonological awareness skills (McDowell et al., 2007), know fewer letters and are less aware of writing concepts (Korat, 2005). Nevertheless, SES is a distal variable whose effect is mediated by other variables, most notably those relating to the home environment, which has been shown to play an important role in the development of EL (e.g., Mol & Bus, 2011; Sénéchal & LeFevre, 2002).

Finally, EL skills are strongly linked to a child's age. Huang and Invernizzi (2012) found that the EL skills of the oldest students in kindergarten classes were significantly stronger than those of their classmates who were a few months younger. These differences in EL skills remain statistically significant until the end of 2nd grade.

Early literacy learning among French children

EL skills will facilitate decoding, which is a central component of learning to read (Ziegler & Goswami 2005). Decoding consists of establishing grapheme-phoneme associations. Compared to English, which is irregular in reading and writing directions, French is regular only in the reading direction (Peereman et al., 2007). In fact, the same phoneme can often be written in different ways (e.g., /o/ as O, AU, EAU, OT, OP). Thus, the French language has an inconsistent spelling due to the complex phoneme-grapheme relationships, similarly to the English language (Moll et al., 2014). This degree of language consistency then strongly influences the ease and speed of learning to read (Ziegler, 2018).

To better prepare children for formal literacy learning, kindergarten is becoming compulsory for all children from the age of three from September 2019. Kindergarten is free

for all children enrolled in France's public-school system. Children aged three to six follow a national curriculum (MEN, 2015). The curriculum states that from the age of three, children begin to discover the alphabetical principle and to distinguish the sound units of the French language. Phonological awareness activities begin at age four and become more complex the following year. Lexical comprehension and enrichment activities are carried out throughout kindergarten through readings of children's literature.

Objectives of the present study

Numerous tests for measuring the EL skills of preschool children have been drawn up in English (see Table 1). Although many studies have examined individual dimensions of EL in French-speaking contexts, they have measured these different dimensions via a variety of tools, often specially created for the needs of a specific study. Consequently, there is no single, French-language tool in capacity to measure several aspects of EL and to monitor children's skills as they progress during the preschool years (4 and 5).

Table 1. *Literacy tasks assessed within existing measures of early literacy*

<i>Tasks</i>	<i>English based measures</i>						<i>French based measures</i>	
	<i>TOPEL</i>	<i>DIBELS</i>	<i>PELI-PreK</i>	<i>CELF-P</i>	<i>PRO-PA</i>	<i>ALL</i>	<i>ELO</i>	<i>BALE</i>
Recognizing letters	X					X		
Naming letters	X	X	X			X		
Pronouncing letters	X					X		X
Receptive vocabulary	X	X		X		X	X	X
Expressive vocabulary			X	X			X	
Fluency				X				
Deleting the final syllable of a word	X				X	X		
Deleting the first syllable of a word	X	X	X		X	X		
Inverting the syllables of a word					X			
Recognizing a syllable in a word		X			X			
Identifying rhymes					X	X		
Sentence comprehension		X		X			X	X
Literal comprehension			X			X		X
Inference-making comprehension								

Note. TOPEL = Test of Preschool Early Literacy (Lonigan et al., 2007); DIBELS = Dynamic Indicators of Basic Early Literacy Skills 6th Edition (Good & Kaminski, 2002); PELI-PreK = Preschool Early Literacy Indicators (Kaminski et al., 2014); CELF-P = Clinical Evaluation of Language Fundamentals (Wiig et al., 2004); Profile of Phonological Awareness (Coyle, 2012); Assessment of Literacy and Language (Lombardino et al., 2005); ELO = Evaluation du langage oral (Khomsy, 2001); BALE = Batterie Analytique du Langage Ecrit (Jacquier-Roux et al., 2010).

As Table 1 suggests, there are few French-language tests compared to English-language tests. In addition, these tests do not cover all our EL tasks. Thus, the present study was designed to fill this gap by constructing a French-language scale capable of assessing four major dimensions of EL and examining its psychometric properties. The resulting Echelle Précolaire

de Littératie Emergente (EPLE – Preschool Early Literacy Scale) will allow the results of studies carried out in French-speaking contexts to be compared with research carried out in other countries. Our study also enabled us to perform a confirmatory factor analysis in order to investigate how the different dimensions of EL are structured. This is something that only a few studies have attempted to do (e.g., Townsend & Konold, 2010), even though examining the factor structure underlying measures of EL skills is essential to obtaining a better understanding of the relations between these skills (Norwalk et al., 2014). Hence, we tested the hypothesis of a two-level hierarchical factorial structure, with alphabet knowledge, vocabulary, phonological awareness, and comprehension as primary factors (first order), each influencing a group of tasks. These primary factors are, in turn, influenced by “EL”, a common second-order factor.

Our second aim was to examine links between the dimensions of EL and children's characteristics (sex, age, SES). Although numerous studies have examined the impact of early learning on future skills (e.g., Duncan et al., 2007), the relations between the different dimensions of EL and between these dimensions and children's characteristics (sex, age, SES) have rarely been investigated. Therefore, we used a competing model approach to carry out exploratory tests and comparisons of several path models.

Method

Participants

Participants were 167 kindergarten students (79 girls and 88 boys), aged between 4.18 and 6.46 years (mean = 5.17 years, standard deviation = 0.59). None of the children in our sample were known to have any developmental difficulties.

We determined an SES index for each child's family by combining scores for five indicators: father's level of education, mother's level of education, father's profession, mother's

profession, and household income. This information was collected by a questionnaire sent to parents. Parents' reported highest education level yielded to five categories: 1 = pre-high school (Mother = 7%, Father = 3%), 2 = vocational or technical diploma (M = 7%, F = 12%), 3 = high school diploma (M = 15%, F = 9%), 4 = bachelor's degree (M = 45%, F = 42%) and 5 = master's degree and more (M = 26%, F = 34%). The father's and mother's profession have been categorized in six categories (1 = labourer to 6 = executive manager) according to the classification of the French National Institute for Statistics and Economic Studies (INSEE; <http://www.insee.fr>). Parental monthly income was measured on a 6-point scale ranging from 1 = less than 1000 to 6 = more than 4000 € per month. The mean family income was 2690 € (standard deviation = 919€).

The strong correlations between these five indicators (they ranged from .54 to .78 and were all significant at $p < .01$) justified grouping them together. The SES was then measured by the average of the five indicators. This average ranges from 1 to 5.2 (mean = 3.92, standard deviation = 1.14, range 1 - 5.2).

Evaluation procedure

After obtaining written consent from their parents, we tested the children individually at their kindergarten, in a separate classroom reserved for the purpose. Evaluations were conducted by psychology and education sciences graduate research assistants who had received two half days training in administering the tests and who had completed a testing-out procedure. Each examiner was provided with an administration and scoring manual. For each test item, the examiner marked the student's answer 1 if correct and 0 if not. Every subtest was interrupted by the examiner after three consecutive errors.

Measures

The EL tasks we created for the EPLE were inspired by a variety of standardized tools listed in table 1. This work is also based on the French nursery school curriculum (MEN, 2015), which indicates the skills that pupils must acquire during each year of pre-schooling. In France, national assessments are carried out at the beginning of the first grade since 2018 (Andreu et al., 2020). Several subtests of the EPLE allow to establish continuity with these assessments. Several criteria guided us in the selection and creation of the items that made up the different tests. In particular the frequency of occurrence of the words was used to grant their suitability for preschool children. To do this, we used Manulex, a tool that lists the frequency of French language words (Lété et al., 2004). The distractors were then chosen with approximately the same frequencies as the target words.

All skills were pretested with a sample of hundreds of students in May-June 2017. This work examined the psychometric qualities of the items (i.e. discrimination and difficulty) and selected the most relevant ones. This pilot study also verified the progressiveness of the tests over the years of preschool and allowed the training of the examiners. EPLE is composed of fourteen tasks.

* *Recognizing letters.* Four printed capital letters or letters written in cursive script are presented in a 2x2 matrix. The child has to point to the letter named by the experimenter. Example: Point to A (distractors: B, M, E, Y and G).

* *Naming letters.* The experimenter presents the child with a letter and asks the child to name it. Example: Can you tell me the name of that letter (While the letter M is shown on the screen)?

* *Pronouncing letters.* The experimenter presents the child with a letter and asks the child to pronounce it. Example: What is that letter sound like (while the letter R is shown on the screen)?

* *Recognizing everyday words.* This task assesses receptive vocabulary by posting four unnamed images on the screen and asking the child to point to the target word. Example: Show me the robot (distractors: teddy bear, spinning top and doll).

* *Naming parts of the body.* This task assesses productive vocabulary by asking the child to name parts of the human body. Example: Can you tell me what it is called (Experimenter points his nose)?

* *Fluency.* The child is given a semantic category and asked to give as many words associated with that category as possible within 20 seconds. Example: Can you tell me as soon as possible all the animals you know? We can start with the cat. Your turn now.

* *Deleting the final syllable of a word.* The child has to remove the final syllable from a given word. Example: Now we are going to remove the syllable from the end of the word. Listen carefully. In the word "citron", if we remove the syllable at the end of the word, it gives "ci".

* *Deleting the first syllable of a word.* The child has to remove the first syllable from a given word. Example: Now we are going to remove the first syllable of the word. Listen carefully. In the word "lapin" if we remove the first syllable it gives "pin".

* *Inverting the syllables of a word.* The child has to invert the syllables of a given word. Example: Now we are going to invert the syllables of the words. Now, listen carefully. In the word "Lundi" if we invert the syllables it gives "dilun".

* *Recognizing a syllable in a word.* The child has to recognize the syllables in a given word. Example: Listen up, we are going to play a game with syllables. In the word "Radis" you hear the sound [di]. Show me the place in the word of the [di] syllable.

* *Identifying rhymes.* The child was required to mark the picture that does not rhyme with the other picture. Example: I will read you the names of the drawings on this line. Papa, panda,

ballon. Careful, I am starting again, this time listen carefully. All the words end with the same sound except one. That is the one you must find.

* *Sentence comprehension*. The experimenter asks the child to point to the part of the image that corresponds to a given information. Example: Point to the apple in the middle.

* *Literal comprehension*. The experimenter reads a short story and then questions the child about explicit details of the story (characters, events, etc.). Example: Who is Filou ?

* *Inference-making comprehension*. The experimenter reads a short story and then questions the child about implicit aspects of the story. Example: Today, Laura's going out to eat at a restaurant. For dessert, she would like ice cream or chocolate cake. The restaurant was out of ice cream. What will Laura eat?

Results

Preliminary Analyses

We calculated total scores for each task by summing the scores for the individual items within the task. Table 2 shows means, standard deviations, ranges, and Cronbach's alphas for each task. Examination of the univariate normality indices, that is, skewness and kurtosis, showed that the distribution of the data could be considered normal: skewness indices were all substantially lower than 3.00, the threshold above which data are considered asymmetrical, and kurtosis indices were all substantially lower than 10.00, the threshold above which the normality of a distribution is considered problematic (Kline, 1998). All Cronbach's alpha coefficients were greater than .70 (Cronbach, 1951).

Table 2. *Descriptive statistics and item analyses for the EL tasks*

	Number of items	Cronbach's alpha	Mean	SD	Range	Skewness	Kurtosis
1. Recognizing letters	14	0.89	9.55	3.81	0 – 14	-0.58	-0.66
2. Naming letters	10	0.91	7.95	2.91	0 – 10	-1.51	1.25
3. Pronouncing letters	7	0.88	3.68	2.60	0 – 7	-0.01	-1.57
4. Recognizing everyday words	14	0.74	8.19	3.07	0 – 14	-0.26	-0.62
5. Naming parts of the body	10	0.79	4.36	2.61	0 – 10	0.10	-0.77
6. Fluency	--	--	9.86	4.18	0 – 24	0.10	0.88
7. Deleting the final syllable of a word	8	0.85	3.74	2.51	0 – 8	-0.04	-0.90
8. Deleting the first syllable of a word	8	0.89	2.31	2.65	0 – 8	0.70	-0.99
9. Inverting the syllables of a word	5	0.91	1.67	2.04	0 – 5	0.64	-1.35
10. Recognizing a syllable in a word	8	0.88	4.65	2.91	0 – 8	-0.38	-1.28
11. Identifying rhymes	10	0.87	5.57	3.33	0 – 10	-0.40	-1.25
12. Sentence comprehension	10	0.72	7.92	2.03	0 – 10	-1.56	3.26
13. Literal comprehension	6	0.78	4.68	1.95	0 – 6	-1.19	0.51
14. Inference-making comprehension	4	0.77	2.58	1.38	0 – 4	-0.58	-0.81

Correlations between the tasks are shown in Table 3. Almost all these correlations were significant at .01.

Table 3. *Correlation matrix for the study variables*

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	1																		
2	-.09ns	1																	
3	.01ns	.68	1																
4	.18*	.42	.74	1															
5	.09sn	.53	.70	.58	1														
6	.10ns	.62	.94	.87	.84	1													
7	.37	.30	.40	.29	.39	.41	1												
8	.41	.30	.41	.34	.32	.41	.67	1											
9	.29	.28	.42	.30	.31	.40	.55	.58	1										
10	.40	.34	.48	.36	.40	.47	.84	.84	.87	1									
11	.25	.27	.39	.42	.34	.44	.46	.43	.40	.50	1								
12	.14ns	.44	.50	.38	.55	.53	.43	.45	.45	.52	.47	1							
13	.20*	.44	.54	.43	.58	.59	.43	.47	.42	.51	.49	.69	1						
14	.07	.44	.46	.38	.50	.51	.51	.42	.29	.46	.44	.47	.48	1					
15	.26	.30	.46	.38	.40	.47	.53	.60	.38	.57	.43	.46	.51	.42	1				
16	.24	.49	.61	.52	.61	.66	.62	.63	.50	.67	.73	.79	.80	.75	.77	1			
17	.33	.24	.41	.37	.36	.43	.56	.53	.58	.66	.50	.44	.37	.41	.44	.57	1		
18	.42	.28	.39	.34	.34	.41	.53	.54	.52	.62	.48	.40	.41	.37	.46	.56	.68	1	
19	.31	.23	.38	.26	.28	.36	.42	.44	.46	.52	.27	.31	.30	.32	.36	.41	.52	.78	1
20	.42	.29	.46	.38	.39	.47	.60	.60	.61	.70	.50	.46	.42	.43	.49	.61	.89	.90	.77

NB. N = 167, ns = not significant, * significant at .05; all other r are significant at .01. 1. SES; 2. Age; 3. Recognizing letters; 4. Naming letters; 5. Pronouncing letters; 6. Alphabet knowledge; 7. Recognizing everyday words; 8. Naming parts of the body; 9. Fluency; 10. Vocabulary; 11. Deleting the final syllable of a word; 12. Deleting the first syllable of a word; 13. Inverting the syllables of a word; 14. Recognizing a syllable in a word; 15. Identifying rhymes; 16. Phonological awareness; 17. Sentence comprehension; 18. Literal comprehension; 19. Inference-making comprehension; 20. Comprehension

Confirmatory factor analysis

We performed a confirmatory factor analysis on the EL task scores by entering the data into LISREL 9.3 software (Jöreskog & Sörbom, 1993), using the correlation matrix as the basis for the analysis. We used maximum likelihood as the estimation method for all the structural analyses. χ^2/df ratios of less than 2.0 were taken to indicate a good fit; ratios greater than 2.0 but less than 3.0 were taken to indicate a moderate fit. Comparative Fit Indices (CFI) and Non-Normed Fit Indices (NNFI) greater than .90, and root mean square error of approximation (RMSEA) values less than or equal to .05 were also taken to indicate a good fit. RMSEA values between .05 and .08 were taken to indicate a moderate fit (Jöreskog & Sörbom, 2004).

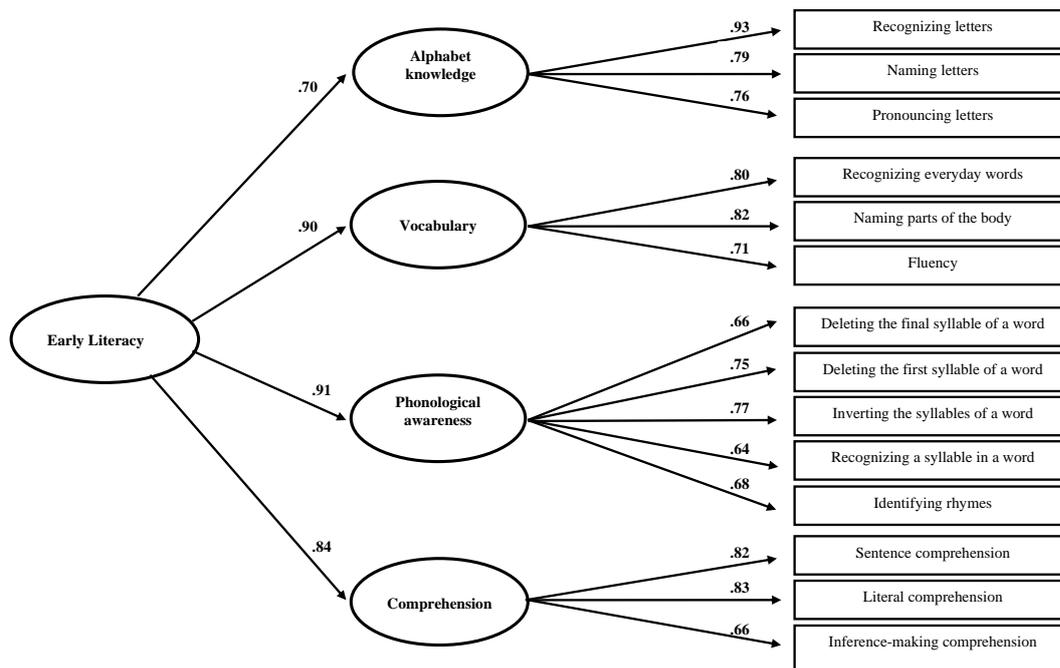


Figure 1. Confirmatory factor analysis of our EL tasks (N=167)

Ovals show latent variables; rectangles show observed variables. All values are standardized coefficients. All factor loadings are significant at .001.

Testing the model against our data (figure 1) revealed four first-order factors (corresponding to the four theoretical dimensions described above) and a second-order factor linking the four dimensions. All the tasks saturated significantly on their respective factor. The fit between the data and the model was satisfactory ($\chi^2 = 140.14$ for 73 degrees of freedom; $p = .01$; RMSEA = .07; CFI = .94; NNFI = .93).

Model explaining the links between children's characteristics and the four dimensions of EL

As we noted in the introduction, very few studies have investigated either the relations between the different dimensions of preschoolers' EL or the relations between these dimensions and children's characteristics (sex, age, SES). The present study addressed this gap in the literature by investigating the links between the dimensions of EL and children's sex, age, and SES. We began by testing a reference model (M1) which postulates that phonological awareness is the ultimate dependent variable. The chosen M1 model applies specifically to French kindergartners because they followed a curriculum in which working on phonological awareness only comes at the end of preschool. Indeed, the relationships between the variables could be different in other education systems. Because path analysis can be used to test and compare several models for the same data, we tested four other models: a model with comprehension as the ultimate DV (M2), a model with vocabulary as the ultimate DV (M3), a model with alphabet knowledge as the ultimate DV (M4), and a model with all four dimensions of EL as ultimate DVs (M5).

We used LISREL 9.3 software to estimate the parameters and fit indices of the theoretical model (figure 2). Figure 2 shows the results of the path analysis. The fit between the data and the model was satisfactory ($\chi^2 = 5.79$ for 3 degrees of freedom; $p = .12$; RMSEA (residuals) =

.075; CFI = .99; NNFI = .96).

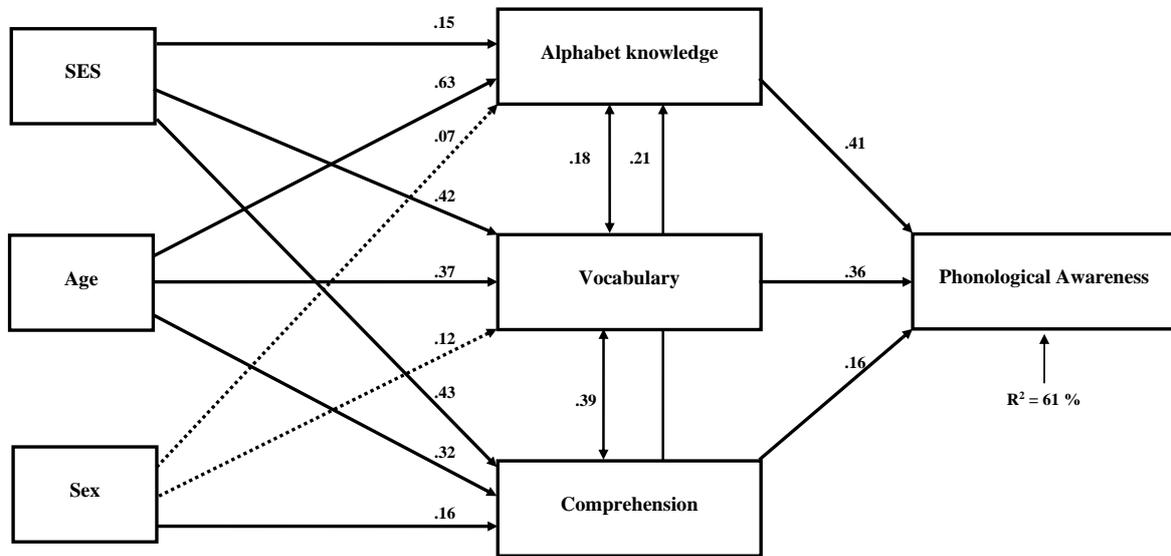


Figure 2. Path analysis explaining the acquisition of phonological awareness

For the sake of clarity, only paths significant at $p < .05$ are shown as solid lines in Figure 2. The values associated with the unidirectional arrows are standardized path coefficients. Ten of the model's twelve paths were significant at $p < .05$ (Figure 2). Four observations are worth highlighting:

- (1) SES positively and significantly influenced the alphabet knowledge ($\beta = .15, p < .05$), vocabulary ($\beta = .42, p < .05$), and comprehension ($\beta = .43, p < .05$) dimensions of EL: The higher the family's SES, the higher their children's scores on these dimensions. In addition, SES had an indirect effect on phonological awareness ($\beta = .28, p < .05$) via the other dimensions of EL.
- (2) Children's age also positively and significantly influenced the alphabet knowledge (β

= .63, $p < .05$), vocabulary ($\beta = .37$, $p < .05$), and comprehension ($\beta = .32$, $p < .05$) dimensions of EL: The older the children, the higher their scores on these dimensions. In addition, age had an indirect effect on phonological awareness ($\beta = .45$, $p < .05$) via the other dimensions of EL.

(3) Children's sex had a positive and significant effect only on the comprehension dimension ($\beta = .16$, $p < .05$), with girls obtaining higher scores than boys on this dimension.

(4) The alphabet knowledge, vocabulary, and comprehension dimensions had effects on phonological awareness ($\beta = .41$, .36, and .16, respectively, $p < .05$).

Alternative models

Several studies suppose that phonological awareness is the dimension of EL that develops last and is influenced by the other dimensions (e.g., Biot-Chevrier et al., 2008). As Bullock et al. (1994) pointed out, confirmation of a model does not validate this exclusive model; therefore, we felt it was advisable to test four other models, in addition to the model presented above (see Figure 2). As can be seen from Table 4, the fit indices for all the models except M1 were close to or higher the values usually considered to indicate a satisfactory fit. All but one χ^2 differences were significant.

Table 4. *The relationship between the model and values examined*

Models		χ^2	df	CFI	NNFI	RMSEA	χ^2 diff
M1	Initial model (figure 2)	5.79	3	.994	.957	.075	--
M2	Ultimate DV: comprehension	14.19	3	.975	.826	.149	8.4**
M3	Ultimate DV: vocabulary	8.54	3	.988	.914	.105	2.75
M4	Ultimate DV: alphabet knowledge	40.14	3	.917	.422	.272	34.35**
M5	Ultimate DV: all four dimensions of EL	22.09	2	.955	.531	.245	16.30**

Note. N = 167. CFI = Comparative Fit Index; NNFI = Non-Normed Fit Index; RMSEA = Root Mean Square Error of Approximation. Chi-square difference tests involved comparisons with model 1

Discussion

Echelle Préscolaire de Littératie Emergente (EPLÉ – Preschool Early Literacy Scale)

The present paper presents and examines the psychometric properties of the Echelle Préscolaire de Littératie Emergente (EPLÉ – Preschool Early Literacy Scale), the first tool of its type to be drawn up in French. The EPLÉ evaluates the four most widely studied dimensions of EL—alphabet knowledge, phonological awareness, vocabulary, and oral comprehension—, all of which are predictive of future abilities (Duncan et al., 2007; Lonigan & Shanahan, 2009). Statistical analyses showed that the psychometric properties of the EPLÉ's constituent tasks are satisfactory.

As part of our study, we also performed a confirmatory factor analysis in order to investigate the EPLÉ's underlying factor structure. As Townsend and Konold (2010) noted, very few studies have examined this structure. Theoretical considerations led us to test and validate a two-level, hierarchical factor model with alphabet knowledge, vocabulary, phonological

awareness, and comprehension as first-order factors, each of which influences a group of tasks but which are, in turn, influenced by “EL”, a common second-order factor. We are continuing our research into this factor structure, notably by adopting a longitudinal approach in order to better understand how the relations between preschoolers’ skills evolve with age (Norwalk et al. 2014). The weights of the factor saturations of each of the first-order factors on the second-order factor are likely to change as children get older.

Path model

Our study’s second objective was to examine possible links between children’s characteristics (SES, age, sex) and the dimensions of EL. We used a competing model approach to test and compare several models. The most statistically robust model was the one with phonological awareness as the ultimate dependent variable (M1). This model gave satisfactory fit indices and explained a large part of the variance in phonological awareness scores. In terms of theory, M1 supposes that phonological awareness is the dimension of EL that develops last and which is influenced by the other dimensions. This result is consistent with the findings of some previous studies, which have reported positive links between alphabet knowledge and phonological awareness skills (Biot-Chevrier et al., 2008; Castles & Coltheart, 2004; Foulin, 2005), and found that good vocabulary skills facilitate the emergence of phonological awareness (McDowell, et al. 2007).

Our study reproduced certain classic findings and produced a number of new results. First, children’s age had both direct and indirect effects on the different dimensions of EL. This result is consistent with previous findings (e.g., Huang & Invernizzi, 2012). Second, children’s sex had a positive and significant effect only on the comprehension dimension. Some studies have shown that this difference may be due to a difference in behavioral and cognitive processes

between girls and boys. Girls are reported to have better attention skills and a greater willingness to learn than boys (Ready et al., 2005), perhaps sustained by their greater intrinsic motivation (Deasley et al., 2018). In contrast with other studies, the girls in our study did not perform better than the boys on the other dimensions of EL (e.g., Below et al., 2010). However, this result must be treated with caution, as we might have found differences between the two sexes if our sample had been larger.

Third, in line with other studies (e.g., McDowell et al., 2007), SES had an impact on all four dimensions of EL. This impact was direct in the case of alphabet knowledge, vocabulary, and comprehension. Interestingly, the effects of SES on vocabulary and comprehension were much stronger than its effect on alphabet knowledge. In addition, SES had an indirect effect on phonological awareness via the other dimensions of EL. This result supports the findings of other studies, which have shown that young French children from disadvantaged backgrounds are more likely to have poorer reading skills than their peers from more advantaged backgrounds (e.g., Fluss et al., 2009). Similarly, the PISA 2015 study (OECD, 2015) found that socioeconomic background has a great impact on future success in France. What is more, the PISA rankings showed that French children's reading skills are among the poorest in OECD countries and in Western Europe in general.

It is noteworthy that several studies show that the relationship between SES and test performance is mediated by family variables, particularly the home literacy environment (e.g., Sénéchal & LeFevre, 2002). For example, parent-child language interactions differ both in quality and quantity depending to the socio-economic status of the parents (Weisleder & Fernald, 2013). Future work should take these family variables into account.

Instructional implications

The EPLE has a number of applications in instructional settings. First, it can be used as a normative evaluation tool to situate a child's EL skills with respect to his or her age group. This type of evaluation considers the development of EL skills over periods of approximately a year (Marston et al., 1986). Given how rapidly preschoolers' skills develop, the EPLE can be used to monitor progress in one or more skills. This type of evaluation requires less time and effort. The results of the EPLE evaluations can also be used to assess intervention effects on children's competencies (Wilson & Lonigan, 2010). Finally, given the importance of early learning, the EPLE can be used to identify early difficulties students are experiencing. As Justice et al. (2002) highlighted, early screening tools must fulfill three important criteria: The scores they give must have good psychometric properties, they must measure specific skills that are predictive of future results, and they must detect children at risk of difficulties.

Limitations and future research

The present study was original in that it enabled us to construct and validate the first French-language scale for simultaneously measuring several dimensions of EL. In addition, our results allowed us to investigate the links between the different dimensions of EL and children's characteristics, an issue that has rarely been studied to date, especially in France. Nevertheless, our study has a number of limitations.

First, although the EPLE evaluates several aspects of EL, there are other aspects it does not measure (e.g., writing of the letters, morphological awareness). We are working to develop the tool further by improving the existing tasks and by adding new tasks. Second, it is important not to forget the limitations of path analysis. As Bullock et al. (1994, p. 257) pointed out, confirming a model "shows only that a model provides an 'acceptable' description of the data";

it does not mean it is the only plausible model. Consequently, path analysis must be seen as a provisional tool that can be used to extend knowledge in a specific field and its refutable character is its primary quality. Moreover, these analysis methods are based on a probabilistic conception of causality, not a deterministic conception (Mulaik, 1987). In addition, the models we tested were based on transversal data, not longitudinal data, which limits interpretations. Therefore, it is important to examine links between the dimensions of EL and children's characteristics from a longitudinal perspective. Finally, although our sample was quite large, it was not large enough to allow us to carry out other types of analysis, such as comparing models as a function of the children's sex or age.

Conclusion

Constructing and validating the EPLE creates several new opportunities for EL research in French-speaking contexts. First, it allows the results of such studies to be compared with research conducted in other countries. For example, the correlations we obtained in our study are similar to those reported by Napoli and Purpura (2018) in the United States and by Davidse et al. (2014) in the Netherlands. Second, the EPLE will enable us to continue our research into the links between the dimensions of EL and children's characteristics. Finally, as we noted above, the EPLE can be used by teachers and educators to guide instruction and assess its results.

Conflict of interest: There is no conflict of interest in this work.

Ethical approval: All procedures performed in studies involving human participants were in accordance with the ethical standards of the institutional and/ or national research committee and with the 1964 Helsinki Declaration and its later amendments or comparable ethical standards.

Acknowledgements: We would like to thank the Caisse des Dépôts, which funded this project via an e-FRAN (Espaces de formation, de recherche et d'animation numérique) call for projects within the PIA 2 (Programme d'Investissement d'Avenir 2) program. We would also like to thank the educational authorities in the Lorraine Region for supporting the project, our colleagues in the co-design group, the teachers who allowed us into their classrooms and the parents and children who took part in the study.

Bibliography

- Andreu, S., Cioldi, I., Conceicao, P., Étève, Y., Fabre, M., Le Breton, S., Persem, É., Portelli, T., Rocher, T., Vourc'h, R., & Wuillamier, P. (2020). Évaluations repères 2019 de début de CP : des résultats stables (Note d'information n° 20.05). Paris: MENJ & Depp.
- Anthony, J. L., Williams, J. M., McDonald, R., & Francis, D. J. (2007). Phonological processing and emergent literacy in younger and older preschool children. *Annals of Dyslexia*, 57(2), 113-137. <https://doi.org/10.1007/s11881-007-0008-8>
- Bara, F., Gentaz, É., & Colé, P. (2008). Littératie précoce et apprentissage de la lecture : comparaison entre des enfants à risque, scolarisés en France dans des réseaux d'éducation prioritaire, et des enfants de classes régulières. *Revue des sciences de l'éducation*, 34(1), 27-45. <https://doi.org/10.7202/018988ar>
- Below, J. L., Skinner, C. H., Fearing, J. Y., & Sorrell, C. A. (2010). Gender Differences in Early Literacy: Analysis of Kindergarten through Fifth-Grade Dynamic Indicators of Basic Early Literacy Skills Probes. *School Psychology Review*, 39(2), 240-257.
- Biot-Chevrier, C., Écalle, J., & Magnan, A. (2008). Pourquoi la connaissance du nom des lettres est-elle si importante dans l'apprentissage de la langue écrite?. *Revue française de pédagogie*, 162, 15-27. <https://doi.org/10.4000/rfp.741>
- Bullock, H. E., Harlow, L. L., & Mulaik, S. A. (1994). Causation issues in structural equation modeling research. *Structural Equation Modeling: A Multidisciplinary Journal*, 1(3), 253-267. <https://doi.org/10.1080/10705519409539977>
- Cain, K., Oakhill, J., & Bryant, P. (2004). Children's Reading Comprehension Ability: Concurrent Prediction by Working Memory, Verbal Ability, and Component Skills.

Journal of Educational Psychology, 96(1), 31-42. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.96.1.31>

Carroll, J. M., Holliman, A. J., Weir, F., & Baroody, A. E. (2019). Literacy interest, home literacy environment and emergent literacy skills in preschoolers. *Journal of Research in Reading*, 42(1), 150-161. <https://doi.org/10.1111/1467-9817.12255>

Castles, A., & Coltheart, M. (2004). Is there a causal link from phonological awareness to success in learning to read? *Cognition*, 91(1), 77-111. [https://doi.org/10.1016/s0010-0277\(03\)00164-1](https://doi.org/10.1016/s0010-0277(03)00164-1)

Catts, H. W., Herrera, S., Nielsen, D. C., & Bridges, M. S. (2015). Early prediction of reading comprehension within the simple view framework. *Reading and Writing*, 28(9), 1407-1425. <https://doi.org/10.1007/s11145-015-9576-x>

Coyle, T. (2012). *Pro-PA Manual: Profil of phonological Awareness*. Smarty Ears. <http://www.smartyearsapps.com/pro-pa.pdf>

Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 22(3), 297-334. <https://doi.org/10.1007/bf02310555>

Davidse, N. J., De Jong, M. T., & Bus, A. G. (2014). Explaining common variance shared by early numeracy and literacy. *Reading and Writing*, 27(4), 631-648. <https://doi.org/10.1007/s11145-013-9465-0>

Deasley, S., Evans, M. A., Nowak, S., & Willoughby, D. (2018). Sex Differences in Emergent Literacy and Reading Behaviour in Junior Kindergarten. *Canadian Journal of School Psychology*, 33(1), 26-43. <https://doi.org/10.1177/0829573516645773>

- Dulay, K. M., Cheung, S. K., & McBride, C. (2018). Environmental correlates of early language and literacy in low-to middle-income Filipino families. *Contemporary Educational Psychology, 53*, 45-56. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2018.02.002>
- Duncan, G. J., Dowsett, C. J., Claessens, A., Magnuson, K., Huston, A. C., Klebanov, P., ... Duckworth, K. (2007). School Readiness and Later Achievement. *Developmental Psychology, 43*(6), 1428-1446. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.43.6.1428>
- Foulin, J. N. (2005). Why is letter-name knowledge such a good predictor of learning to read? *Reading and Writing, 18*(2), 129-155. <https://doi.org/10.1007/s11145-004-5892-2>
- Foulin, J. N. (2007). La connaissance des lettres chez les prélecteurs: aspects pronostiques, fonctionnels et diagnostiques. *Psychologie française, 52*, 431-444. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2006.12.004>
- Fluss, J., Ziegler, J. C., Warszawski, J., Ducot, B., Richard, G., & Billard, C. (2009). Poor reading in French elementary school: The interplay of cognitive, behavioral, and socioeconomic factors. *Journal of Developmental & Behavioral Pediatrics, 30*(3), 206-216. <https://doi.org/10.1097/dbp.0b013e3181a7ed6c>
- Good, R.H., & Kaminski, R.A. (2002). Dynamic Indicators of Basic Early Literacy Skills 6th Edition (DIBELS). Institute for the Development of Educational Achievement.
- Grøver, V., Rydland, V., Gustafsson, J.-E., & Snow, C. E. (2020). Shared Book Reading in Preschool Supports Bilingual Children's Second-Language Learning: A Cluster-Randomized Trial. *Child Development*. <https://doi.org/10.1111/cdev.13348>
- Hjetland, H. N., Brinchmann, E. I., Scherer, R., Hulme, C., & Melby-Lervåg, M. (2020). Preschool pathways to reading comprehension: A systematic meta-analytic review.

Educational Research Review, 30, 100323.

<https://doi.org/10.1016/j.edurev.2020.100323>

Hoff, E. (2003). The Specificity of Environmental Influence: Socioeconomic Status Affects Early Vocabulary Development Via Maternal Speech. *Child Development*, 74(5), 1368-1378. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00612>

Hooper, S. R., Roberts, J., Sideris, J., Burchinal, M., & Zeisel, S. (2010). Longitudinal predictors of reading and math trajectories through middle school for African-American versus Caucasian students across two samples. *Developmental Psychology*, 46, 1018–1029. <https://doi.org/10.1037/a0018877>

Huang, F. L., & Invernizzi, M. A. (2012). The Association of Kindergarten Entry Age with Early Literacy Outcomes. *The Journal of Educational Research*, 105(6), 431-441. <https://doi.org/10.1080/00220671.2012.658456>

Huang, F. L., Tortorelli, L. S., & Invernizzi, M. A. (2014). An investigation of factors associated with letter-sound knowledge at kindergarten entry. *Early Childhood Research Quarterly*, 29(2), 182-192. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2014.02.001>

Jacquier-Roux, M., Lequette, C., Pouget, G., Valdois, S., & Zorman, M. (2010). *BALE : batterie analytique du langage écrit*. Groupe Cogni-Sciences, Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition.

Jöreskog, K.G., & Sörbom, D. (1993). *LISREL 8: Structural Equation Modeling with the SIMPLIS Command Language*. Chicago, IL : Scientific Software International.

Jöreskog, K., & Sörbom, D. (2004). *Interactive Lisrel (8.72)*. Chicago, IL : Scientific Software International.

- Justice, L. M., Invernizzi, M. A., & Meier, J. D. (2002). Designing and implementing an early literacy screening protocol: Suggestions for the speech–language pathologist. *Language, Speech, and Hearing Services in Schools, 33*, 84–101. [https://doi.org/10.1044/0161-1461\(2002/007\)](https://doi.org/10.1044/0161-1461(2002/007))
- Kaminski, R. A., Abbott, M., Bravo Aguayo, K., Latimer, R., & Good III, R. H. (2014). The preschool early literacy indicators : Validity and benchmark goals. *Topics in Early Childhood Special Education, 34*(2), 71-82.
- Kendeou, P., van den Broek, P., White, M., & Lynch, J. (2007). Preschool and early elementary comprehension: Skill development and strategy interventions. In D. S. McNamara (Ed.) *Reading Comprehension Strategies: Theories, Interventions, and Technologies*, (pp. 27–45). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Kendeou, P., van den Broek, P., White, M. J., & Lynch, J. S. (2009). Predicting reading comprehension in early elementary school: The independent contributions of oral language and decoding skills. *Journal of Educational Psychology, 101*(4), 765-778. <https://doi.org/10.1037/a0015956>
- Khomsî, A. (2001). *ELO : évaluation du langage oral*. ECPA, Les Editions du Centre de psychologie appliquée.
- Kintsch, W., & Kintsch, E. (2005). Comprehension. In S. Stahl & S. Paris (Eds.), *Children's Reading Comprehension and Assessment* (pp. 71–92). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Kline, R. B. (1998). *Methodology in the Social Sciences. Principles and Practice of Structural Equation Modeling*. New York, NY, US: Guilford Press.

- Korat, O. (2005). Contextual and non-contextual knowledge in emergent literacy development: A comparison between children from low SES and middle SES communities. *Early Childhood Research Quarterly*, 20(2), 220-238. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2005.04.009>
- Lété, B., Sprenger-Charolles, L., & Colé, P. (2004). Manulex: A grade-level lexical database from French elementary-school readers. *Behavior Research Methods, Instruments, & Computers*, 36, 156-166.
- Lombardino, L. J., Lieberman, R. J., Brown, J. J. C., & PsychCorp (Firm). (2005). *ALL : Assessment of Literacy and Language*. PsychCorp; /z-wcorg/.
- Lyster, S. A. H., Lervåg, A. O., & Hulme, C. (2016). Preschool morphological training produces long-term improvements in reading comprehension. *Reading and Writing*, 29(6), 1269-1288. <https://doi.org/10.1007/s11145-016-9636-x>
- Lonigan, C. J., Schatschneider, C., & Westberg, L. (2008). Identification of children's skills and abilities linked to later outcomes in reading, writing, and spelling. In *Developing Early Literacy: Report of the National Early Literacy Panel* (pp. 55-106). Washington, DC: National Institute for Literacy. <https://doi.org/10.1037/e548602010-001>
- Lonigan, C. J., & Shanahan, T. (2009). Developing early literacy: Report of the National Early Literacy Panel. Executive summary. A Scientific synthesis of early literacy development and implications for intervention. *National Institute for Literacy*. <https://doi.org/10.1037/e563852009-001>
- Lonigan, C. J., Wagner, R. K., Torgesen, J. K., & Rashotte, C. A. (2007). *TOPEL: Test of Preschool Early Literacy*. Austin, TX: Pro-Ed.

- Lyster, S.-A. H., Snowling, M. J., Hulme, C., & Lervåg, A. O. (2020). Preschool phonological, morphological and semantic skills explain it all: Following reading development through a 9-year period. *Journal of Research in Reading*, <https://doi.org/10.1111/1467-9817.12312>
- Massonnié, J., Bianco, M., Lima, L., & Bressoux, P. (2019). Longitudinal predictors of reading comprehension in French at first grade: Unpacking the oral comprehension component of the simple view. *Learning and Instruction*, 60, 166-179. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2018.01.005>
- Marston, D., Fuchs, L. S., & Deno, S. L. (1986). Measuring pupil progress: A comparison of standardized achievement tests and curriculum-related measures. *Assessment for Effective Intervention*, 11, 77–90. <https://doi.org/10.1177/073724778601100203>
- McDowell, K. D., Lonigan, C. J., & Goldstein, H. (2007). Relations Among Socioeconomic Status, Age, and Predictors of Phonological Awareness. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 50(4), 1079-1092. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2007/075\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2007/075))
- MEN (2015). Programme de l'école maternelle. Bulletin officiel spécial n° 2 du 26 mars 2015. https://cache.media.education.gouv.fr/file/MEN_SPE_2/37/8/ensel4759_arrete-annexe_prog_ecole_maternelle_403378.pdf
- Mol, S. E., & Bus, A. G. (2011). To read or not to read: A meta-analysis of print exposure from infancy to early adulthood. *Psychological Bulletin*, 137(2), 267-296. <https://doi.org/10.1037/a0021890>
- Mol, S. E., Bus, A. G., De Jong, M. T., & Smeets, D. J. (2008). Added value of dialogic parent–child book readings: A meta-analysis. *Early education and development*, 19(1), 7-26. <https://doi.org/10.1080/10409280701838603>

- Moll, K., Ramus, F., Bartling, J., Bruder, J., Kunze, S., Neuhoff, N., ... & Tóth, D. (2014). Cognitive mechanisms underlying reading and spelling development in five European orthographies. *Learning and Instruction*, 29, 65-77. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2013.09.003>
- Muter, V., Hulme, C., Snowling, M. J., & Stevenson, J. (2004). Phonemes, rimes, vocabulary, and grammatical skills as foundations of early reading development: evidence from a longitudinal study. *Developmental Psychology*, 40(5), 665-681. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.40.5.665>
- Mulaik, S. A. (1987). Toward a conception of causality applicable to experimentation and causal modeling. *Child Development*, 58, 18-32. <https://doi.org/10.2307/1130288>
- Napoli, A. R., & Purpura, D. J. (2018). The home literacy and numeracy environment in preschool: Cross-domain relations of parent-child practices and child outcomes. *Journal of Experimental Child Psychology*, 166, 581-603. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.10.002>
- National Early Literacy Panel. (2008). *Developing Early Literacy: Report of the National Early Literacy Panel*. Washington, DC: National Institute for Literacy. <https://doi.org/10.1037/e548602010-001>
- National Reading Panel (2000). *Teaching children to read: An evidence-based assessment of the scientific research literature on reading and its implications for reading instruction*. Washington, D.C.: National Institute of Child Health and Human Development.
- Negro, I., & Genelot, S. (2009). Les prédicteurs en grande section maternelle de la réussite en lecture en fin de première année d'école élémentaire : l'impact du nom des lettres. *Bulletin de psychologie*, 501, 291-306. <https://doi.org/10.3917/bupsy.501.0291>

- Niklas, F., & Schneider, W. (2013). Home literacy environment and the beginning of reading and spelling. *Contemporary Educational Psychology, 38*(1), 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2012.10.001>
- Niklas, F., Tayler, C., & Schneider, W. (2015). Home-based literacy activities and children's cognitive outcomes: A comparison between Australia and Germany. *International Journal of Educational Research, 71*, 75-85. <https://doi.org/10.1016/j.ijer.2015.04.001>
- Norwalk, K.E., DiPerna, J.C., & Lei, P.-W. (2014), Confirmatory factor analysis of the Early Arithmetic, Reading, and Learning Indicators (EARLI). *Journal of School Psychology, 52*, 83 - 96. <https://doi.org/10.1016/j.jsp.2013.11.006>
- OECD. (2015). About PISA. Retrieved from <http://www.oecd.org/pisa/aboutpisa/>
- Peereman, R., Lete, B. & Sprenger-Charolles, L. (2007). Manulex-infra: distributional characteristics of grapheme-phoneme mappings, and infralexical and lexical units in child-directed written material. *Behavioral Research Methods, 39* (3), 579-589. <https://doi.org/10.3758/bf03193029>
- Piquard-Kipffer, A., & Sprenger-Charolles, L. (2013). Early predictors of future reading skills: A follow-up of French-speaking children from the beginning of kindergarten to the end of the second grade (age 5 to 8). *L'Année Psychologique, 113*(4), 491-521. <https://doi.org/10.4074/S0003503313014012>
- Puranik, C. S., Petscher, Y., & Lonigan, C. J. (2013). Dimensionality and reliability of letter writing in 3- to 5-year-old preschool children. *Learning and Individual Differences, 28*, 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.06.011>
- Rabiner, D. L., Godwin, J., & Dodge, K. A. (2016). Predicting Academic Achievement and Attainment : The Contribution of Early Academic Skills, Attention Difficulties, and

Social Competence. *School Psychology Review*, 45(2), 250-267.

<https://doi.org/10.17105/SPR45-2.250-267>

Ready, D. D., LoGerfo, L. F., Burkam, D. T., & Lee, V. E. (2005). Explaining Girls' Advantage in Kindergarten Literacy Learning: Do Classroom Behaviors Make a Difference? *The Elementary School Journal*, 106(1), 21-38. <https://doi.org/10.1086/496905>

Scarborough, H. S. (1990). Very early language deficits in dyslexic children. *Child Development*, 61(6), 1728-1743. <https://doi.org/10.2307/1130834>

Schatschneider, C., Fletcher, J. M., Francis, D. J., Carlson, C. D., & Foorman, B. R. (2004). Kindergarten prediction of reading skills: A longitudinal comparative analysis. *Journal of Educational Psychology*, 96(2), 265. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.96.2.265>

Sénéchal, M., & LeFevre, J.-A. (2002). Parental Involvement in the Development of Children's Reading Skill: A Five-Year Longitudinal Study. *Child Development*, 73(2), 445-460. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00417>

Sénéchal, M., & LeFevre, J. A. (2014). Continuity and change in the home literacy environment as predictors of growth in vocabulary and reading. *Child Development*, 85(4), 1552-1568. <https://doi.org/10.1111/cdev.12222>

Share, D. L. (2004). Orthographic learning at a glance: On the time course and developmental onset of self-teaching. *Journal of experimental child psychology*, 87(4), 267-298. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2004.01.001>

Sulzby, E., & Teale, W. (1991). Emergent literacy. *Handbook of Reading Research*, 2, 727-757.

Townsend, M., & Konold, T. R. (2010). Measuring Early Literacy Skills: A Latent Variable Investigation of the Phonological Awareness Literacy Screening for Preschool. *Journal*

of Psychoeducational Assessment, 28(2), 115-128.

<https://doi.org/10.1177/0734282909336277>

van den Broek, P., Kendeou, P., Kremer, K., Lynch, J. S., Butler, J., White, M. J., & Lorch, E. P. (2005). Assessment of comprehension abilities in young children. In S. Stahl & S. Paris (Eds.), *Children's Reading Comprehension and Assessment* (pp. 107–130). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
<https://doi.org/10.4324/9781410612762>

Weisleder, A., & Fernald, A. (2013). Talking to Children Matters : Early Language Experience Strengthens Processing and Builds Vocabulary. *Psychological Science*, 24(11), 2143-2152. <https://doi.org/10.1177/0956797613488145>

Wiig, E. H., Secord, W. A., & Semel, E. (2004). *Clinical evaluation of language fundamentals-preschool-2 (CELF-Preschool-2)*. Psychological Corp.: San Antonio, TX, USA.

Whitehurst, G. J., & Lonigan, C. J. (1998). Child development and emergent literacy. *Child Development*, 69(3), 848-872. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1998.tb06247.x>

Whitehurst, G. J., & Lonigan, C. J. (2002). Emergent literacy: Development from prereaders to readers. In S. Neuman & D. Dickinson (Eds.), *Handbook of Early Literacy Research, 1* (pp. 11-29). London: Guilford Press.

Wilson, S. B., & Lonigan, C. J. (2010). Identifying preschool children at risk of later reading difficulties: Evaluation of two emergent literacy screening tools. *Journal of Learning Disabilities*, 43, 62–76. <https://doi.org/10.1177/0022219409345007>

Ziegler, J. C. (2018). Différences inter-linguistiques dans l'apprentissage de la lecture. *Langue française*, 3(199), 35-49. <https://doi.org/10.3917/lf.199.0035>

Ziegler, J. C., & Goswami, U. (2005). Reading acquisition, developmental dyslexia, and skilled reading across languages: a psycholinguistic grain size theory. *Psychological bulletin*, *131*(1), 3-29. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.131.1.3>

Article 2: Early Numeracy Assessment in French Preschool: structural analysis and links with children's characteristics

Résumé en français :

Le développement de compétences en numératie émergente chez les enfants d'âge préscolaire est un indicateur important des performances scolaires futures. Une multitude de tâches ou de tests permet de mesurer les compétences en numératie émergente en langue anglaise (e.g. Klein & Starkey, 2006 ; Purpura & Lonigan, 2015). Néanmoins, il n'existe actuellement aucun outil en français pour évaluer et suivre le développement de ces compétences tout au long de l'école maternelle française. La présente étude a remédié à cette situation en créant un ensemble de tâches en numératie émergente en français. Par l'intermédiaire de cet article, nous avons souhaité valider un outil d'évaluation mesurant de nombreuses compétences en numératie émergente en langue française. Dans un second temps, nous avons examiné les liens entre les différentes compétences en numératie émergente et les caractéristiques de l'enfant (âge, sexe, statut socio-économique).

Au début de l'année 2018, 167 enfants scolarisés en moyenne et grande section dans plusieurs écoles maternelles française ont été évalués. Le statut socio-économique de la famille a été déterminé par l'intermédiaire d'un questionnaire distribué aux parents des enfants évalués. L'évaluation des enfants était individuelle et consistait en la passation de neuf subtests présentés verbalement ou sur écran d'ordinateur. La passation des différentes épreuves nécessitait la présence d'un évaluateur formé à l'utilisation de l'outil. La plupart des tâches s'inspirent d'outils préexistants.

Les qualités psychométriques sont bonnes puisque les coefficients alpha de la majorité des épreuves dépassent tous le seuil de .70. Seules les épreuves de « dénombrement » et de « problèmes à histoire » ont des alphas de Cronbach proches de .60. Les épreuves ont donc une cohérence interne satisfaisante. Par ailleurs, les neuf épreuves sont toutes corrélées de manière significative à 0.01. Dans cet article, deux modèles factoriels ont été testés. Un premier modèle à deux facteurs suivant le cadre théorique de Purpura et al. (2013) fait la distinction entre « numératie informelle » et « connaissance numérique » (voir figure 11). Un second modèle regroupe toutes les épreuves en numératie émergente en un seul facteur (voir figure 12). La comparaison des indicateurs statistiques des deux modèles montre que ceux-ci sont tous-deux acceptables. Toutefois, le modèle à deux facteurs montre une corrélation très élevée entre le

facteur « connaissance numérique » et le facteur « numératie informelle ». De même, l'ajustement de nos données était meilleur pour le modèle à un facteur que pour le modèle à deux facteurs. Ces résultats plaident en faveur du modèle unifactoriel de la numératie émergente.

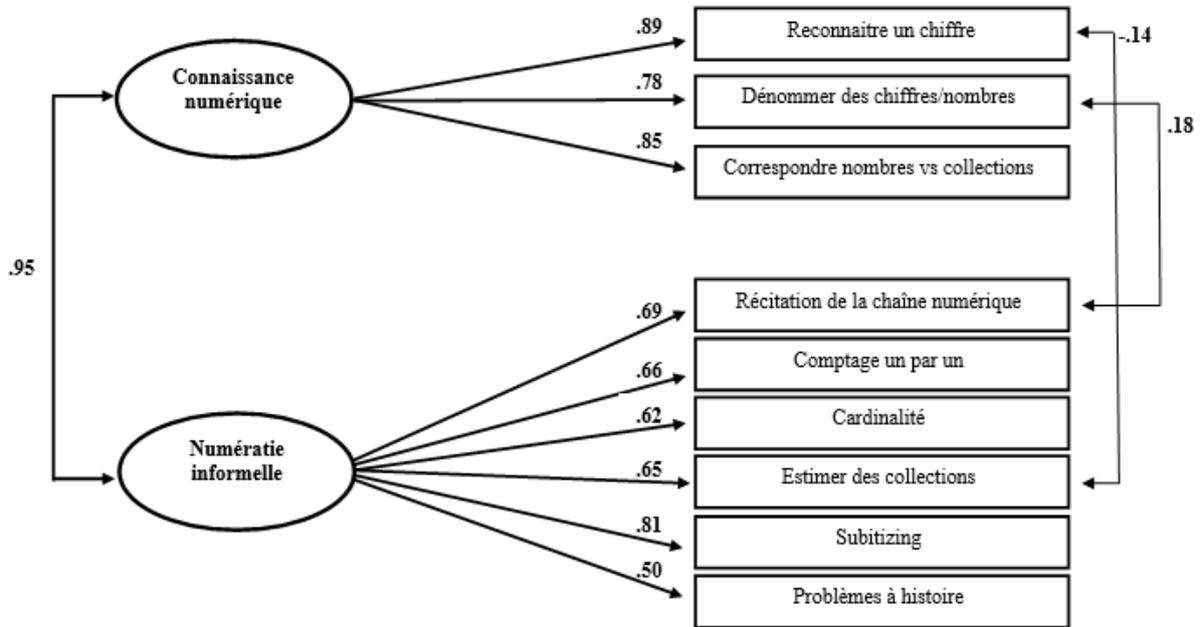


Figure 11. Analyse factorielle confirmatoire (modèle à deux facteurs) des épreuves en numératie émergente (N=167)

$\chi^2 = 51.94$ pour 24 degrés de liberté; $p = 0.01$; RMSEA (résidus) = 0.083; CFI = 0.965; NFI = 0.948

Nb. Les ovales représentent les variables latentes et les rectangles représentent les variables observées. Toutes les valeurs correspondent à des coefficients standardisés. Tous les facteurs sont significatifs à .001.

Concernant l'influence des caractéristiques de l'enfant, des analyses corrélationnelles ont montré une influence de l'âge sur toutes les compétences en numératie émergente évaluées. Ainsi, les élèves plus âgés ont de meilleurs scores que les élèves plus jeunes. Nous avons également constaté des liens significatifs entre le statut socioéconomique et toutes les compétences testées, à l'exception de la récitation de la chaîne numérique et du dénombrement. Enfin, le sexe des enfants est corrélé avec le principe cardinal et l'estimation comparative pour lesquels les filles sont plus performantes que les garçons. Les résultats observés concernant l'influence des caractéristiques de l'enfant sur les compétences en numératie émergente sont conformes à ceux observés dans la littérature (e.g. Aunio & Niemivirta, 2010; DeFlorio & Beliakoff, 2015; Hornburg et al., 2018).

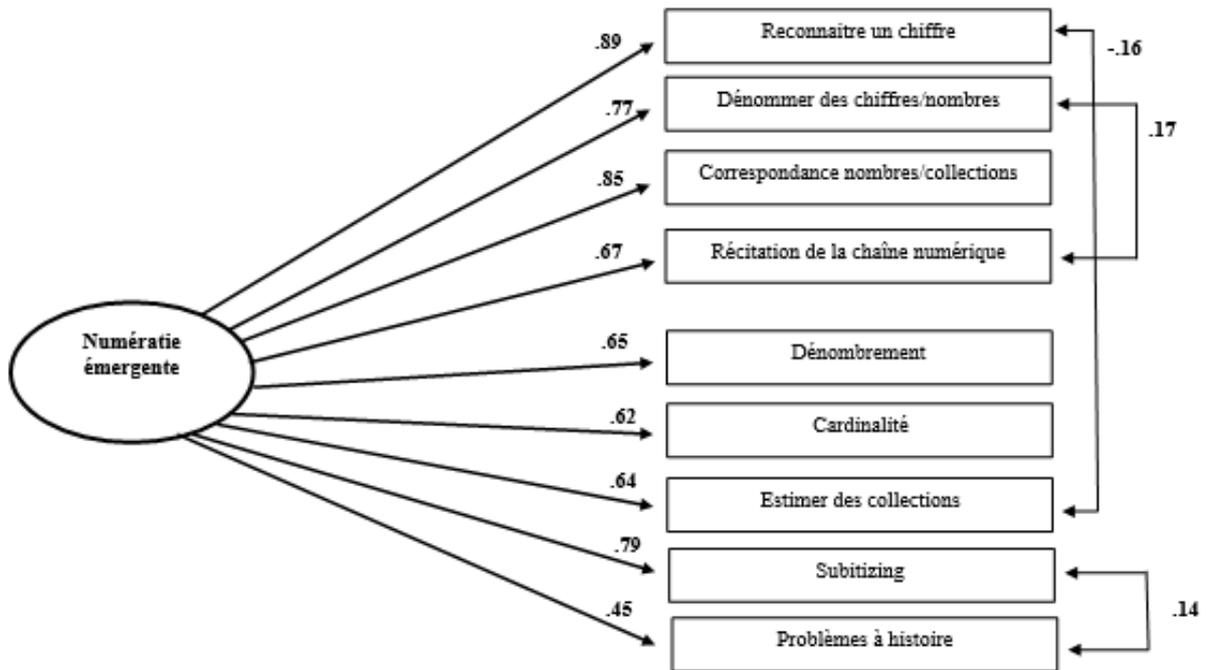


Figure 12. Analyse factorielle confirmatoire (modèle unifactoriel) des épreuves en numératie émergente (N=167)

$\chi^2 = 48.87$ pour 24 degrés de liberté; $p = 0.01$; RMSEA (résidus) = 0.079; CFI = 0.969; NFI = 0.953

La validation de ces épreuves permet donc de fournir un test en langue française mesurant la plupart des compétences en numératie émergente développées durant la période préscolaire. A terme, cet outil pourra donc être utilisé afin de mieux appréhender les liens entre les différentes compétences en numératie émergente mais aussi pour identifier les compétences et les difficultés des enfants de quatre à six ans. De même, il pourra également être utilisé pour évaluer des interventions spécifiques, informer sur le rythme et le contenu de l'enseignement et guider en fonction des besoins de chaque élève. Pour finir, ces tâches permettent également de comparer les compétences en numératie émergente des élèves français aux recherches internationales.

Early Numeracy Assessment in French Preschool: structural analysis and links with children's characteristics

Aude Thomas¹, Youssef Tazouti¹, Lara Hoareau¹, Christophe Luxembourger¹, Blandine
Hubert¹ and Annette Jarlégan²

¹ Université de Lorraine, 2LPN

² Université de Lorraine, LISEC

Soumis pour publication au *International Journal of Early Years Education*

Abstract:

The development of early numeracy skills in preschoolers is an important predictor of future academic performance. A multiplicity of tasks or tests measure early numeracy skills in the English-language. Nevertheless, no tools are currently in French for evaluating and monitoring the development of young children's early numeracy skills. The present study addressed this situation by creating a set of early numeracy tasks in French. In addition to examining the psychometric properties of those early numeracy tasks, we used multiple regression analyses to examine possible links between early numeracy skills and children's characteristics (sex, age, socioeconomic status). Results obtained on a sample of 167 French kindergarten students (Mean = 5.17 years, Standard Deviation = 0.59) showed the tests to have good psychometric properties. Moreover, model fit for our data were better for a single-factor model than for a two-factor model. In addition, we found links between different dimensions of early numeracy and both children's age and socioeconomic status.

Keywords: Preschool; early numeracy, confirmatory factor analysis

Introduction

Numerous longitudinal studies have shown that early numeracy skills predict future mathematics performance and are positively linked to socioeconomic status (e.g., Duncan et al., 2007; Jordan et al., 2009). Moreover, young children who have difficulty acquiring numeracy skills are more likely to have weaker mathematics skills and to gradually fall behind peers who had stronger early numeracy skills (Aunola et al., 2004).

The acquisition of mathematics skills is currently a hot topic in France, both academically and socially, due to the country's poor showing in two recent international surveys of children's mathematics skills (PISA 2015, OECD; TIMSS 2015, IEA). According to PISA 2015, French children's mathematics abilities are some of the poorest among OECD countries and have declined markedly since 2003. TIMSS 2015 produced similar findings, ranking France bottom among OECD countries. In addition, France has one of the highest levels of socioeconomic inequality in the world and these inequalities are linked to huge disparities in student performance. For example, at age 15, French students from disadvantaged social backgrounds are four times more likely than other students to have difficulties at school (OECD, 2015).

To better understand these difficulties and to reduce them, looking at the early numeracy skills of kindergarten students seems important. The aims of this study were therefore, on the first hand, to describe a new tool comprising some early numeracy tasks and to examine its psychometric properties. On the second hand, we examine links between the dimensions of EN and children's characteristics (sex, age, Socioeconomic Status).

Early mathematics skills

Early mathematics skills cover several domains, including numeracy, geometry, patterning, and problem solving (Jordan et al., 2007; NMAP, 2008; NRC, 2009). Although each

of these early skills is distinct, they develop in interaction in order to build more advanced mathematics skills (Aunola et al., 2004; Purpura et al., 2013). In fact, linking new knowledge to existing knowledge allows children to develop a deeper understanding of mathematics. This process follows clearly identified learning trajectories (Clements, 2007; Clements & Sarama, 2004).

Numerous studies have investigated the learning trajectories involved in developing early mathematics skills (e.g., Fuson, 1988; Gelman & Gallistel, 1978; Sarama & Clements, 2009), while other studies have focused on the connections between early skills and later skills (e.g., Aunio & Niemivirta, 2010). Moreover, it is widely agreed that the transition from informal mathematics knowledge, which is mostly acquired during everyday life, to the skills taught at school is a particularly important moment in developing mathematical knowledge (Ginsburg, 1975; Greenes et al., 2004; Starkey et al., 2004). This transition starts at preschool and kindergarten, when children start learning to write numbers.

Informal numeracy knowledge

The three levels of informal numeracy knowledge

Informal numeracy knowledge consists of skills that are usually learnt before or outside school, often in everyday situations. These skills are characterised by the use of non-conventional techniques and self-invented strategies, rather than conventional symbols and algorithms (Ginsburg, 1977). Although many aspects of informal numeracy knowledge do not require specific instruction at school, the skills involved can be improved by targeted teaching (e.g., Baroody et al., 2009; Siegler & Ramani, 2008, 2009).

Purpura et al. (2013) built on work by Krajewski and Schneider (2009) to identify three levels of informal numeracy knowledge. The first level consists of foundational skills, such as

the ability to differentiate between and compare sets of quantities, and the ability to count verbally. The second level consists of meaningful numbering skills, which involve applying sequential counting to fixed groups by combining one-to-one counting with the cardinal principle and verbal subitizing in order to connect number words to specific quantities (i.e., understand that each number word represents a distinct quantity, e.g., 'three' = ●●●). The third level concerns operations on verbal numbers. In other words, understanding that actions (addition or subtraction) on numbers presented verbally can affect them.

Informal numeracy skills are precursors to the development of formal numeracy skills (Chard et al., 2005; NMAP, 2008).

Enumerating as an informal numeracy skill

Enumerating involves being able to say the number of items in a group. Before children can do this, they have to assimilate a number of principles. Thus, they have to understand that each item in a group is counted only once, that number words are always used in the same order (i.e., one, two, three, four, etc.), and that the last number counted indicates the total number of objects in the group, which relates to the cardinal property of numbers (Gelman & Gallistel, 1978). Enumerating also requires acquiring the oral counting chain at the 'breakable level' in Fuson et al.'s (1982) sequence of four organisational levels.

Finally, being able to count the total number of items is also necessary in order to compare groups when a perceptual estimation is insufficient (Halberda & Feigenson, 2008). The ability to understand these transformations allows children to use enumerating strategies adaptively in order to add and subtract (Baroody, 1985; Griffin, 2004). When trying to solve simple arithmetical problems, young children generally begin by applying concrete representations of the transformations and then counting the result. They then gradually develop the ability to

solve problems mentally and to store certain combinations of numbers in their long-term memories (Baroody, 1987; Fuson, 1982). Number decomposition is another important ability with respect to addition and subtraction. For example, knowing that the number 5 can be decomposed into 1 and 4 or 2 and 3 encourages flexibility when solving problems (Dyson et al., 2011). All of these early numeracy skills are precursors of more advanced formal concepts (NMAP, 2008; NRC, 2009).

Numeral knowledge

Acquiring numeral knowledge begins with learning numeral names, that is, the ability to identify or name Arabic numerals. This knowledge allows children to see the correspondence between written numbers and groups of objects. Children's abilities to identify written numbers and to associate them with words and numerical quantities is a powerful indicator of future formal mathematics skills (Clarke & Shinn, 2004; Chard et al., 2005; Lembke & Foegen, 2009). However, as Baroody and Wilkins (1999) noted, even if learning to read and write the numbers is one of the first steps in developing formal numeracy skills, numeral knowledge cannot be considered either formal or informal knowledge because it does not strictly correspond to any definition of formal or informal numeracy.

Numeral knowledge begins to develop very soon after children start acquiring certain informal numeracy skills, such as verbal counting and the ability to map quantities onto number words (Krajewski & Schneider, 2009; Sarama & Clements, 2009). Once children understand and recognise that numbers are distinct from other symbols (e.g., they can differentiate between numbers and letters), they can start associating numeral names with written symbols. Approximately a quarter of 4-year-olds can identify the numbers from 1 to 9 (Ginsburg &

Baroody, 2003), and some children begin to recognise the first numbers (e.g., 1 and 2) when they are only 18 months old (Fuson, 1988; Mix, 2009; Sarama & Clements, 2009).

Formal numeracy knowledge

Formal numeracy knowledge describes the skills taught at school, including how to use conventional numeral notation (e.g., Arabic numerals and operation signs) and algorithms (Ginsburg, 1977). We do not address this aspect here because French schools do not usually teach these skills until 1st grade.

Links between children's characteristics and early numeracy skills

Children's early numeracy skills are impacted by several personal and situational characteristics. Although some studies of preschoolers have shown differences between boys and girls—for example, Anders et al. (2012) reported an association between child's sex and both initial numeracy skills and rate of progress—most studies of preschoolers have failed to find significant differences between girls' and boys' early numeracy performances (e.g., Aunio & Niemivirta, 2010). Differences seem to appear at the beginning of elementary school, as illustrated by Hutchison et al.'s (2019) finding that girls in 1st grade were ahead of boys in *Counting*, whereas boys were ahead of girls in *Number Line Estimation*.

Socioeconomic status (SES) may also impact early numeracy skills, as children from disadvantaged backgrounds tend to have poorer early numeracy skills than children from more advantaged backgrounds (e.g., DeFlorio & Beliakoff, 2015; Starkey et al. 2004). In addition, correlations have been found between SES and both initial numeracy skills and progress in early numeracy (Anders et al., 2012). Parental education is another significant factor in

regression models explaining one-to-one correspondence, numeral comparison, story problems, and cardinality (Hornburg et al., 2018). Nevertheless, SES is a distal variable whose effect is mediated by other variables, most notably those relating to the home numeracy environment, which plays an important role in the development of early numeracy (e.g., Kleemans et al., 2018; Susperreguy et al., 2020).

Finally, early numeracy skills are strongly linked to a child's age. Hornburg et al. (2018) reported significant correlations between age and several numeracy skills, including one-to-one counting, connecting numerals to quantities, set comparison, numeral comparison, and subitizing. The development of mathematical skills is also linked to age, with these skills becoming increasingly sophisticated as children get older (Aunio & Niemivirta, 2010; Jordan et al., 2006).

Early numeracy learning among French children

Since September 2019, kindergarten has been compulsory for all French children from the age of three. However, because kindergarten is free for children enrolled in France's public-school system, most French three-year-olds attended kindergarten even before this date. One of kindergarten's main objectives is to prepare children for formal literacy and numeracy learning, so children aged three to six follow a national curriculum (MEN, 2015) covering five learning areas, including one entitled "Building the first tools to structure thinking", which focuses on numbers.

Several cross-cultural comparisons of scores on early numeracy measures have noted that Chinese children perform better than their counterparts who speak Indo-European languages such as English or French (Miller et al., 1995; Miura et al., 1993). This may be related to differences in the structure of counting words across languages. In East Asian languages,

decades are constructed from the word for the number of the decade plus the word for ten. French and English sometimes follow this rule, but they also have several irregularities. For example, French has specific words for the numbers up to 17, but then switches to a 10-plus-units structure, as in Chinese (LeFevre et al., 2018). Furthermore, the French word for 20 (*vingt*) is unrelated to the words two (*deux*) or ten (*dix*). French words for 21, 31, 41, 51, 61 and 81 are formed by adding 'and one' (*et-un*) to the decade word (e.g., 21 = *vingt-et-un*). Other numbers within these decades are formed by adding the unit name to the decade name (as in English), so 23 is '*vingt-trois*'. English number names follow a similar format for all the numbers from 20 to 99. In contrast, French names for the decades 70, 80, and 90 are different to the other decades, as 70 is '*soixante-dix*' (sixty-ten), 80 is "*quatre-vingt*" (four-twenty), and 90 is '*quatre-vingt-dix*' (four-twenty-ten). These differences, which make the French counting sequence more complex than the Chinese and English sequences, may explain why French-speaking children acquire the correct sequence of number names more slowly than their English-speaking counterparts (LeFevre et al., 2002).

Present study

Although there are numerous international tests available for measuring preschoolers' early numeracy skills, including the Test of Early Mathematics Ability ([TEMA-3]; Ginsburg & Baroody, 2003) and the Preschool Early Numeracy Skills Screener ([PENS]; Purpura & Lonigan, 2015), there are no equivalent tools in French. In addition, most studies of early numeracy skills published in French have tended to examine individual dimensions of early numeracy and have measured these skills via a variety of instruments, many of which were created to meet the needs of a specific study. As a result, there is no single French-language instrument that simultaneously measures different aspects of early numeracy and that can be

used to monitor the development of kindergarten students' numeracy skills over two years (from age 4 to 5).

Our paper addresses this lack by presenting a tool that assesses several early numeracy skills and examining its psychometric properties. This tool will allow the results of studies conducted in French-speaking contexts to be compared with research carried out in other countries. In addition, we investigated the factorial structure of the dimensions of early numeracy by using confirmatory factor analysis to test two models: a two-factor model with informal numeracy knowledge and numeral knowledge as separate factors, and a one-factor model. As Purpura and Lonigan (2013) noted, very few studies have looked at the factorial structure of early numeracy skills.

Our second aim was to examine links between the individual dimensions of early numeracy and children's characteristics (sex, age, SES). Although numerous studies have assessed the impact of early learning on future skills (e.g., Duncan et al., 2007), links between the different dimensions of early numeracy and between these dimensions and children's sex, age, and SES have rarely been investigated in France.

Method

Participants

We conducted our study in the Lorraine Region of northeast France. Participants were 167 kindergarten students (79 girls and 88 boys), aged between 4.18 and 6.46 years (mean = 5.17 years, standard deviation = 0.59). None of the children in our sample was known to have any developmental difficulties. The children were in eleven classes at three kindergartens that differed in terms of their students' socioeconomic backgrounds. We determined an SES index for each child's family by combining scores for five indicators: father's level of education,

mother's level of education, father's profession, mother's profession, and household income. We collected this information via a questionnaire sent to parents. Parents reported their level of education according to five categories: 1 = pre-high school (Mother = 7%, Father = 3%), 2 = vocational or technical diploma (M = 7%, F = 12%), 3 = high school diploma (M = 15%, F = 9%), 4 = bachelor's degree (M = 45%, F = 42%) and 5 = master's degree and more (M = 26%, F = 34%). They reported their profession with respect to six categories (1 = manual worker to 6 = executive) established by France's National Institute for Statistics and Economic Studies (INSEE: <http://www.insee.fr/>). Parental monthly income was measured on a 6-point scale ranging from 1 = less than €1,000 per month to 6 = more than €4,000 per month. Mean family income was €2,690 (standard deviation = €919). The strong correlations between these five indicators (they ranged from .54 to .78 and were all significant at $p < .01$) justified grouping them together into an SES index for each family. SES indices ranged from 1 to 5.2 (mean = 3.92, standard deviation = 1.14).

Procedure

Evaluation procedure

After obtaining written consent from their parents, we tested the children individually at their kindergarten, in a separate classroom reserved for the purpose. The evaluations were conducted by psychology and education sciences graduate research assistants who had received two half-days' training in administering the tests and who had completed a testing-out procedure. Moreover, they had all participated in a pilot-study conducted in 2017 (see below). Each examiner was provided with an instruction manual explaining how to administer and score the test, which comprised several subtests, each containing several items. Examiners noted the student's response to each item and attributed a score of 1 or 0, depending on whether the

answer was correct or not. If a student made three consecutive errors within a subtest, the examiner moved on to the next subtest.

Measures

Early numeracy tasks

Several French studies have used measures of early numeracy (e.g., Gimbert et al., 2013), but they have tended to cover only certain aspects of early numeracy. Until now, there was no single French-language battery of measures covering all the dimensions of early numeracy and which could therefore be used to monitor students' development over the last two years of kindergarten.

Our tool was divided into nine subtests, each comprising several items assessing a specific early numeracy skill. All the items in a subtest involved one type of task, chosen with reference to existing international assessment tools, most notably TEMA-3 (Ginsburg & Baroody, 2003) and PENS (Purpura & Lonigan, 2015), the French-language TEDI-MATH test (Van Nieuwenhoven et al., 2001), and the French kindergarten curriculum (MEN, 2015), which indicates the skills students must acquire during each year of kindergarten. In France, national assessments have been carried out at the beginning of 1st grade since 2018 (Andreu et al., 2020). Our subtests measured the same skills as these national assessments, but sometimes to a lower level of difficulty. Developing the tests took several months. A pilot study conducted in May-June 2017 with a sample of around 100 students allowed us to examine the psychometric qualities of the test's individual items (i.e., discrimination and difficulty) and select the most relevant among them. We also used this pilot study to check that the tests progressed in difficulty in line with the kindergarten program.

Table 1 describes the early numeracy skills our tool evaluates.

Table 1

Description of the early numeracy skills evaluated

Skill	Description
1. Numeral identification	The child is presented with digits or numbers in a matrix with six possible answers. The child has to point to the digit/number named by the experimenter.
2. Naming numbers	The child has to name digits or numbers as they are presented, one at a time.
3. Verbal counting	The experimenter asks the child to count as high as they can. The task is stopped when the child makes a mistake or counts to 42 without making a mistake.
4. One-to-one counting	The experimenter presents the child with pictures containing groups of 4, 6, or 12 animals, shown either in lines or randomly spaced. The child has to count the animals in each group. One point for is awarded for each picture for which the child correctly counts the number of animals in each group.
5. Cardinality	For each item in the one-to-one counting task, the child has to say how many animals there are in total in the picture, without recounting all the animals. The child gets one point for each correct answer. This task evaluates acquisition of the cardinal principle.
6. Set comparison	In this task, the child has to compare two sets of dots, which are either of similar size or different sizes, and say which set is the larger. This task evaluates the ability to estimate quantities without counting.
7. Subitizing	The experimenter shows the child a set of dots (from 1 to 6), arranged either in a line or randomly, for half a second. The child has to state the exact number of dots.
8. Set to numerals	In the first part of this task, the child has to match a digit (or number) with the correct set of objects. In the second part, the child must match a set of objects with the correct digit (or number).
9. Story problems	The experimenter reads the child a story problem that does not contain any distractors and then asks a simple addition or subtraction question. The child must answer the question.

Results

Preliminary analyses

We calculated total scores for each task by adding the scores for each item. Table 2 shows means, standard deviations, ranges, and Cronbach's alphas for each task. Examination of the univariate normality indices, that is, skewness and kurtosis, showed that the distribution of the data could be considered normal. Skewness indices were all lower than 3.00, the threshold above which data are considered asymmetrical. Kurtosis indices were all lower than 10.00, the threshold above which the normality of a distribution is considered problematic (Kline, 1998).

Table 2

Descriptive statistics and item analyses for the nine early numeracy subtests

	Number of items	Cronbach's alpha	Mean	SD	Range	Skewness	Kurtosis
1. Numeral identification	10	0.88	8.44	2.46	0 – 10	-1.79	2.18
2. Number naming	10	0.91	5.74	3.30	0 – 10	-.150	-1.30
3. Verbal counting	--	--	3.44	1.29	0 – 5	-.26	-.94
4. One-to-one counting	4	0.60	3.25	1.05	0 – 4	-1.23	.63
5. Cardinality	4	0.86	3.59	1.01	0 – 4	-2.60	5.72
6. Set comparison	8	0.69	6.80	1.57	0 – 8	-1.61	3.08
7. Subitizing	18	0.90	9.96	4.66	0 – 18	-.67	-.48
8. Set to numerals	13	0.85	8.92	2.52	0 – 11	-1.69	2.02
9. Story problems	4	0.62	1.04	1.19	0 – 4	1.06	.20

Table 3 shows correlations between the subtest scores, which were all significant at $p < 0.01$.

Table 3

Correlations between the early numeracy subtest scores

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1								
2	0.72**	1							
3	0.58**	0.68**	1						
4	0.59**	0.47**	0.50**	1					
5	0.56**	0.43**	0.37**	0.48**	1				
6	0.41**	0.43**	0.39**	0.40**	0.44**	1			
7	0.66**	0.60**	0.58**	0.46**	0.46**	0.56**	1		
8	0.75**	0.64**	0.57**	0.55**	0.47**	0.54**	0.71**	1	
9	0.33**	0.43**	0.46**	0.25**	0.27**	0.39**	0.49**	0.36**	1

NB. N = 167, **: $p < .01$. 1. Numeral identification; 2. Number naming; 3. Verbal counting; 4. One-to-one counting; 5. Cardinality; 6. Set comparison; 7. Subitizing; 8. Set to numerals; 9. Story problems.

Confirmatory factor analyses of the early numeracy subtest scores

We performed a confirmatory factor analysis on the early numeracy subtest scores by entering the data into LISREL 9.3 software (Jöreskog & Sörbom, 1993). We used the correlation matrix as the basis for all the structural analyses and maximum likelihood as the estimation method. χ^2/df ratios less than 2.0 were taken to indicate a good fit; ratios greater than 2.0 but less than 3.0 were taken to indicate a moderate fit. Comparative Fit Indices (CFI) and Tucker Lewis Indices (TLI) greater than .95 were taken to indicate a good fit, as were root mean square error of approximation (RMSEA) values less than or equal to .05. In addition,

RMSEA values between .05 and .08 were considered to indicate a moderate fit (Jöreskog & Sörbom, 2004).

Our first model tested a two-factor hypothesis (see Figure 1). The first factor was informal numeracy knowledge; the second factor was numeral knowledge. All the tasks saturated significantly on their respective factor. Incorporating correlations between residuals into the model improved the fit but did not modify the model's structure. The fit between the data and the model was satisfactory ($\chi^2 = 51.94$ for 24 degrees of freedom; $p = 0.01$; RMSEA (residuals) = 0.083; CFI = 0.965; NFI = 0.948).

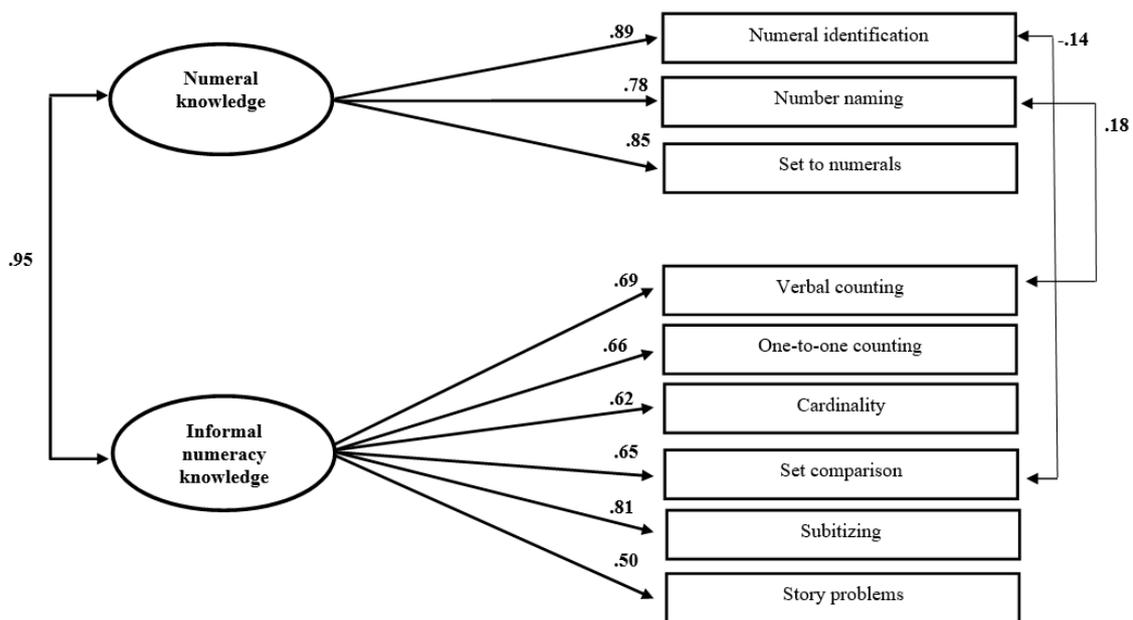


Figure 1

Confirmatory factor analysis (two-factor model) of the early numeracy tasks (N=167).

NB. Ovals indicate latent variables; rectangles indicate measured variables. All values are standardized coefficients. All factor loadings were significant at $p < .001$.

Our second model tested the one-factor hypothesis (see Figure 2). All the tasks saturated significantly on this factor. Incorporating correlations between residuals into the model improved the fit but did not modify the model's structure. The fit between the data and the model was also satisfactory ($\chi^2 = 48.87$ for 24 degrees of freedom; $p = 0.01$; RMSEA (residuals) = 0.079; CFI = 0.969; NFI = 0.953).

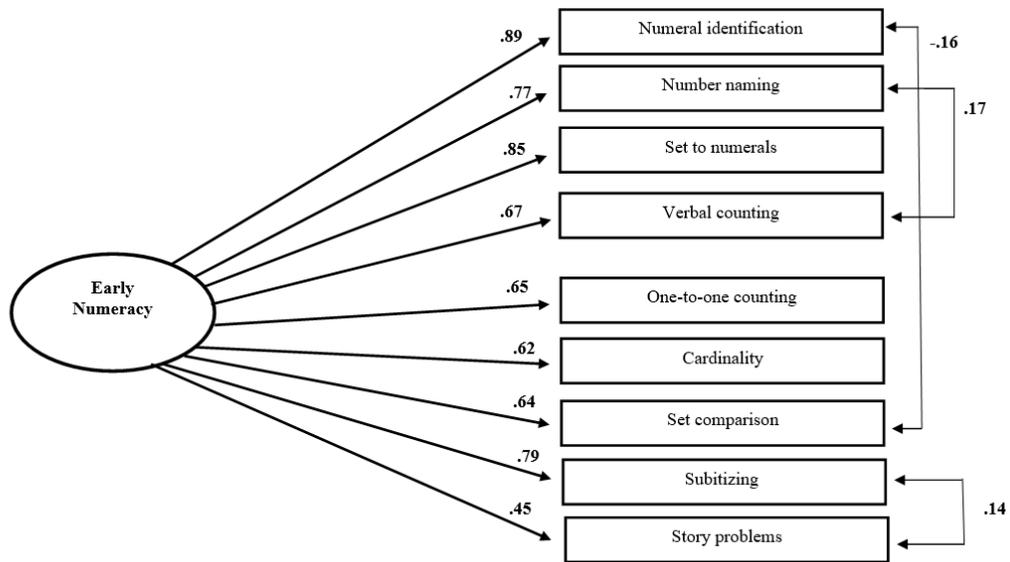


Figure 2. Confirmatory factor analysis (one-factor model) of the early numeracy tasks (N=167).

Although the statistical indicators showed that both models were acceptable, the one-factor model was slightly better than the two-factor model. The extremely high correlation between the two factors is an argument in favour of a one-factor model.

Links between Children's Characteristics and Early Numeracy

As noted in the introduction, very few studies in France have investigated either links between the different dimensions of early numeracy or links between the dimensions of early numeracy and children's characteristics (sex, age, SES). The present study addressed this gap in the literature. We used multiple regression analyses to examine the effect of children's characteristics on their performance on each early numeracy skill. We introduced children's sex, age, and SES as explanatory variables for their scores on nine individual early numeracy skills and total early numeracy scores (see Table 4).

Table 4

Effects of Children's Characteristics on Early Numeracy Scores

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Sex	-.05	-.08	.02	.06	.18*	.24**	.04	.03	-.01	.03
Age	.49**	.54**	.48**	.45**	.31**	.47**	.51**	.50**	.47**	.62*
SES	.13*	.13*	.12	.06	.13*	.13*	.16*	.15*	.24**	.18**
R ²	24%	29%	24%	21%	15%	29%	27%	26%	26%	40%

NB. N = 167; **: p < .01, *: p < .05. Sex (0 = boy, 1 = girl); 1. Numeral identification; 2. Naming numbers; 3. Verbal counting; 4. One-to-one counting; 5. Cardinality; 6. Set comparison; 7. Subitizing; 8. Set to numerals; 9. Story problems; 10. Total Early Numeracy

Children's characteristics explain between 21% and 40% of the variance in early numeracy scores (Table 4). First, we found significant links between age and scores for all the individual numeracy skills, as well as for total early numeracy scores (beta coefficients between

.31 and .62). Second, we found significant links between SES and all of the skills except “Verbal counting” and “One-to-one counting”. The strongest link between SES and early numeracy skills was for “Story problems” ($\beta = .24, p < .01$). Finally, children’s sex was correlated with just two early numeracy skills: “Cardinality” ($\beta = .18, p < .05$) and “Set comparison” ($\beta = .24, p < .01$), with girls outperforming boys on both of these skills.

Discussion

Psychometric properties of our early numeracy tasks

Our study’s primary objectives were to design a tool capable of simultaneously assessing several early numeracy skills and to examine its psychometric properties. Prior to our study, no such tool existed in French. The tool we created covers nine early numeracy skills: numeral identification, naming numbers, verbal counting, one-to-one counting, cardinality, set comparison, subitizing, set to numerals, and story problems. These are the most widely studied early numeracy skills and are predictive of future mathematics skills (e.g., Jordan et al., 2009). Our statistical analyses showed that the tasks have satisfactory psychometric properties.

Our study also used confirmatory factor analyses to examine the underlying factor structure of the different tasks. In the light of theoretical considerations (e.g., Purpura et al. 2013), we initially tested a two-factor model that differentiated between informal numeracy knowledge and numeral knowledge. However, this model did not fit the data as well as a one-factor model. This result is not surprising as the few studies to have investigated the structure of early numeracy tasks have sometimes indicated a two-factor structure (e.g., Aunio et al., 2006; Jordan, et al., 2006) and sometimes a one-factor structure (Clements et al., 2008). Several aspects of early numeracy tasks may explain these inconsistent results, including which early numeracy domains are evaluated, the age of the children tested, and the children’s cultural and

linguistic characteristics. It is important to continue investigating the factorial structure underlying measures of early academic skills in order to improve understanding of the relations between preschoolers' skills (Norwalk et al., 2014). We are continuing our research into this factor structure, notably from a longitudinal perspective, in order to obtain a fuller understanding of how links between preschoolers' skills evolve.

Finally, the creation and validation of these tasks enables results for French students to be compared with those of other countries. For example, the correlations we obtained in our study are similar to those reported by Napoli and Purpura (2015) in the United States.

Links between individual characteristics and early numeracy skills.

Our study reproduced certain classic findings and produced several new results. First, in line with previous findings (e.g., Hornburg, et al., 2018), children's age was linked to performance on all the different dimensions of early numeracy. Second, we found few differences between girls' and boys' performances on the different tasks. This result is consistent with the literature, which indicates few gender differences in the early years of preschool (e.g., Aunio, & Niemivirta, 2010). Third, SES had an impact on performance on most of the early numeracy tasks. Again, this is in line with previous studies (e.g., Hornburg, et al., 2018), which have shown that children from disadvantaged backgrounds are more likely to have poorer early numeracy skills than their peers from more advantaged backgrounds (e.g., DeFlorio & Beliakoff, 2015).

Instructional implications

The tasks we designed can be used in several different ways. First, they can be used in normative evaluations aimed at situating a child's early numeracy skills with respect to the mean for their age group. This type of evaluation considers the development of early numeracy skills over periods of about a year (Marston et al., 1986). Given the speed at which children of preschool age develop, the tasks can also be used to monitor progress in a specific skill. Evaluations of this type require less time and effort and their results can help teachers adapt the content of their teaching to each student's needs (Wilson & Lonigan, 2010).

Limitations and future research

Our work makes two original contributions to early numeracy research in that it presents and validates the first French-language tool for simultaneously measuring several early numeracy skills, and it examines the tool's underlying factor structure, an issue that has rarely been studied, especially in France. Nevertheless, our study has some limitations. For example, our tool does not evaluate all aspects of early numeracy (e.g., counting forward or backward). We are now looking to develop the tool further by improving the existing tasks and including additional tasks. Furthermore, although our sample was quite large, it was not large enough to allow us to conduct other types of analysis, such as comparing the models as a function of children's sex or age.

Conclusion

The French government's desire to reduce learning inequalities, especially in mathematics, led to the launch of the Villani-Torossian Mathematics Plan in 2019. This ambitious plan contains 21 measures aimed at improving mathematics teaching from elementary school to high school (Villani & Torossian, 2019). However, it does not cover *école*

maternelle (kindergarten), the first stage of obligatory schooling in France, even though extensive international research has shown that preschool is a vital period for acquiring early numeracy skills (e.g., Clements & Sarama, 2007; Ramani & Siegler, 2008).

Constructing and validating these tasks creates several new opportunities for EN research in French-speaking contexts. First, it allows to assess and monitor the evolution of kindergartner's early numeracy skills. Using these tasks, teachers will be able to gain a more detailed understanding of their students' skills and thus be able to better guide instruction. Then, these tasks allow us to compare research conducted in other countries with those conducted in the French sample. Finally, it will enable us to continue our research into the links between early numeracy and children's characteristics.

Bibliography

- Anders, Y., Rossbach, H.-G., Weinert, S., Ebert, S., Kuger, S., Lehl, S., & von Maurice, J. (2012). Home and preschool learning environments and their relations to the development of early numeracy skills. *Early Childhood Research Quarterly*, 27(2), 231-244. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2011.08.003>
- Aunola, K., Leskinen, E., Lerkkanen, M., & Nurmi, J. (2004). Developmental dynamics of math performances from preschool to Grade 2. *Journal of Educational Psychology*, 96, 699 - 713. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.96.4.699>
- Aunio, P., & Niemivirta, M. (2010). Predicting children's mathematical performance in grade one by early numeracy. *Learning and Individual Differences*, 20, 427-435. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2010.06.003>
- Aunio, P., Niemivirta, M., Hautomaki, J., Van Luit, J. E. H., Shi, J., & Zhang, M. (2006). Young children's number sense in China and Finland. *Scandinavian Journal of Educational*

Research, 50, 483-502. <https://doi.org/10.1080/00313830600953576>

Baroody, A. J. (1985). Mastery of the basic number combinations: Internalization of relationships or facts? *Journal of Research in Mathematics Education*, 16, 83-98.

<https://doi.org/10.2307/748366>

Baroody, A. J. (1987). *Children's mathematical thinking: A developmental framework for preschool, primary, and special education teachers*. New York, NY: Teachers College Press.

Baroody, A. J., Eiland, M., & Thompson, B. (2009). Fostering at-risk preschoolers' number sense. *Early Education and Development*, 20(1), 80-128.

<https://doi.org/10.1080/10409280802206619>

Baroody, A. J., & Wilkins, J. L. M. (1999). The development of informal counting, number, and arithmetic skills and concepts. In J. V. Copley (Ed.), *Mathematics in the early years* (pp. 48–65). Washington, DC: National Association for the Education of Young Children.

Chard, D. J., Clarke, B., Baker, S., Otterstedt, J., Braun, D., & Katz, R. (2005). Using measures of number sense to screen for difficulties in mathematics: Preliminary findings. *Assessment for Effective Intervention*, 30, 3–14. <https://doi.org/10.1177/073724770503000202>

Clarke, B., & Shinn, M. R. (2004). A preliminary investigation into the identification and development of early mathematics curriculum-based measurement. *School Psychology Review*, 33, 234–248. <https://doi.org/10.1037/h0090531>

Clements, D. H., Sarama, J., & Liu, X. (2008). Development of a measure of early mathematics achievement using the Rasch model: The Research-based Early Math Assessment. *Educational Psychology*, 28, 457 – 482. <https://doi.org/10.1080/01443410701777272>

Clements, D. H. (2007). Curriculum research: Toward a framework for “research-based

curricula". *Journal for Research in Mathematics Education*, 38, 35–70.

Clements, D. H., & Sarama, J. (2004). Learning trajectories in mathematics education. *Mathematical Thinking and Learning*, 6, 81–89.

https://doi.org/10.1207/s15327833mtl0602_1

Clements, D. H., & Sarama, J. (2007). Effects of a preschool mathematics curriculum: Summative research on the Building Blocks project. *Journal for Research in Mathematics Education*, 38, 136 -163.

Cronbach, L. J. (1951). Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*, 22(3), 297-334. <https://doi.org/10.1007/bf02310555>

DeFlorio, L., & Beliakoff, A. (2015). Socioeconomic Status and Preschoolers' Mathematical Knowledge: The Contribution of Home Activities and Parent Beliefs. *Early Education and Development*, 26(3), 319-341. <https://doi.org/10.1080/10409289.2015.968239>

Duncan, G. J., Dowsett, C. J., Claessens, A., Magnuson, K., Huston, A. C., Klebanov, P., . . .

Japel, C. (2007). School readiness and later achievement. *Developmental Psychology*, 43, 1428 -1446. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.43.6.1428>

Dyson, N. I., Jordan, N. C., & Glutting, J. (2011). A number sense intervention for low-income kindergartners at risk for mathematics difficulties. *Journal of Learning Disabilities*, 46(2), 166- 181. <https://doi.org/10.1177/0022219411410233>

Fuson, K.C. (1982). An analysis of the counting-on solution procedure in addition. In T. P. Carpenter, J. M. Moser & T. A. Romberg (Eds.), *Addition and subtraction: A cognitive perspective* (p. 67- 81). Hillsdale, NJ: Erlbaum. <https://doi.org/10.4324/9781003046585-6>

Fuson, K. C. (1988). Children's counting and concepts of number. New York, NY: Springer-Verlag. <https://doi.org/10.1007/978-1-4612-3754-9>

- Fuson, K. C., Richard, J., & Briars, D. J. (1982). The acquisition and elaboration of the number word sequence. In C. Brainerd (Ed.), *Progress in cognitive development. Children's logical and mathematical cognition* (p.33-92). New York: Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9466-2_2
- Gelman, R., & Gallistel, C. R. (1978). *The child's understanding of number*. Oxford, England: Harvard University Press. <https://doi.org/10.2307/748455>
- Ginsburg, H. P. (1975). Young children's informal knowledge of mathematics. *Journal of Children's Mathematical Behavior*, 1, 63–156.
- Ginsburg, H. P. (1977). *Children's arithmetic: The learning process*. Oxford, England: Van Nostrand
- Ginsburg, H. P., & Baroody, A. J. (2003). Test of early mathematics ability (3rd ed.). Austin, TX: Pro-Ed. <https://doi.org/10.1177/073724770503000409>
- Greenes, C., Ginsburg, H. P., & Balfanz, R. (2004). Big math for little kids. *Early Childhood Research Quarterly*, 19, 159–166. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2004.01.010>
- Griffin, S. (2004). Building number sense with Number Worlds: A mathematics program for young children. *Early Childhood Research Quarterly*, 19, 173-180. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2004.01.012>
- Halberda, J. & Feigenson, L. (2008). Developmental change in the acuity of the "Number Sense": The Approximate Number System in 3-, 4-, 5-, and 6-year-olds and adults. *Developmental Psychology*, 44(5), 1457-1465. <https://doi.org/10.1037/a0012682>
- Hornburg, C. B., Schmitt, S. A., & Purpura, D. J. (2018). Relations between preschoolers' mathematical language understanding and specific numeracy skills. *Journal of Experimental Child Psychology*, 176, 84-100. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2018.07.005>

- Hutchison, J. E., Lyons, I. M., & Ansari, D. (2019). More Similar Than Different : Gender Differences in Children's Basic Numerical Skills Are the Exception Not the Rule. *Child Development*, 90(1), e66-e79. <https://doi.org/10.1111/cdev.13044>
- IEA. (2015). TIMSS 2015 International Database webpage <https://timssandpirls.bc.edu/timss2015/advanced-international-database/>
- Jordan, N. C., Kaplan, D., Ramineni, C., & Locuniak, M. N. (2009). Early math matters: Kindergarten number competence and later mathematics outcomes. *Developmental Psychology*, 45, 850 - 867. <https://doi.org/10.1037/a0014939>
- Jordan, N. C., Kaplan, D., Locuniak, M. N., & Ramineni, C. (2007). Predicting first-grade math achievement from developmental number sense trajectories. *Learning Disabilities Research & Practice*, 22, 36–46. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5826.2007.00229.x>
- Jordan, N. C., Kaplan, D., Olah, L. N., & Locuniak, M. N. (2006). Number sense growth in kindergarten: A longitudinal investigation of children at risk for mathematics difficulties. *Child Development*, 77, 153-175. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2006.00862.x>
- Jöreskog, K.G., Sörbom, D., (1993). LISREL 8: Structural Equation Modeling with the SIMPLIS Command Language. Scientific Software International, Chicago, IL.
- Jöreskog, K. et Sörbom, D. (2004). Interactive Lisrel (8.72). Scientific Software International.
- Kline, R. B. (1998). Methodology in the social sciences. Principles and practice of structural equation modeling. New York, NY, US: Guilford Press.
- Krajewski, K., & Schneider, W. (2009). Early development of quantity to number–word linkage as a precursor of mathematical school achievement and mathematical difficulties: Findings from a four-year longitudinal study. *Learning and Instruction*, 19, 513–526. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2008.10.002>

- LeFevre, J.-A., Cankaya, O., Xu, C., & Lira, C. J. (2018). Linguistic and Experiential Factors as Predictors of Young Children's Early Numeracy Skills. In *Language and Culture in Mathematical Cognition* (p. 49-72). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812574-8.00003-1>
- LeFevre, J.-A., Clarke, T., & Stringer, A. P. (2002). Influences of Language and Parental Involvement on the Development of Counting Skills : Comparisons of French- and English-speaking Canadian Children. *Early Child Development and Care*, 172(3), 283-300. <https://doi.org/10.1080/03004430212127>
- Lembke, E., & Foegen, A. (2009). Identifying early numeracy indicators for kindergarten and first-grade students. *Learning Disabilities Research & Practice*, 24, 12–20. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5826.2008.01273.x>
- Marston, D., Fuchs, L. S., & Deno, S. L. (1986). Measuring pupil progress: A comparison of standardized achievement tests and curriculum-related measures. *Assessment for Effective Intervention*, 11, 77–90. <https://doi.org/10.1177/073724778601100203>
- MEN (2015). Programme de l'école maternelle. Bulletin officiel spécial n° 2 du 26 mars 2015. https://cache.media.education.gouv.fr/file/MEN_SPE_2/37/8/ensel4759_arrete-annexe_prog_ecole_maternelle_403378.pdf
- Miller, K. F., Smith, C. M., Zhu, J., & Zhang, H. (1995). Preschool Origins of Cross-National Differences in Mathematical Competence: The Role of Number-Naming Systems. *Psychological Science*, 6(1), 56-60. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1995.tb00305.x>
- Miura, I. T., Okamoto, Y., Kim, C. C., Steere, M., & Fayol, M. (1993). First graders' cognitive representation of number and understanding of place value: Cross-national comparisons: France, Japan, Korea, Sweden, and the United States. *Journal of Educational Psychology*, 85(1), 24-30. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.85.1.24>

- Mix, K. S. (2009). How Spencer made number: First uses of the number words. *Journal of Experimental Child Psychology*, 102, 427–444. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2008.11.003>
- National Mathematics Advisory Panel. (2008). *Foundations for success: The final report of the National Mathematics Advisory Panel*. Washington, DC: US Department of Education.
- National Research Council. (2009). *Mathematics learning in early childhood: Paths toward excellence and equity*. Washington DC: National Academies Press.
- Norwalk, K.E., DiPerna, J.C., & Lei, (P.-W. (2014), Confirmatory factor analysis of the Early Arithmetic, Reading, and Learning Indicators (EARLI). *Journal of School Psychology*, 52, 83 - 96. <https://doi.org/10.1016/j.jsp.2013.11.006>
- OECD. (2015). About PISA. Retrieved from <http://www.oecd.org/pisa/aboutpisa/>
- Purpura, D. J., & Lonigan, C. J. (2015). Early numeracy assessment: The development of the preschool early numeracy scales. *Early Education and Development*, 26, 286–313. <https://doi.org/10.1080/10409289.2015.991084>
- Purpura, D. J., & Napoli, A. R. (2015). Early numeracy and literacy: Untangling the relation between specific components. *Mathematical Thinking and Learning*, 17, 197-218. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.07.004>
- Purpura, D. J., & Lonigan, C. J. (2013). Informal numeracy skills: The structure and relations among numbering, relations, and arithmetic operations in preschool. *American Educational Research Journal*, 50 (1), 178-209. <https://doi.org/10.3102/0002831212465332>
- Purpura, D. J., Baroody, A. J., & Lonigan, C. J. (2013). The transition from informal to formal mathematical knowledge: Mediation by numeral knowledge. *Journal of Educational Psychology*, 105, 453–464. <https://doi.org/10.1037/a0031753>
- 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, 375 – 394. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.01131.x>
- Sarama, J., & Clements, D. H. (2009). *Early childhood mathematics education research: Learning trajectories for young children*. New York, NY: Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203883785>
- Siegler, R. S., & Ramani, G. B. (2008). Playing linear numerical board games promotes low-income children's numerical development. *Developmental Science*, 11, 655–661. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00714.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, 545–560. <https://doi.org/10.1037/a0014239>
- Starkey, P., Klein, A., & Wakeley, A. (2004). Enhancing young children's mathematical knowledge through a pre-kindergarten mathematics intervention. *Early Childhood Research Quarterly*, 19, 99–120. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2004.01.002>
- Susperreguy, M. I., Douglas, H., Xu, C., Molina-Rojas, N., & LeFevre, J.-A. (2020). Expanding the Home Numeracy Model to Chilean children: Relations among parental expectations, attitudes, activities, and children's mathematical outcomes. *Early Childhood Research Quarterly*, 50, 16–28. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2018.06.010>
- Van Nieuwenhoven, C., Noël, M. P., & Grégoire, J. (2001). TEDI-MATH, test diagnostique des compétences de base en mathématiques [TEDI-MATH, diagnostic test of basic skills in mathematics]. Paris, France: Les Éditions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Villani, C., & Torossian, C. (2019). Mission mathématiques : 21 mesures pour l'enseignement des mathématiques. Available at

https://cache.media.education.gouv.fr/file/Fevrier/19/0/Rapport_Villani_Torossian_21_mesures_pour_enseignement_des_mathematiques_896190.pdf

Wilson, S. B., & Lonigan, C. J. (2010). Identifying preschool children at risk of later reading difficulties: Evaluation of two emergent literacy screening tools. *Journal of Learning Disabilities, 43*(1), 62-76. <https://doi.org/10.1177/0022219409345007>

Conclusion

Le développement et la validation d'un outil d'évaluation des compétences des élèves d'âge préscolaire est un long processus nécessitant l'implication de nombreux acteurs. Toute la démarche de co-conception de l'outil a été nécessaire pour être en mesure d'obtenir un outil quantifiant les compétences en littératie et en numératie émergentes des élèves. Dans le cadre du projet LINUMEN, la mesure de ces compétences permettra d'observer la présence ou l'absence d'effets liés à l'expérimentation. Plus globalement, cet outil servira à suivre la progression des élèves de maternelle dans chacune des dimensions évaluées. A terme, cet outil pourra être utilisé par les enseignants pour suivre l'évolution des compétences de leurs élèves et adapter leurs enseignements.

Chapitre 4 : Les applications éducatives et les apprentissages à l'école maternelle : Apports du projet LINUMEN

De plus en plus d'études s'intéressent à l'utilisation des application éducatives dans le contexte scolaire (Aladé et al., 2016; Neumann, 2018; Schacter & Jo, 2016, 2017). Dans certaines conditions les jeux éducatifs peuvent être efficaces pour l'apprentissage des élèves (Ninaus et al., 2017; Schenke et al., 2014; Wouters & van Oostendorp, 2013), en particulier pour les enfants d'âge préscolaire (Aladé et al., 2016; Oliemat et al., 2018; Räsänen et al., 2009; Schacter & Jo, 2016, 2017). Les jeux éducatifs en format numérique peuvent offrir des expériences d'apprentissage positives aux enfants. Cependant, les recherches dans ce domaine semblent indiquer que l'efficacité de ces dispositifs reste encore à prouver en fonction des compétences ciblées (Ke, 2008; Kebritchi et al., 2010; Slavin & Lake, 2008). L'utilisation du numérique favoriserait l'apprentissage individualisé et le rythme personnel des enfants (Aladé et al., 2016). De plus, les diverses modalités proposées par les outils technologiques peuvent aussi aider les enfants à apprendre.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous proposons d'aborder l'utilisation d'une application éducative spécialement conçue pour les élèves de quatre à six ans. Cette application, développée dans le cadre du projet LINUMEN, vise l'apprentissage et le renforcement des compétences en littératie et en numératie émergentes des élèves de moyenne et de grande section de maternelle. Pour finir, dans l'article 3, nous discuterons de l'effet du programme d'intervention LINUMEN sur le développement des compétences des élèves de moyenne et de grande section de maternelle.

4.1. Présentation du projet LINUMEN

4.1.1. Les objectifs du projet

Le projet LINUMEN (Littératie et NUMératie Emergentes par le Numérique) a pour objectif premier de construire et de tester une application sur tablette tactile destinée à soutenir les pratiques des enseignants de maternelle dans le développement des compétences des élèves en littératie et en numératie émergentes. Ce projet se décompose en deux phases principales : une première de co-conception (mars 2017- octobre 2018) et une seconde d'expérimentation en classe (octobre 2018 – juin 2020).

L'application *AppLINO* (Apprendre avec LINO en maternelle) est la résultante d'un travail de co-conception entre différents acteurs du projet, selon une approche itérative qui a permis de modifier et d'améliorer l'outil régulièrement.

Enfin, d'autres objectifs concernent l'analyse des traces (*Learning Analytics*) laissées par les apprenants sur l'application *AppLINO*. L'utilisation des *Learning Analytics* devrait permettre d'améliorer et de personnaliser l'apprentissage des élèves. Ainsi, le comportement individuel de chaque élève face à la tablette sera modélisé afin d'en extraire des modèles comportementaux et d'en dégager des profils d'apprenants. Ces objectifs, liés aux *Learning Analytics*, ne seront pas abordés dans cette thèse.

4.1.2. La phase de co-conception

Lors de la co-conception de l'application éducative *AppLINO*, l'équipe s'est appuyée sur un modèle théorique : le modèle Research, Practice and Design framework (iRPD) de Kucirkova (2017). Kurcirkova constate que peu de chercheurs sont engagés dans la co-conception, le co-développement et l'implémentation d'applications éducatives au sein des écoles et plus particulièrement des classes. Ainsi, dans son cadre théorique, la collaboration entre les différents acteurs est primordiale lors de la création d'une application sur tablette tactile. Peu de modèles offrent une triple collaboration entre utilisateurs, chercheurs et concepteurs d'applications. Ainsi, l'objectif principal du cadre théorique iRPD est de combler ce déficit. Ce modèle se base sur cinq principes clefs : (1) la triple collaboration chercheurs-praticiens-concepteurs, (2) un domaine de connaissance partagé ou épistémologie partagée, (3) la prise en compte des facteurs sociaux, (4) la sensibilisation aux possibilités offertes par l'environnement ou « affordances » et (5) la pédagogie centrée sur l'enfant.

(1) La triple collaboration chercheurs-praticiens-concepteurs permet une meilleure implémentation de l'application dans le milieu souhaité. Dans ce contexte, des discussions, journées d'études ou workshop sont proposées afin de permettre un développement itératif de l'application.

(2) De plus, les trois types d'acteurs engagés dans la conception de l'application, pour collaborer, doivent partager un même socle de connaissances concernant l'environnement d'apprentissage et les compétences des enfants. De cette façon, les différents domaines de connaissances ou de compétences sont partagés entre les chercheurs, les praticiens et les concepteurs d'application.

(3) Le troisième principe de ce modèle se réfère à l'influence des facteurs socio-culturels lors du développement et de la mise en service de l'application. Ainsi, des interactions entre les croyances des divers acteurs de la co-conception, les facteurs sociaux et économiques, les valeurs morales, les normes culturelles et les facteurs politiques peuvent être observées. Tous ces facteurs limitent et soutiennent le système de fonctionnement interne de ce cadre théorique et imprègnent le travail de collaboration des différents acteurs.

(4) Le quatrième principe renvoie aux affordances qui seraient conceptualisées comme des offres de l'environnement, qui ont besoin d'être découvertes et réalisées par l'agent à travers l'action.

(5) Enfin, le cinquième principe fait référence au rôle central et actif de l'enfant dans le développement, la pratique, la recherche et la conception d'application sur tablette. Ainsi, l'enfant est introduit dans les différentes étapes de la recherche et de la conception en tant que co-chercheur.

En prenant appui sur ce cadre théorique, les différents membres du groupe de co-conception ont tous examiné des applications éducatives à destination d'enfants d'âge préscolaire. Cette première étape a ainsi permis d'identifier les éléments clefs de la conception d'une application éducative. En se basant sur les applications répertoriées, le groupe de co-conception a constaté les nombreux inconvénients et avantages des applications disponibles sur les stores. Les défauts majeurs des applications observées résidaient principalement dans le manque d'explicitation de la consigne ou des actions à réaliser par l'enfant, dans le manque de progressivité pour les apprentissages ou encore dans la présence importante d'éléments distrayeurs pour l'enfant.

À la suite de ce travail d'exploration des applications éducatives préexistantes, cinq qualités ont été identifiées pour le développement de l'application *AppLINO* :

1. L'adaptation aux programmes de l'école maternelle (Ministère de l'Éducation nationale, 2015)
2. La progressivité sur cinq périodes de début de la moyenne section à la fin de la grande section
3. Une ergonomie adaptée aux enfants et favorisant l'autonomie
4. Les qualités pédagogiques telles que l'annonce de l'objectif, les feedbacks ou encore les étayages

5. Aspect ludique et la présence d'une mascotte.

L'élaboration de l'application *AppLINO* a engagé de nombreux acteurs ainsi que la startup *LearnEnjoy*² et a duré plus d'une année. Le processus de développement de cette application est présenté plus en détail dans l'article de Hoareau et al (2020) inséré en annexe 2.

4.1.3. La phase expérimentale

Le projet LINUMEN repose à la fois sur une méthodologie quasi-expérimentale et sur une méthodologie longitudinale. Plusieurs critères ont guidé la sélection des écoles comme l'appartenance ou non à un Réseau d'Education Prioritaire (REP) ou la localisation géographique de l'école (urbaine ou rurale) afin de représenter le plus fidèlement possible la diversité des écoles présentes sur le territoire français.

La méthodologie quasi-expérimentale du projet LINUMEN repose sur la comparaison d'un groupe expérimental, dans lequel une intervention spécifique a été mise en place, à un groupe contrôle, dans lequel aucune activité supplémentaire n'est proposée aux élèves et aux enseignants.

* Les écoles du groupe expérimental (GE) ont été recrutées sur la base du volontariat. Pour chaque école, les enseignants de moyenne section et de grande section devaient s'engager simultanément dans le projet afin de pérenniser la continuité du projet. Les élèves du groupe expérimental ont été évalués, à l'aide de l'application *LINUMEN Evaluation*, en début et en fin de moyenne section et devaient être également évalués en fin de grande section. Dans le groupe expérimental, l'application *AppLINO* était utilisée en classe en suivant un protocole précis. En moyenne section, deux périodes ont été programmées durant lesquelles les élèves du GE utilisaient *AppLINO* de façon régulière en suivant une séquence prédéfinie. En grande section, les élèves du GE ont à nouveau suivi trois périodes de stimulation programmées du mois de septembre 2019 au mois d'avril 2020 (voir Figure 13).

* Les écoles du groupe contrôle (GC) ont été sélectionnées sur la base des caractéristiques des écoles du groupe expérimental. Les élèves du groupe contrôle ont été évalués en début et en fin de moyenne section et devaient être également évalués en fin de grande section.

² Startup EdTech *LearnEnjoy*, Entreprise Solidaire reconnue d'Utilité Sociale (ESUS)

Dans le groupe contrôle, les élèves n'utilisaient pas l'application *AppLINO* et aucune autre activité ne leur était proposée en remplacement.

Avant d'entamer la phase d'expérimentation, des accords de consentement ont été distribués afin d'obtenir l'autorisation parentale des élèves concernés par l'expérimentation. Ces accords de consentement visent à expliquer aux parents l'évaluation des élèves et le stockage de leurs résultats. Ils ont été élaborés et validés par l'équipe de recherche conjointement avec les services juridiques de l'Université de Lorraine et du Rectorat. Deux versions distinctes ont été créées : une pour les élèves concernés par les phases de tests et de stimulations (groupe expérimental), et une autre pour les élèves uniquement concernés par la phase de tests (groupe contrôle).

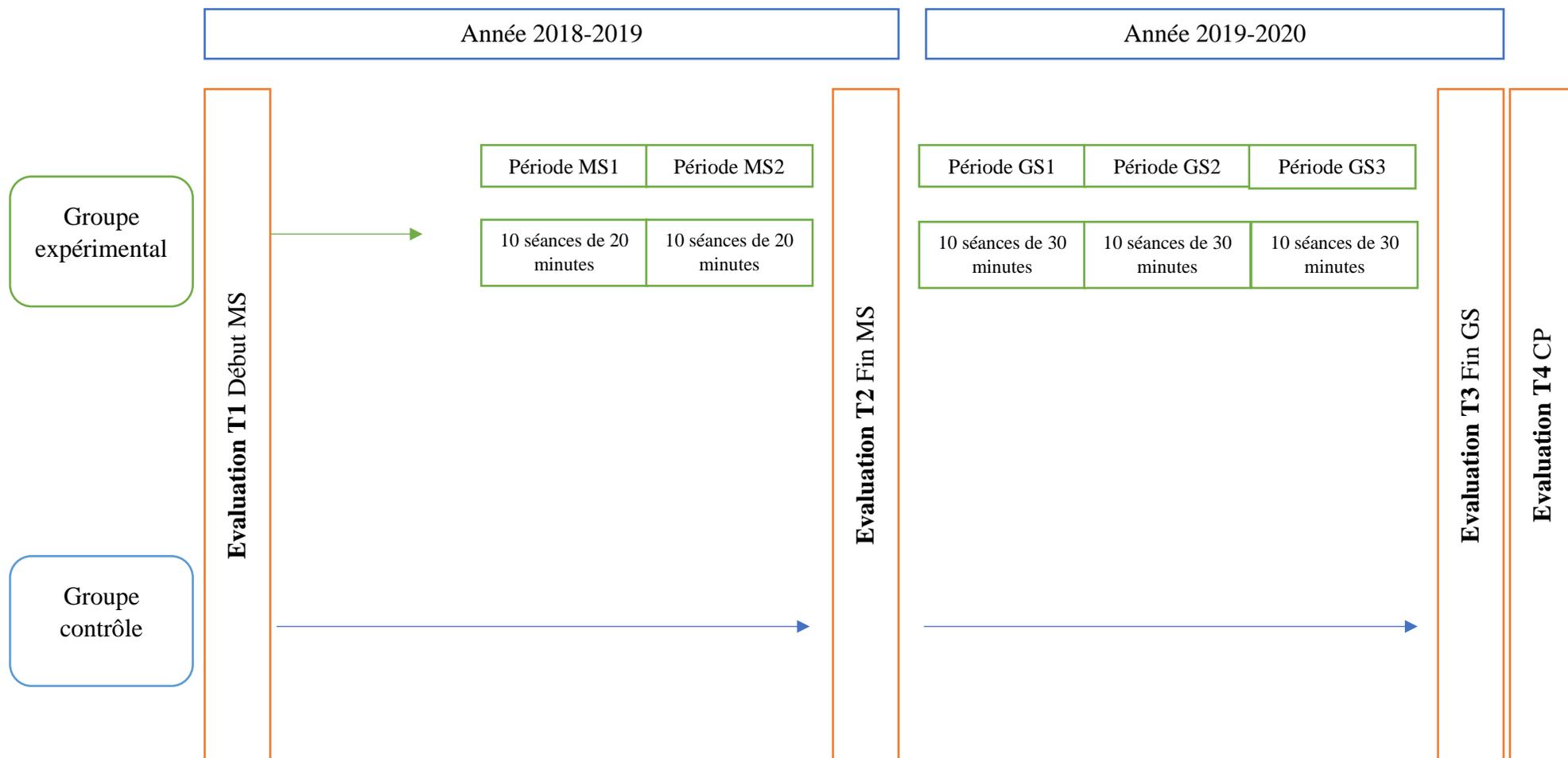


Figure 13. Protocole expérimental du projet LINUMEN

4.1.4. Les mesures réalisées

Dans le cadre du projet LINUMEN, plusieurs mesures ont été réalisées. Cependant, dans le cadre de cette thèse, seules les évaluations de littératie et de numératie émergentes, les mesures du fonctionnement cognitif et les questionnaires socio-économiques des familles ont été utilisés.

a) Evaluation des compétences en littératie et en numératie émergentes des élèves

Tous les élèves, quel que soit leur groupe, ont été testés au début et à la fin de la moyenne section. L'application *LINUMEN Evaluation*, présentée dans l'annexe 1, a été utilisée pour évaluer les compétences en littératie et en numératie émergentes chez tous les élèves.

Pour les élèves du groupe expérimental, des traces ont également été recueillies concernant leur utilisation de l'application *AppLINO*. Ces données livrent, pour chaque élève, des informations relatives au nombre d'essais et erreurs, au temps passé sur chaque activité ainsi qu'à la réponse choisie. Dans le cadre de cette thèse, les traces ne seront pas analysées.

b) Evaluation du fonctionnement cognitif des élèves

Au début de la moyenne section, un test du fonctionnement cognitif a été réalisé par l'intermédiaire des Matrices de Raven (Raven et al., 1995). En effet, ce test est couramment utilisé comme variable contrôle afin d'avoir une mesure de l'intelligence non-verbale de l'enfant. De plus, les fonctions exécutives d'une partie de l'échantillon ont été testées lors des deux temps d'évaluation en moyenne section. Pour cela, nous avons utilisé l'outil HTKS (Head-Toes-Knees-Shoulders ; Ponitz et al., 2009) qui mesure les compétences d'inhibition des enfants d'âge préscolaire.

c) Questionnaires à destination des enseignants

En parallèle, des questionnaires ont été transmis aux enseignants impliqués dans le projet. Ces questionnaires portaient principalement sur les pratiques et croyances enseignantes vis-à-vis du numérique. Pour les enseignants du groupe expérimental, un questionnaire a été élaboré concernant l'acceptance de l'application numérique mise en place dans les classes. Ce questionnaire avait pour vocation d'évaluer l'utilité, l'utilisabilité et l'acceptabilité de

l'application *AppLINO* dans les classes. Enfin, un cahier de suivi a été distribué à chaque enseignant du groupe expérimental afin de suivre l'utilisation et les difficultés rencontrées avec l'application.

d) Observations écologiques en classe

Des observations écologiques ont été réalisées auprès de la plupart des classes du groupe expérimental et contrôle. Ces observations ont été effectuées à l'aide d'un outil standardisé : le *CLASS PRE-K* (Pianta et al., 2008). Cet outil a pour objectif principal de mesurer trois grands domaines : le soutien émotionnel, l'organisation du groupe et le soutien à l'apprentissage.

e) Questionnaires à destination des parents

Des questionnaires ont été transmis aux parents des élèves de l'ensemble de l'échantillon. Ces questionnaires comprenaient deux parties. La première consistait à recueillir des informations socio-économiques sur les familles. La seconde évalue les pratiques et les croyances parentales en lien avec la littératie et la numératie émergentes.

4.1.5. L'utilisation de l'application AppLINO dans les classes

Dans le protocole, l'année de moyenne section a été divisée en deux périodes de cinq semaines chacune. Durant ces cinq semaines, tous les élèves ont bénéficié de deux séances par semaine dont une avec des activités de littératie et l'autre avec des activités de numératie. Toutes les séances suivaient un ordre prédéfini permettant ainsi aux élèves de développer des compétences de plus en plus complexes. La durée de toutes les séances était la même : une séance de moyenne section durait en moyenne 20 minutes. Lors d'une séance, l'élève réalisait deux activités différentes, soit de littératie, soit de numératie. L'enseignant était alors garant du temps : l'objectif des activités n'étant pas que l'enfant termine tous les items, mais qu'il puisse expérimenter chaque activité durant 10 minutes. Durant les deux périodes de moyenne section, les élèves du groupe expérimental ont donc réalisé 10 activités de littératie et 10 activités de numératie réparties en 10 séances de 20 minutes. Les mêmes activités sont réalisées par les élèves lors de la première et de la seconde période de moyenne section : seuls les items changent et la difficulté augmente au fur et à mesure des périodes.

En grande section, le protocole a été reconduit avec quelques modifications. Ainsi, l'année de grande section a été divisée en trois périodes de six à sept semaines chacune. Ces périodes réparties plus équitablement sur l'année ont permis aux enseignants d'avoir plus de latitude concernant la planification des séances, en particulier pour les classes composées uniquement de grande section. Cependant, le nombre de séances de stimulation reste inchangé : pour chaque période tous les élèves ont réalisé au moins 10 séances avec l'application *AppLINO*.

Dans le cadre du projet LINUMEN, les enseignants du groupe expérimental étaient tenus de suivre un protocole spécifique (voir figure 13). L'ensemble des enseignants du groupe expérimental a suivi une formation d'une durée de 18 heures. Cette formation apportait des notions théoriques concernant la littératie et la numératie émergentes ainsi que l'utilisation des outils numériques en classe. D'autre part, cette formation a également permis d'aborder des notions techniques concernant le protocole expérimental et l'utilisation de l'application *AppLINO*. Avant le début de l'expérimentation, l'équipe LINUMEN a fourni aux enseignants un livret résumant toute les notions et les spécificités de l'application éducative *AppLINO*. Concernant l'organisation des séances en classe, les choix pédagogiques ont été laissés libres à l'enseignant. Durant les cinq périodes prédéfinies, les enseignants organisaient physiquement et temporellement les séances comme ils le souhaitaient. Cependant, il était conseillé de faire des séances avec des groupes de quatre à six élèves. Bien qu'il ait été recommandé que l'élève soit autonome lors des séances, un adulte devait être à disposition des élèves afin de réagir rapidement aux possibles bugs de l'application.

4.2. Résultats de l'expérimentation

4.2.1. Description de l'échantillon

La recherche a porté sur 725 élèves scolarisés dans 32 écoles maternelles de Meurthe-et-Moselle. Notre échantillon est constitué de 356 filles et de 369 garçons. Les âges des enfants variaient entre 3,92 et 5,28 années (moyenne = 4,42 ans et écart-type = 0.29) au début de l'expérimentation. Les enfants ayant des troubles avérés du développement (reconnus par la *Maison Départementale des Personnes Handicapées*) n'ont pas été pris en compte dans l'échantillon final. La méthodologie quasi-expérimentale mise en place distingue deux groupes : le groupe contrôle étant composé de 277 élèves et le groupe expérimental de 448 élèves. Les élèves scolarisés en REP représentent plus de 22 % de l'échantillon et sont

proportionnellement répartis entre le groupe expérimental et le groupe contrôle. Le tableau 1 montre qu'il n'existe aucune différence entre les deux groupes.

Tableau 1.

Données démographiques des participants et variables de contrôle dans le GE et le GC

	Groupe		χ^2 ou t-test
	Expérimental (N = 448)	Contrôle (N = 277)	
Sexe (N filles)	223	146	$\chi^2(1,722) = .59, p = .44, ns$
REP	100	63	$\chi^2(1,722) = .02, p = .90, ns$
Age (moyen et ET)	4.43 (.28)	4.41 (.30)	$t(723) = -1.86, p = .29, ns$
SES (moyen et ET)	3.94 (1.38)	4.19 (1.31)	$t(723) = 2.01, p = .05, ns$
Score facteur général d'intelligence	11.07	11.33 (3.34)	$t(723) = 1.02, p = .31, ns$

4.2.2. *Statistiques descriptives des épreuves de littératie et de numératie émergentes*

Les moyennes, écarts-types et alpha de Cronbach pour chaque épreuve de littératie émergente sont présentés dans le tableau 2. Après analyse, l'épreuve « Reconnaître et discriminer une syllabe dans un mot » a été supprimée car elle ne montrait pas de coefficients statistiques satisfaisants. Toutes les autres épreuves de littératie émergente évaluées en début et en fin de moyenne section présentent des alphas de Cronbach satisfaisants (supérieurs à .70).

Pour les épreuves en numératie émergente, les moyennes, les écarts-types et alpha de Cronbach sont présentés dans le tableau 3. Après analyse, l'épreuve de sériation des quantités n'était pas satisfaisante statistiquement : elle a donc été supprimée. Pour toutes les autres épreuves en numératie émergente évaluées en début et en fin de moyenne section, les alphas de Cronbach sont tous satisfaisants (supérieurs à .70).

Tableau 2.
Statistiques descriptives des épreuves en littérature émergente

	Nombre d'items	Début MS			Fin MS		
		M	SD	Alpha de Cronbach	M	SD	Alpha de Cronbach
Reconnaître une lettre isolée (CLRL)	14	.26	.22	.84	.42	.24	.85
Dénommer oralement des lettres (CLDL)	10	.40	.38	.93	.63	.36	.92
Comprendre des consignes simples (CCSTCE)	8	.79	.27	.79	.87	.20	.73
Reconnaître des mots courants (VMC)	14	.44	.21	.76	.54	.21	.76
Identifier des rimes (CPIR)	10	.29	.25	.77	.44	.32	.86
Comprendre consignes simples orga spatiale (CCSOS)	8	.57	.29	.78	.68	.29	.80
Reconnaître et discriminer une syllabe dans un mot	8	.36	.23	.54	.40	.26	.67
Fluence verbale sémantique (FVS)	2	.21	.14	-	.27	.14	-
Enlever la syllabe de la fin du mot (CPESF)	8	.16	.25	.87	.29	.28	.84
Dénommer des parties du corps (VPC)	10	.29	.26	.81	.42	.28	.82
Comprendre des textes courts (CTC)	8	.38	.37	.90	.57	.36	.89
Enlever la syllabe du début du mot (CPESD)	8	.06	.16	.82	.15	.23	.84
Prononcer oralement le son des lettres (CLSL)	8	.17	.27	.88	.31	.35	.90
Inverser les syllabes d'un mot (CPIS)	8	.03	.16	.98	.11	.29	.97
Comprendre des inférences à partir de textes courts (CIO)	8	.35	.34	.88	.51	.32	.85

Tableau 3.
Statistiques descriptives des épreuves en numératie émergente

	Nombre d'items	Début MS			Fin MS		
		M	SD	Alpha de Cronbach	M	SD	Alpha de Cronbach
Reconnaître un chiffre en écriture normale (CCEN)	12	.46	.32	.99	.67	.28	.88
Dénommer des chiffres / nombres (CCDC)	10	.23	.25	.86	.42	.28	.87
Récitation de la chaîne numérique (RCN)	-	.33	.24	-	.50	.28	-
Subitizing (SUB)	18	.25	.25	.91	.49	.27	.91
Savoir résoudre des problèmes à histoire (OPH)	8	.18	.20	.66	.34	.28	.79
Dénombrer une collection (ordinalité) (ORDINAL)	6	.49	.34	.83	.69	.29	.76
Dénombrer une collection (cardinalité) (CARDINAL)	6	.51	.41	.91	.71	.33	.85
Faire correspondre des collections avec des nombres (DCCN)	6	.53	.32	.72	.73	.29	.77
Faire correspondre des nombres avec des collections (DCNC)	6	.51	.29	.69	.70	.27	.71
Estimer des collections (DEC)	8	.67	.25	.71	.79	.23	.75
Sérialisation des quantités	6	.39	.26	.56	.52	.27	.60
Sérialisation des nombres écrits (OLSN)	6	.26	.28	.74	.44	.32	.76

Les corrélations entre les différentes épreuves de littératie émergente sont présentées dans le tableau 4. Toutes les dimensions sont corrélées de manière significative à $p=0.01$. Certaines corrélations sont plus fortes que d'autres. Nous constatons par exemple une très forte corrélation (.81) entre les épreuves de reconnaissance (CLRL) et dénomination des lettres (CLDL). De la même manière, les épreuves de compréhension de textes (CTC) et d'inférences (CIO) sont corrélées (.63). Plus généralement, les plus fortes corrélations sont observées entre les épreuves se rapportant à un même facteur. De même, des liens importants sont observés entre les épreuves de compréhension et celles de vocabulaire, ce qui montre que ces épreuves renvoient au langage oral.

Tableau 4.
Matrice de corrélations des épreuves de littératie émergente (début MS)

T1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1. CLRL	1												
2. CLDL	.81	1											
3. CCSTCE	.27	.25	1										
4. VMC	.33	.30	.42	1									
5. CPIR	.26	.22	.26	.27	1								
6. CCSOS	.35	.33	.50	.50	.31	1							
7. FVS	.29	.31	.34	.39	.25	.43	1						
8. CPESF	.34	.29	.30	.33	.32	.34	.34	1					
9. VPC	.38	.37	.35	.42	.31	.48	.40	.40	1				
10. CTC	.33	.33	.44	.52	.34	.56	.45	.38	.51	1			
11. CPESD	.30	.29	.21	.22	.31	.26	.26	.49	.35	.34	1		
12. CLSL	.59	.55	.19	.28	.24	.27	.30	.33	.35	.30	.35	1	
13. CPIS	.28	.25	.13	.21	.29	.19	.20	.38	.30	.23	.56	.35	1
14. CIO	.34	.34	.38	.43	.28	.45	.42	.40	.52	.63	.29	.33	.25

NB. $N = 725$; toutes les corrélations sont significatives à .01

Les corrélations entre les différentes épreuves en numératie émergente sont présentées dans le tableau 5. Toutes les dimensions sont corrélées de manière significative à $p=0.01$. Globalement, les corrélations observées entre les épreuves en numératie émergentes sont plus importantes que celles observées entre les épreuves de littératie émergente. Les épreuves d'estimation comparative (DEC) et de problèmes à histoire (OPH) montrent les plus faibles corrélations avec les autres épreuves. Les épreuves de reconnaissance (CCEN) et de dénomination des chiffres (CCDC) sont les épreuves les plus fortement corrélées (.76). Pour les autres épreuves, des corrélations modérées sont observées entre celles-ci.

Tableau 5.

Matrice de corrélations des épreuves de numératie émergente (début MS)

T1	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1. CCEN	1										
2. CCDC	.76	1									
3. RCN	.62	.68	1								
4. SUB	.57	.59	.56	1							
5. OPH	.33	.37	.37	.39	1						
6. ORDINAL	.51	.48	.58	.52	.29	1					
7. CARDINAL	.50	.47	.53	.51	.34	.71	1				
8. DCCN	.54	.47	.47	.51	.33	.49	.50	1			
9. DCNC	.59	.53	.50	.53	.30	.48	.47	.53	1		
10. DEC	.30	.23	.33	.34	.25	.36	.39	.35	.33	1	
11. OLSN	.52	.54	.49	.44	.33	.38	.38	.47	.42	.29	1

NB. N = 725 ; toutes les corrélations sont significatives à .01

4.2.3. Analyses factorielles confirmatoires

Des analyses factorielles confirmatoires ont été effectuées, à l'aide du logiciel LISREL 9.3 (Jöreskog & Sörbom, 1993), tout d'abord sur les scores aux épreuves de littératie émergente puis sur les scores aux épreuves en numératie émergente. Toutes les analyses structurales ont été réalisées en utilisant les matrices de corrélations (voir tableaux 4 et 5) comme base d'analyse et le maximum de vraisemblance comme méthode d'estimation.

Pour la structure factorielle des épreuves de littératie émergente, deux modèles factoriels ont été testés. Le premier modèle regroupait les épreuves en trois facteurs (connaissance des lettres, conscience phonologique et langage oral) et le second modèle en quatre facteurs (connaissance des lettres, conscience phonologique, vocabulaire et compréhension). Les deux modèles ont montré de bonnes propriétés psychométriques, cependant les indicateurs de modèle à trois facteurs étaient légèrement meilleurs. Ce modèle (voir figure 14) a mis en exergue trois facteurs de premier ordre et un facteur de second ordre pour les épreuves de littératie émergente. Ce qui met en évidence un lien entre les trois dimensions (connaissance des lettres, conscience phonologique, langage oral). Toutes les épreuves saturant de manière significative sur leur facteur respectif. L'adéquation des données au modèle est satisfaisante ($\chi^2 = 259$ pour 75 degrés de liberté ; $p = 0.01$; RMSEA (résidus) = 0.06 ; CFI = 0.96 ; NNFI = 0.95).

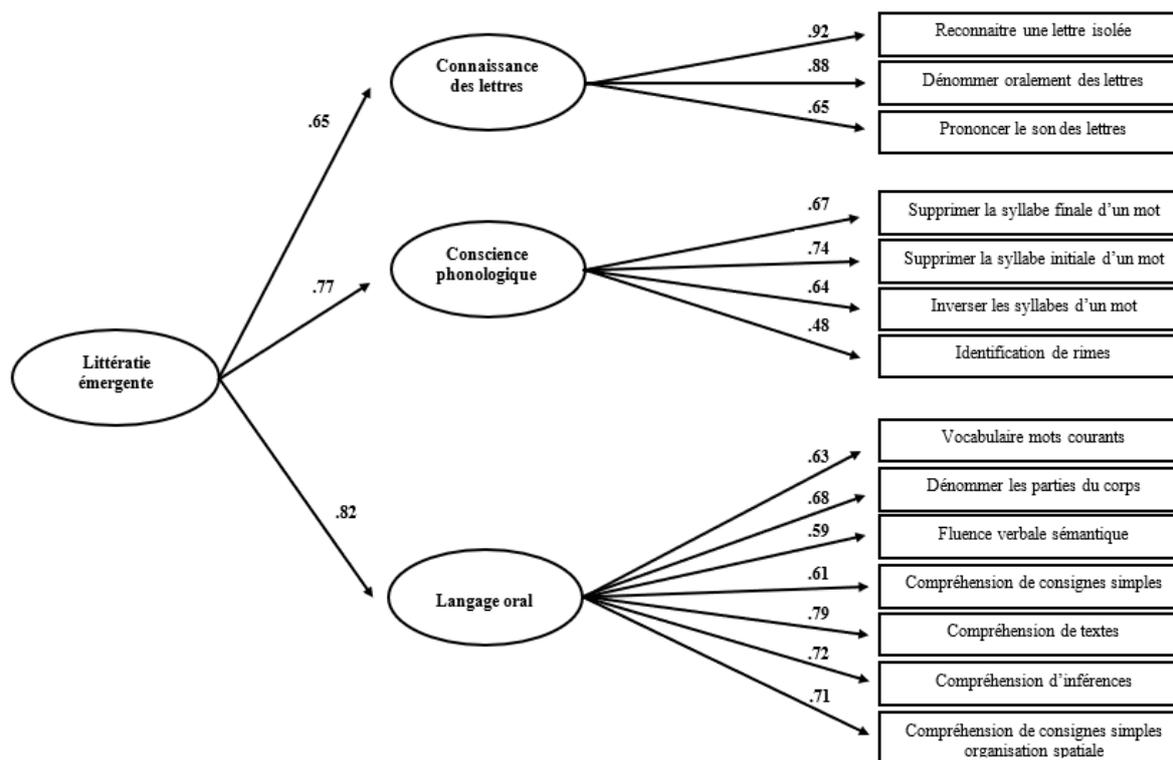


Figure 14. Analyse factorielle confirmatoire des épreuves en littératie émergente (début MS)

De même, afin de tester la structure factorielle des épreuves en numératie émergente, plusieurs modèles ont été testés : un modèle unifactoriel et un modèle avec trois facteurs. Cependant, les analyses réalisées ont montré que le modèle unifactoriel était celui présentant les meilleurs indicateurs statistiques que ce soit en début ou en fin d'année de moyenne section. Ce modèle (voir figure 15) démontre l'aspect unidimensionnel de la numératie émergente. L'adéquation des données au modèle est satisfaisante ($\chi^2 = 184$ pour 42 degrés de liberté ; $p = 0.01$; RMSEA (résidus) = 0.07 ; CFI = 0.96 ; NNFI = 0.95).

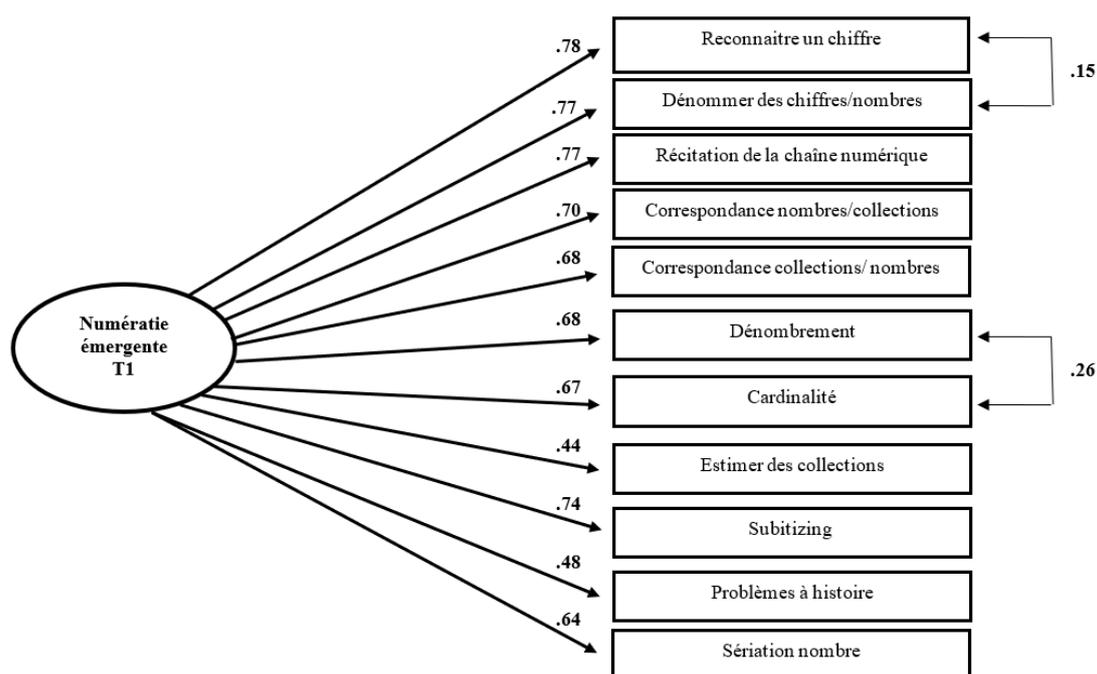


Figure 15. Analyse factorielle confirmatoire des épreuves en numératie émergente (début MS)

Afin de ne pas alourdir la présentation des résultats, seules les matrices de corrélations et les analyses factorielles concernant les données de début de moyenne section seront présentées. Cependant, les corrélations observées en fin de moyenne section étaient sensiblement les mêmes qu'en début d'année. De même, les analyses factorielles réalisées sur les données de fin de moyenne section confirment les résultats obtenus sur les données de début de moyenne section avec un modèle à trois facteurs pour la littératie émergente et un modèle unifactoriel pour la numératie émergente.

Tableau 6.

Matrice de corrélation entre les scores globaux de littératie et de numératie émergentes en début en en fin d'année de moyenne section

	TOTNUM	TOTLITT	TOTNUM2	TOTLITT2
TOTNUM	1			
TOTLITT	.76	1		
TOTNUM2	.76	.66	1	
TOTLITT2	.72	.83	.76	1

NB. N = 725 ; toutes les corrélations sont significatives à .01

Des corrélations importantes (voir tableau 6) ont été observées entre les scores totaux en littératie et en numératie émergentes au début et à la fin de la moyenne section. Toutes les corrélations observées sont significatives à 0.01. En début et en fin d'année, les compétences en littératie et en numératie émergentes sont corrélées à .76

4.2.4. Effet de l'intervention

4.2.4.1. Comparaisons de moyennes

Tout d'abord, nous constatons que l'ensemble des élèves de notre échantillon a progressé entre le début et la fin de la moyenne section. La progression des élèves de notre échantillon est plus nette en numératie. Les élèves du groupe expérimental montrent une évolution de leurs compétences en littératie et en numératie émergentes plus importante que pour ceux du groupe contrôle (voir figure 16).

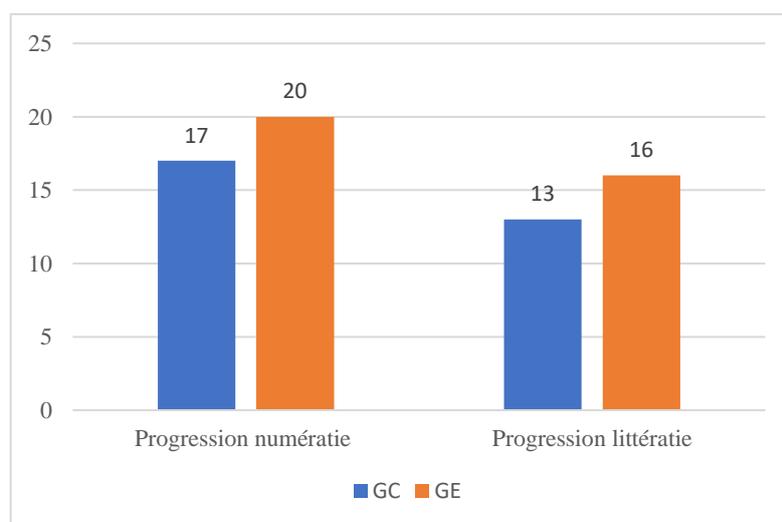


Figure 16. Différences entre les scores moyens de littératie et de numératie émergentes entre le début et la fin d'année de moyenne

En comparant les moyennes des deux groupes (groupe contrôle et groupe expérimental), aucune différence significative n'est constatée pour les compétences en numératie émergente en début d'année, c'est-à-dire avant que l'expérimentation ne débute. Cependant, les élèves du groupe contrôle avaient significativement de meilleures compétences en littératie émergente au début d'année que les élèves du groupe expérimental (voir tableau 6). Une seconde évaluation des compétences des élèves a été réalisée en fin d'année de moyenne section, c'est-à-dire

quelques mois après le début de l'expérimentation. A ce moment, aucune différence n'a été observée entre les compétences des élèves du groupe expérimental et celles des élèves du groupe contrôle (voir tableau 7).

Tableau 7.

Comparaison de moyennes des performances de littératie et de numératie émergentes en début et en fin d'année de moyenne section selon le groupe

T1	Groupe	Moyenne	Ecart type	t	p (Bilatéral)
Total numératie	GE	0,40	0,21	-,03	,98
	GC	0,40	0,20		
Total littératie	GE	0,31	0,16	1,95	,05
	GC	0,33	0,17		
T2					
Total numératie	GE	0,60	0,21	-1,47	,14
	GC	0,57	0,20		
Total littératie	GE	0,44	0,19	-,21	,83
	GC	0,44	0,17		

Sur la base de ces résultats préalables, d'autres analyses ont été effectuées. Ainsi, l'échantillon a été divisé selon la variable « type d'école » pour comparer d'une part les résultats des élèves scolarisés hors REP et d'autre part, les résultats des élèves scolarisés en REP.

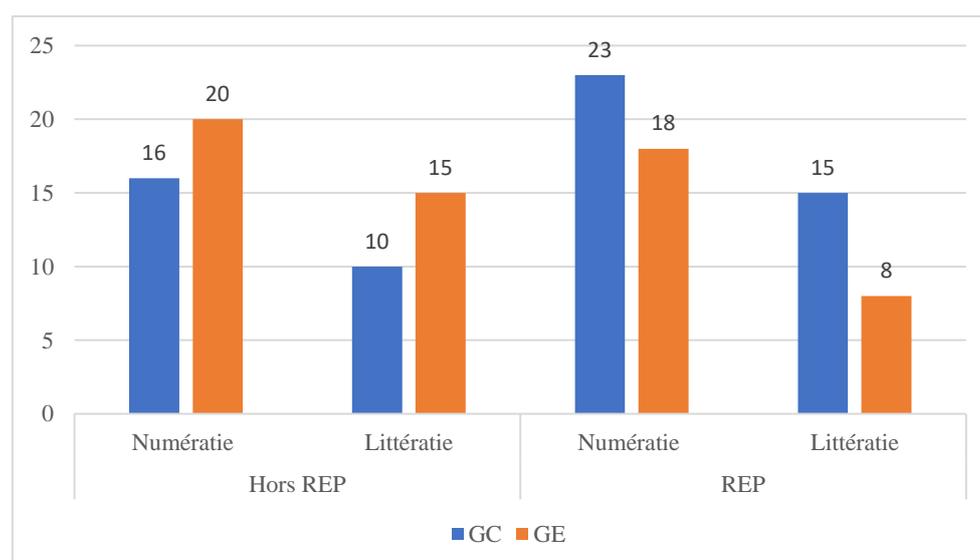


Figure 17. Progression des scores des élèves durant l'année de moyenne section en fonction du type d'école et des compétences en littératie et en numératie émergentes

D'un point de vue descriptif, nous pouvons constater que les élèves du groupe expérimental non scolarisés en REP progressent en moyenne plus que ceux du groupe contrôle (voir figure 17). Tandis que pour les élèves scolarisés en REP, nous observons des résultats opposés : les élèves du groupe contrôle ont plus progressés que les élèves du groupe expérimental.

Pour les enfants scolarisés en milieu ordinaire (hors REP), aucune différence n'est observée en début d'année. Cependant, en fin d'année, les élèves du groupe expérimental ont obtenu de meilleurs résultats que les élèves du groupe contrôle (voir tableau 8). Ces différences ont été observées pour les compétences en littératie émergente ainsi que pour les compétences en numératie émergente. Lorsque ces analyses ont été réalisées avec les élèves scolarisés en REP, des résultats opposés ont été remarqués. Ainsi, en fin d'année, les élèves du groupe expérimental ont significativement de plus faibles compétences que les élèves du groupe contrôle (voir tableau 9).

Tableau 8.

Comparaison de moyennes des performances des élèves scolarisés hors REP

T1	Groupe	Moyenne	Ecart type	t	p (bilatéral)
Total numératie	GE	0,43	0,21	-0,34	0,73
	GC	0,42	0,20		
Total littératie	GE	0,33	0,16	1,62	0,11
	GC	0,35	0,17		
T2					
Total numératie	GE	0,63	0,19	-2,99	0,00
	GC	0,58	0,20		
Total littératie	GE	0,48	0,17	-2,08	0,04
	GC	0,45	0,17		

Tableau 9.

Comparaison de moyennes des performances des élèves scolarisés en REP

T1	Groupe	Moyenne	Ecart type	t	p (bilatéral)
Total numératie	GE	0,31	0,18	0,72	0,47
	GC	0,33	0,18		
Total littératie	GE	0,23	0,13	1,62	0,11
	GC	0,26	0,13		
T2					
Total numératie	GE	0,49	0,24	2,11	0,04
	GC	0,56	0,20		
Total littératie	GE	0,31	0,18	3,32	0,00
	GC	0,41	0,17		

4.2.4.2. Analyses de régressions multiniveaux

Les résultats présentés précédemment sont purement descriptifs. Afin de prendre en compte le niveau initial de l'élève ainsi que ses caractéristiques (sexe, âge et SES), des analyses de régression multiniveaux seront présentées dans l'article 3. Ces analyses visent à observer l'effet du dispositif sur le développement des diverses compétences en littératie et en numératie émergentes.

Article 3 : Contribution d'une application éducative aux apprentissages en littératie et en numératie émergentes : une recherche quasi-expérimentale

Contribution d'une application éducative aux apprentissages en
littératie et en numératie émergentes : une recherche quasi-
expérimentale

Youssef Tazouti¹, Aude Thomas¹, Lara Hoareau¹, Annette Jarlégan², Christophe
Luxembourger¹, Blandine Hubert¹ et Jean-Paul Fischer¹

¹ Université de Lorraine, 2LPN

² Université de Lorraine, LISEC

Article à soumettre au *Journal of Educational Psychology*

Résumé :

Des travaux récents ont montré que l'utilisation d'applications éducatives dans le contexte scolaire peut renforcer les compétences en littératie et en numératie émergentes des enfants. Les applications éducatives peuvent présenter des nouvelles opportunités d'apprentissage à conditions de posséder des qualités pédagogiques et que leur utilisation en classe soit l'objet d'une programmation pédagogique. Ainsi, cette étude a pour objectif d'examiner la contribution d'une application éducative (AppLINOU) utilisée dans le contexte de la classe aux apprentissages des élèves en littératie et numératie émergentes. L'application AppLINOU a fait l'objet d'une co-conception par une équipe pluri-catégorielle et possède de nombreuses qualités pédagogiques. La recherche a porté sur 725 enfants âgés de 4 à 5 ans. C'est la première en France adoptant une approche quasi-expérimentale au niveau de l'école maternelle. Dans le groupe contrôle les enfants suivaient le programme scolaire habituel. Dans le groupe expérimental les enfants ont utilisé l'application AppLINOU durant 10 semaines. Les analyses de régression multiniveau ont montré que les enfants du groupe expérimental scolarisés dans des écoles hors réseau d'éducation prioritaire ont de meilleures performances en fin d'année que les autres. Des éléments d'explication des effets partiels de l'intervention sont discutés et des pistes d'amélioration sont évoquées.

Mots clefs : application éducative, littératie émergente, numératie émergente, analyses multiniveaux

Keywords: educational app, early literacy, early numeracy, multilevel analysis

Introduction

De nombreuses recherches montrent que les compétences en littératie émergente (LE) et en numératie émergente (NE) sont prédictives des compétences académiques ultérieures (Duncan et al., 2007 ; Jordan et al., 2009 ; National Early Literacy Panel [NELP], 2008). Les enfants qui ont du retard dans les apprentissages émergents continuent généralement à se développer plus lentement que leurs pairs plus avancés et risquent de ne pas rattraper le retard cumulé (e.g. Hooper et al., 2010). Ainsi, des travaux ont proposé des programmes d'intervention dans le contexte scolaire pour renforcer les compétences de LE et NE des enfants par des applications éducatives (e.g. Outhwaite et al., 2019). Ces dernières peuvent présenter des nouvelles opportunités d'apprentissage à conditions de posséder des qualités pédagogiques comme par exemple l'explicitation des consignes ou encore la présence de feedbacks (Hirsh-Pasek et al., 2015) et que leur utilisation en classe soit l'objet d'une programmation pédagogique (Neumann, 2018).

Par ailleurs, plusieurs auteurs soulignent la nécessité de recherches supplémentaires adoptant une approche rigoureuse expérimentale ou quasi-expérimentale pour examiner les liens entre l'utilisation des applications éducatives et les apprentissages des enfants (Cheung & Slavin, 2013 ; Haßler et al., 2015).

1. Littératie et numératie émergentes

1.1. La littératie émergente

La littératie émergente fait référence aux compétences, connaissances et attitudes qui constitueraient des précurseurs développementaux des formes conventionnelles de lecture et d'écriture (Whitehurst & Lonigan, 1998). Pour qu'une compétence de littératie soit qualifiée d'émergente elle doit remplir deux conditions. Tout d'abord, elle doit être présente avant l'apprentissage des compétences conventionnelles de littératie. Ensuite, elle doit être corrélée aux compétences ultérieures de littératie. Lonigan & Shanahan (2009) ont ainsi identifiés onze compétences émergente de LE: (1) la connaissance de l'alphabet ; (2) la conscience phonologique ; (3) la dénomination rapide et automatique des lettres ou des chiffres/nombres ; (4) la dénomination rapide et automatique d'objets ou de couleurs ; (5) l'écriture ou l'écriture du prénom ; (6) la mémoire phonologique ; (7) les concepts sur l'écrit ; (8) la connaissance de

l'écrit ; (9) la préparation à la lecture ; (10) le langage oral ; et (11) le traitement visuel. Parmi ces onze dimensions trois dimensions sont particulièrement prédictives des compétences ultérieures et sont parmi les dimensions les plus étudiées dans la littérature (Catts et al., 2015; Lonigan et al., 2008; Piquard-Kipffer & Sprenger-Charolles, 2013) : connaissance des lettres, conscience phonologique et langage oral.

La connaissance des lettres renvoie à la connaissance du nom et du son des lettres ainsi qu'à l'écriture de lettres isolées et constitue l'un des plus puissants prédicteurs de la réussite ultérieure en lecture (Foulin, 2007 ; Puranik et al., 2013). Tout d'abord, de nombreuses recherches ont montré que la dénomination des lettres est prédictive de la reconnaissance des mots (Negro & Genelot, 2009) et est aussi prédictive des performances ultérieures de compréhension de textes (Schatschneider et al., 2004). Ensuite, la connaissance du son et du nom des lettres de l'alphabet serait également nécessaire au développement de la conscience phonémique (Foulin, 2005). Enfin, la capacité à écrire un plus grand nombre de lettres serait un prédicteur des performances en lecture et en orthographe (Kim et al., 2014).

La conscience phonologique correspond à la détection et à la manipulation des unités sonores du langage oral, comme par exemple l'identification de syllabes, rimes et phonèmes ou encore la suppression de syllabes (Briquet-Duhazé & Rezrazi, 2014). Les compétences en conscience phonologique du jeune enfant apparaissent dans la littérature comme étant le meilleur prédicteur des performances de lecture (*e.g.* Wagner et al., 1994) que ce soit en termes d'acquisition du principe alphabétique (Wagner & Torgesen, 1987), de décodage (Anthony et al., 2007b) ou encore de compréhension. De même, la conscience phonologique est aussi un fort prédicteur des compétences orthographiques (Kim et al., 2014)

Le langage oral renvoie à deux sous-dimensions : le vocabulaire et la compréhension. Le vocabulaire fait référence à l'usage des mots de la langue employés couramment par une personne. Le vocabulaire est l'un des éléments fondamentaux de l'apprentissage de la lecture et de l'écriture. Les élèves ayant de faibles compétences en vocabulaire auraient plus de probabilité de rencontrer des difficultés en lecture et en écriture (Catts et al., 2001; Scarborough, 1998; Whitehurst & Lonigan, 2001). De plus, le vocabulaire joue un rôle important pour les fondements de la compréhension de lecture (Muter et al., 2004; Oakhill et al., 2003). La compréhension correspond quant à elle à l'interprétation par le lecteur de l'information, à l'utilisation de connaissances préalables pour interpréter cette information et à la construction d'une représentation ou d'une image mentale cohérente sur le texte (Kendeou et al., 2007). Les compétences de langage oral sont des prérequis de la lecture de mots et de la compréhension de la lecture (Massonnié et al., 2019; Oakhill et al., 2003). Ainsi, la compréhension orale au

préscolaire a un fort impact sur la compréhension en lecture (Bianco et al., 2010 ; Kendeou et al., 2009).

1.2. La numératie émergente

Les compétences mathématiques précoces regroupent plusieurs domaines comme la numératie, la géométrie, la modélisation et la résolution de problèmes (Jordan et al., 2007; NMAP, 2008; NRC, 2009). Ces compétences précoces, même si elles sont distinctes, se développent en interaction pour construire les compétences mathématiques plus avancées (Aunola et al., 2004; Purpura et al., 2013). Plusieurs auteurs soulignent qu'en reliant les nouvelles connaissances à celles déjà acquises les enfants sont en mesure de développer une compréhension mathématique profonde. Cela s'effectue selon une trajectoire d'apprentissage bien identifiée (Clements & Sarama, 2004). Nous nous intéressons tout particulièrement ici aux compétences de numératie émergente. D'après le modèle proposé par Purpura et al. (2013) l'enfant traverse trois phases : une première phase de connaissances numériques informelles, une seconde de connaissances liées au nombre et une dernière de connaissances numériques formelles.

Les connaissances numériques informelles sont des compétences qui peuvent être acquises avant ou en dehors de l'école et utilisant des techniques non conventionnelles et des stratégies auto-inventées plutôt que des symboles ou des algorithmes conventionnels (Ginsburg, 1977). Purpura et al. (2013) en référence aux travaux de Krajewski et Schneider (2009) ont distingué trois niveaux de développement des compétences numériques informelles. Le premier niveau concerne les compétences de base comme distinguer et comparer des quantités et apprendre la chaîne verbale numérique. Le deuxième niveau correspond au dénombrement. Plus spécifiquement, il s'agit d'appliquer la séquence de comptage à des ensembles fixes via la correspondance terme à terme et de relier des mots de nombres et des quantités spécifiques par l'intermédiaire du principe cardinal (Gelman & Gallistel, 1978) ou de la subitisation. Le troisième est dernier niveau concerne les opérations simples sur des quantités présentées à l'oral comme la résolution de problèmes à histoire.

Le développement des connaissances liées au nombre débute peu de temps après l'acquisition de certaines aptitudes numériques informelles, comme la connaissance la chaîne verbale numérique ou encore la capacité d'associer des quantités à des mots numériques (Krajewski & Schneider, 2009 ; Sarama & Clements, 2009). L'acquisition des mots de nombres, l'identification et la désignation des chiffres arabes ou encore les correspondances

entre chiffres écrits et collections d'objets sont toutes des connaissances liées aux nombres. Dès que les enfants distinguent les chiffres d'autres symboles (par exemple, distinguer chiffres et lettres), ils peuvent commencer à associer des noms aux symboles écrits. A l'âge de quatre ans, environ un quart des enfants peuvent identifier les chiffres de 1 à 9 (Ginsburg & Baroody, 2003). De plus, la capacité des enfants à identifier des chiffres écrits et à les associer à des mots de nombres et à des quantités numériques s'est révélée être un fort prédicteur des compétences mathématiques formelles ultérieures (Lembke & Foegen, 2009).

Les connaissances numériques formelles font référence à des compétences enseignées à l'école et à l'utilisation de la notation numérique écrite conventionnelle ainsi que des algorithmes écrits (Ginsburg, 1977). Cet aspect ne sera pas abordé dans cet article étant donné que ces apprentissages se réalisent essentiellement à partir du CP (*first grade*) dans le système éducatif français.

2. Les applications éducatives sur tablette et les apprentissages des enfants d'âge préscolaire

2.1. Ecran tactile et apprentissages

Les recherches ont montré que les outils numériques peuvent soutenir le développement cognitif et social des jeunes élèves lorsqu'elles sont intégrées à l'enseignement de manière réfléchie (Åberg et al., 2014 ; McCarrick & Xiaoming, 2007 ; Pelletier et al., 2006 ; Voogt & McKenney, 2008). Il a été démontré que les jeunes enfants, lorsqu'ils utilisent les outils numériques dans le cadre de leur programme d'études, développent leurs capacités de réflexion (Ching et al., 2006), participent à des modèles d'interaction positive entre pairs (McCarrick & Xiaoming, 2007 ; Shahrimin & Butterworth, 2001) et s'engagent dans un apprentissage autonome et constructif du langage (Fridin, 2014)

Grace à leurs propriétés ergonomiques, les tablettes tactiles permettent aux enfants d'interagir plus facilement avec le monde numérique dès leur plus jeune âge (Marsh et al., 2015 ; Merchant, 2015). En effet, les tablettes diffèrent des ordinateurs traditionnels par leur poids plus léger et leur caractère transportable. Contrairement aux ordinateurs commandés par souris qui nécessitent un plus grand contrôle de la motricité fine, les enfants dès leur plus jeune âge réalisent des actions tactiles comme taper, glisser ou glisser-déposer. Les caractéristiques multimodales des tablettes (c'est-à-dire, les sons, les animations et le texte) attirent de surcroît l'attention des jeunes enfants de manière multisensorielle en stimulant les sens visuel, auditif, kinesthésique et tactile (Roskos et al., 2014). Ainsi les tablettes éliminent des obstacles

opérationnels et offrent des possibilités d'apprentissage et une interactivité importante au cours des premières années notamment dans la salle de classe (Merchant, 2015 ; Sheehan & Uttal, 2016).

Une série de recherches empiriques a été menée pour déterminer si l'utilisation des écrans tactiles dans le cadre de l'enseignement entraîne une amélioration des résultats d'apprentissage des jeunes enfants. Certaines études ont montré un effet bénéfique sur les résultats d'apprentissage des jeunes enfants (e.g. Papadakis et al., 2018 ; Patchan & Puranik, 2016 ; Schacter & Jo, 2016 ; Wang et al., 2016). D'autres études n'ont pas trouvé d'effet bénéfique sur les résultats d'apprentissage (e.g. Piotrowski & Krcmar, 2017 ; Schroeder & Kirkorian, 2016 ; Zipke, 2017). De même, un certain nombre d'études ont indiqué que l'apprentissage sur écran tactile ne montrait pas de supériorité par rapport à d'autres méthodes d'apprentissage plus traditionnelles, comme l'apprentissage avec des objets physiques (Huber et al., 2016) ou sur papier (Kwok et al., 2016). Par ailleurs, dans de rares études on a trouvé un impact négatif de l'apprentissage par écran tactile sur les performances des enfants (e.g., Parish-Morris et al., 2013).

Xie et al. (2018) soulignent que les recherches sur les effets de l'utilisation des écrans tactiles sur les apprentissages ne se sont pas intéressées aux variables modératrices qui peuvent expliquer l'efficacité ou non des écrans tactiles. Il s'agit par exemple des caractéristiques des enfants (par exemple, âge, sexe), du domaine d'apprentissage considéré ou encore du plan expérimental utilisé dans la recherche. Ainsi, dans leur méta-analyse Xie et al. (2018) montrent que les situations d'apprentissages impliquant l'usage de la tablette sont plus bénéfiques comparativement aux autres situations ne l'utilisant pas. Ils constatent également que, plus un enfant est âgé, plus son apprentissage serait efficace avec la tablette. La tablette s'avèrerait aussi plus efficace dans l'apprentissage des matières technologiques, scientifiques et mathématiques. Enfin, les enfants apprendraient mieux avec la tablette dans un environnement classe plutôt qu'en laboratoire. Griffith et al. (2020), soulignent que les études concernant ce sujet sont hautement hétérogènes. Toutefois, dans leur revue systématique de la littérature, ils trouvent des résultats comparables à la méta-analyse de Xie et al. (2018). Utiliser une application éducative interactive est positive pour le développement des apprentissages des enfants.

2.2. Les applications éducatives sur tablette et les apprentissages en LE et en NE

Un certain nombre d'études montre que les applications éducatives sur tablettes permettent aux jeunes enfants de développer leurs compétences en littératie émergente

(Crescenzi et al., 2014 ; Cubelic & Larwin, 2014 ; Kucirkova et al., 2013 ; Marsh, 2016 ; Neumann & Neumann, 2014, 2015 ; Neumann et al., 2016). Certaines recherches ont montré un impact positif de l'usage des livres électroniques sur le développement des compétences en littératie émergente des enfants telles que la connaissance des lettres, le vocabulaire (De Jong & Bus, 2004 ; Moody, 2010; Neumann, 2018) ou encore sur la conscience phonologique (Chera & Wood, 2003 ; Karemaker et al., 2010 ; Wood et al., 2010).

Concernant la numératie émergente, le travail d'Outhwaite et al. (2017) a montré que l'utilisation d'applications éducatives sur tablette peut constituer une aide individualisée efficace pour le développement des compétences mathématiques précoces. D'autres recherches vont également dans le même sens (*e.g.* Ingram et al., 2016 ; Pitchford, 2015, Schacter & Jo, 2016) et soulignent que les résultats sont positifs lorsque le contenu des applications est basé sur un programme solide et bien construit, adapté au stade de développement de l'enfant. Par ailleurs, certaines recherches récentes ont produit des résultats positifs avec des dispositifs à écran tactile comme outils qui peuvent transformer et enrichir l'apprentissage formel et informel des mathématiques (Larkin & Calder, 2016 ; Melhuish & Falloon 2010 ; Milman et al., 2014 ; Moyer-Packenham et al., 2016).

3. Les conditions d'efficacité des applications éducatives dans le contexte de la classe

De nombreuses applications éducatives ont été développées par des sociétés commerciales et peu par des équipes universitaires (*e.g.* Schacter & Jo, 2016). Même si ces applications présentent quelques qualités éducatives, elles s'avèrent souvent inadaptées à l'environnement de la classe et à l'activité de l'enseignant. Pour pallier ce problème, il est important : 1° de développer les applications éducatives dans une démarche de co-conception ; 2° de doter les applications de qualités pédagogiques favorisant l'apprentissage et 3° de former les enseignants à l'utilisation des applications.

3.1. La co-conception

Kucirkova (2016) a proposé le modèle de co-conception iRPD (*Research, Practice and Design framework*) qui se base sur cinq principes clefs. Le premier principe concerne la triple collaboration chercheurs-praticiens-concepteurs. Cela permet une meilleure implémentation de l'application dans le milieu souhaité. Dans cette perspective, des discussions, journées d'études ou workshops sont proposés afin de permettre un développement itératif de l'application. Le

deuxième principe requiert que les trois types d'acteurs engagés dans la conception de l'application partagent un même socle de connaissances concernant l'environnement d'apprentissage et les compétences des enfants afin de faciliter la communication. Le troisième principe de ce modèle se réfère à la prise en compte des facteurs socio-culturels lors du développement de l'application. Lors de la co-conception, des interactions entre les croyances, les valeurs et les normes des divers acteurs peuvent être observées. Tous ces facteurs limitent ou soutiennent la collaboration entre eux. Le quatrième principe renvoie aux affordances. C'est-à-dire que les membres de l'équipe ont besoin d'utiliser et d'examiner l'outil afin de se rendre compte des possibilités qu'il offre. Par exemple, Pegrum et al. (2013) ont constaté que les tablettes peuvent contribuer à l'enseignement, mais que les enseignants doivent avoir la motivation, le temps et suffisamment d'opportunités pour analyser les affordances des appareils utilisés. Le cinquième principe fait référence au rôle central et actif de l'enfant dans le processus de co-conception. Il est recommandé de lui demander ses retours sur l'application et d'en observer sa prise en main.

3.2. Les qualités pédagogiques des applications éducatives

Pour Hirsh-Pasek et al. (2015), les applications éducatives sur tablette représentent une façon différente et intéressante de faire entrer les enfants dans les apprentissages, notamment à l'école maternelle, tant que leur utilisation fait l'objet d'une réflexion pédagogique. Elles permettent un accompagnement individualisé des élèves en fonction de leurs compétences. Hirsh-Pasek et al. (2015) se basent sur les connaissances issues des sciences de l'éducation afin de définir de quelles façons des applications à destination d'enfants de 0 à 8 ans peuvent avoir un potentiel éducatif. Ils ressortent quatre piliers : l'apprentissage actif, l'engagement, la mise en sens et l'interaction sociale. La qualité des apprentissages est alors d'autant plus garantie lorsque les piliers sont associés à une explicitation de la finalité de ces apprentissages.

L'apprentissage actif se réfère à l'implication cognitive (« mind-on ») de l'enfant dans la tâche qui lui est proposée. Ainsi, les réponses qu'ils donnent ne viennent pas de la simple réaction à un stimulus (« mind-less »). L'application doit offrir à l'enfant un niveau de contrôle approprié lui permettant d'aller à son rythme tout en maintenant son intérêt. L'engagement se réfère à la possibilité que donne la tablette de favoriser l'attention soutenue de l'enfant. Cet engagement est possible, par exemple : 1° en évitant les distractions à l'écran ; 2° en travaillant sur la « responsivité » (réponse immédiate de l'interface à l'action de l'utilisateur) et sur l'ajustement des feedbacks de l'appareil ; 3° ou encore en travaillant la cohérence des tâches

proposées. La mise en sens se réfère à la possibilité que donne l'activité à l'enfant de faire des liens entre ce qu'il apprend et son expérience personnelle, mais aussi d'étendre ses connaissances afin d'élaborer de nouveaux concepts. L'interaction sociale se réfère aux échanges riches que peut potentiellement avoir l'enfant avec ses pairs ou d'autres individus (coopération/collaboration), mais aussi avec les potentiels personnages de l'application *via* l'interaction parasociale.

Il est important également que l'apprentissage se fasse grâce à l'étayage des interactions des enfants avec les tablettes par un adulte ou grâce aux caractéristiques intégrées dans l'application elle-même (Neumann & Neumann, 2016 ; Yelland & Masters, 2007).

3.3. La nécessité de former les enseignants à l'usage des nouvelles technologies

L'introduction des écrans tactiles dans les classes de maternelle a été accompagnée d'un débat sur les intérêts et les risques que cela représente pour les enfants d'âge préscolaire. Des inquiétudes ont été soulevées quant à l'impact du temps d'usage des écrans sur l'apprentissage et le développement des jeunes enfants (Greenfield, 2015; Sigman, 2012). L'*American Academy of Pediatrics* (2016) recommande que le temps d'écran des enfants âgés de 2 à 5 ans soit limité à une heure par jour d'expériences médiatiques de haute qualité (c'est-à-dire, présence de l'adulte et usage actif). Dans ce sens, il est important que les parents et les éducateurs supervisent l'utilisation des écrans afin de favoriser un développement sain (Neumann, 2015). Ces préoccupations ont eu probablement des effets sur les opinions des parents et des enseignants du préscolaire concernant l'intégration des tablettes tactiles en classe (Blackwell et al., 2013 ; Wang & Hoot, 2006), d'où l'intérêt de la formation des enseignants à l'usage des nouvelles technologies.

Dans leur méta-analyse, Archer et al. (2014) soulignent que l'efficacité d'un outil numérique peut être augmentée par l'apport d'une formation et d'une aide aux enseignants. De leur côté, Stockless et al. (2018) montrent que la maîtrise d'un outil numérique par les enseignants impacte son implémentation et son utilisation pédagogique en classe. De même, Yelland (2018) souligne le fait que les nouvelles technologies ne doivent pas être vues comme des remplacements ou en compétition avec les autres outils pédagogiques de la classe. Au contraire, elles doivent être acceptées comme des outils complémentaires à la pratique et offrant des modalités variées d'apprentissage. Ainsi, la formation est un facteur important qui favorise l'acceptance des nouvelles technologies par les enseignants (Alexandre et al. 2018 ; Granić & Marangunić, 2019).

4. La présente étude

4.1. Projet LINUMEN

Cette recherche s'inscrit dans le cadre du projet LINUMEN (Littératie et NUMératie Emergentes par le Numérique). Ce dernier avait comme objectif de développer et de tester une application éducative sur tablette proposant des activités pour développer les compétences en littératie et numératie émergentes d'enfants d'âge préscolaires. Le développement de l'application s'est fait dans une démarche de co-conception entre des chercheurs et des acteurs éducatifs (enseignants, conseillers pédagogiques et inspecteurs de l'éducation nationale). Pour ce faire, nous nous sommes basés sur le modèle de co-conception iRPD (Kucirkova, 2016). Le but étant de proposer une application avec des qualités éducatives adaptées à la fois aux enfants d'âge préscolaire ainsi qu'aux contraintes pédagogiques de la salle de classe de l'école maternelle française. Le travail de co-conception a duré un an et demi et a permis de créer une application éducative sur tablette tactile appelée AppLINO (Apprendre avec Linou en maternelle). Elle fait partie des rares applications françaises développées par une équipe universitaire pour des enfants d'âge préscolaire (*e.g.* Hoareau et al., 2020).

AppLINO comporte vingt activités travaillant différentes compétences de littératie et de numératie émergente. Toutes les activités proposées recouvrent cinq périodes du début de la MS jusqu'à la fin de la GS en proposant des exercices à la difficulté progressive et adaptée à l'âge des enfants. Le passage d'une période à la suivante s'accompagne d'une augmentation du niveau de difficulté. Chaque période comprend en moyenne une quinzaine d'items de difficulté variable. Ces activités présentent des plus-values éducatives proposées essentiellement par une mascotte. Son rôle est d'expliquer à l'enfant ce qu'il va apprendre dans l'activité avant qu'elle ne commence, mais aussi de donner les feedbacks lors des exercices. Dans AppLINO, lorsque l'enfant réussit un item, il reçoit un feedback évaluatif positif et motivant de la part de la mascotte. S'il échoue, il est incité une première fois à recommencer avec un feedback évaluatif négatif et motivant. S'il échoue à nouveau, un étayage lui est proposé. L'objectif étant de l'aider à trouver la bonne solution. Enfin, s'il échoue malgré l'étayage une correction détaillée lui est proposée en tant que feedback correctif.

Les activités de l'application proposent des manipulations simples et adaptées à l'enfant : drag-and-drop et sélection d'image. D'autres fonctionnalités ont été introduites pour rendre le travail de l'enfant pédagogiquement intéressant. Un bouton de validation de la réponse choisie force l'enfant à faire une action supplémentaire qui lui laisse le temps de réfléchir par rapport

au choix de sa réponse contrairement à une validation automatique. De même, un autre bouton permet à l'enfant de réécouter la consigne à tout moment. Par ailleurs, une barre de progression permet à l'enfant de se situer par rapport aux items et lui indique s'il a bientôt terminé l'activité ou non (*e.g.* Hoareau et al., 2020).

4.2. Hypothèses

De nombreuses études ont trouvé un impact positif de l'utilisation des applications éducatives sur tablette tactile sur les apprentissages des enfants notamment en LE et en NE (*e.g.* Outhwaite et al., 2017, Pitchford, 2015). Toutefois, plusieurs auteurs soulignent la nécessité de recherches supplémentaires adoptant une approche rigoureuse expérimentale ou quasi-expérimentale (Cheung & Slavin, 2013 ; Haßler et al., 2015 ; Neumann, 2018). Ainsi, la présente étude se fixe comme objectif principal d'examiner la contribution de l'application APPLINOU utilisée dans le contexte de la classe aux apprentissages des élèves en littératie et numératie émergentes. Ce travail est le premier en France adoptant une approche quasi-expérimentale au niveau du préscolaire. Notre étude à l'instar d'autres interventions a été conçue comme une aide pédagogique supplémentaire de la pratique ordinaire des enseignants (*e.g.* Berkowitz et al., 2015).

Nous faisons deux hypothèses générales. La première consiste à considérer que l'utilisation de l'application AppLINOU dans le contexte de la classe permet aux élèves du groupe expérimental de progresser plus en littératie émergente que les élèves du groupe contrôle. La seconde hypothèse postule le même type de progression en numératie émergente. Dans cette étude nous allons également examiner les effets de l'utilisation de l'application sur les différentes sous-dimensions de la littératie émergente.

5. Méthode

5.1. Protocole expérimental

AppLINOU a été testée selon une méthodologie quasi-expérimentale. Le groupe contrôle (GC) suivait normalement les programmes sans modification ou autres indications pour les enseignants. Dans le groupe expérimental (GE), les enseignants utilisaient l'application AppLINOU avec leurs élèves selon un protocole précis (*cf.* ci-dessous). En raison des contraintes pratiques et éthiques en France, nous avons fait le choix de mener une étude quasi-

expérimentale avec évaluation des performances avant et après au lieu d'un essai contrôlé randomisé (*randomized controlled trial*). Dans les plans quasi-expérimentaux - dans lesquels les participants ne sont pas affectés de manière aléatoire aux conditions expérimentales – l'estimation de l'effet ne peut pas être attribuée à l'intervention avec le même degré de confiance que dans les essais contrôlés randomisés. Plus précisément, un biais d'auto-sélection peut se produire. Toutefois, les plans quasi expérimentaux avec des groupes expérimentaux et des groupes témoins qui sont pré et post-testés peuvent toujours fournir des informations sur l'efficacité d'une intervention (Institute of Education Sciences, IES, 2018). De plus, l'utilisation des analyses multiniveaux (*multilevel analysis*) et l'introduction de la performance moyenne des classes comme variable de niveau 2 (voir session analyse) permettent un contrôle partiel de l'effet enseignant qui pourrait résulter du biais d'auto-sélection (Chetty et al., 2014).

Dans le calendrier scolaire français, une année scolaire se déroule de septembre à juin. L'expérimentation a commencé en février 2019 alors que les élèves étaient scolarisés en moyenne section de maternelle, ce qui équivaut à un âge de 4,5 ans en moyenne. Le protocole réservé au GE consiste à utiliser l'application durant 10 semaines en classe. Chaque élève avait deux activités de littératie et deux activités de numératie par semaine. Toutes les séances suivaient un ordre prédéfini permettant ainsi aux élèves de développer des compétences de plus en plus complexes. La durée d'une activité est fixée de 10 à 15 minutes maximum.

Durant les 10 semaines, les enseignants organisaient physiquement et temporellement les séances comme ils le souhaitaient durant la semaine. Cependant, ils étaient contraints, d'une part, de respecter le calendrier prévu. Et, d'autre part, d'organiser les séances avec des groupes de quatre à six élèves maxima. Bien qu'il ait été recommandé que l'élève réalise les séances en autonomie, l'enseignant devait être à disposition des élèves afin de réagir rapidement à leurs demandes.

5.2. Participants

Recrutement des enseignants

Après avoir obtenu les autorisations de la part des autorités académiques, les enseignants ont été recrutés sur la base du volontariat. Un courrier a été envoyé dans 7 circonscriptions du département pour recruter des enseignants du GE. Il précisait les objectifs et le calendrier de la recherche. Un autre courrier a été envoyé aux enseignants de 4 autres circonscriptions du

département pour recruter les enseignants du GC. Ce courrier évoque comme objet l'étude des liens entre l'environnement familial et les apprentissages des enfants.

Parmi les enseignants volontaires nous avons procédé à un échantillonnage raisonné en prenant deux critères : 1° l'appartenance au milieu rural vs urbain et 2° l'appartenance à des réseaux d'éducation prioritaire (REP) vs non-REP. En France, un certain nombre d'établissements font partie du REP. L'appartenance à ce réseau est déterminée par les faibles résultats des élèves aux évaluations nationales et par le niveau socioéconomique défavorisé des élèves fréquentant ces établissements. Conformément au principe d'équité, ces établissements bénéficient de ressources financières et humaines supplémentaires.

L'ensemble des enseignants du GE a suivi une formation de développement professionnel d'une durée de 10 heures. Cette formation apportait des notions théoriques concernant la littératie et la numératie émergentes ainsi qu'une formation à l'utilisation de l'application AppLINOUE. Avant le début de l'expérimentation, nous avons fourni aux enseignants un livret résumant toutes les notions et les spécificités de l'application éducative AppLINOUE.

Les élèves

Nous avons mené notre étude dans la région Lorraine située au nord-est de la France, qui compte environ 2,4 millions d'habitants. Les participants étaient 725 élèves de maternelle (356 filles et 369 garçons), âgés de 3,92 à 5,28 ans (moyenne = 4,42 ans, écart-type = 0,29) au début de l'expérimentation. Aucun des enfants de notre échantillon n'était connu pour avoir des difficultés de développement. Nous avons déterminé un indice du statut socioéconomique pour la famille de chaque enfant en combinant les scores de cinq indicateurs : le niveau d'éducation du père, le niveau d'éducation de la mère, la profession du père, la profession de la mère et le revenu du ménage. Ces informations ont été recueillies par le biais d'un questionnaire envoyé aux parents. Le niveau d'éducation le plus élevé déclaré par les parents a donné lieu à cinq catégories : 1 = enseignement obligatoire (mère = 13 %, père = 12 %), 2 = diplôme professionnel ou technique (M = 15 %, F = 19 %), 3 = diplôme d'études secondaires (M = 15 %, F = 20 %), 4 = licence (M = 20 %, F = 17 %) et 5 = master et plus (M = 37 %, F = 32 %). La profession du père et de la mère a été classée en six catégories (1 = ouvrier à 6 = cadre supérieur) selon la classification de l'Institut national de la statistique et des études économiques (INSEE ; <http://www.insee.fr/>). Le revenu mensuel des parents a été mesuré sur une échelle de 6 points allant de 1 = moins de 1000 à 6 = plus de 4000 € par mois. Le revenu familial moyen était de 2690 € (écart-type = 919 €). Les fortes corrélations entre ces cinq

indicateurs (elles vont de 0,51 à 0,71 et sont toutes significatives à $p < 0.01$) ont justifié leur regroupement. Le SSE a ensuite été mesuré par la moyenne des cinq indicateurs. Cette moyenne va de 1 à 5,2 (moyenne = 4,02, écart-type = 1,36, étendu 1 - 6,2).

5.3. Procédure d'évaluation

Après avoir obtenu le consentement écrit des parents, nous avons testé les enfants individuellement à l'école maternelle, dans une classe séparée réservée à cet effet. Les évaluations ont été menées par des assistants de recherche diplômés en psychologie et en sciences de l'éducation qui avaient reçu une formation de deux demi-journées à l'administration des tests et qui avaient suivi une procédure de test. Chaque examinateur a reçu un manuel d'administration et de notation. Pour chaque élément du test, l'examineur a noté la réponse de l'élève 1 si elle était correcte et 0 si elle ne l'était pas. Chaque sous-test a été interrompu par l'examineur après trois erreurs consécutives.

Les évaluations ont été administrées en plusieurs séances d'environ 15 minutes, en fonction des ressources attentionnelles de chaque enfant. Le pré-test a eu lieu juste avant l'intervention (en automne) et le post-test a été effectué juste après l'intervention (en printemps). Le temps passation moyen en littératie était de 28 minutes ($s=6$ minutes) en t1 et de 29 minutes ($s=6$ minutes) en t2. Concernant la numératie le temps moyen de 20 minutes ($s=5$ minutes) en t1 et de 21 minutes ($s=5$ minutes) en t2.

5.4. Equivalence entre le GE et le GC

Le tableau 1 montre que les tests t de Student pour des échantillons indépendants n'ont montré aucune différence entre le groupe expérimental et le groupe control en ce qui concerne l'âge, l'origine socioéconomique, le score dans les capacités cognitives générales et l'ancienneté des enseignants (toutes les valeurs de $p > .05$). Des tests χ^2 n'ont montré aucune différence de groupe dans la répartition des sexes et dans le pourcentage des élèves en REP. Il est à noter que 97 % des enseignants sont des femmes. Ce pourcentage ne diffère pas du chiffre national (95%, DEPP, 2019) qui reflète une forte féminisation du métier à ce niveau de scolarité.

Tableau 1.

Données démographiques des participants et variables de contrôle dans le GE et le GC

	Groupe		χ^2 ou t-test
	Expérimental (N = 448)	Contrôle (N = 277)	
Sexe (N filles)	223	146	$\chi^2(1,722) = .59, p = .44, ns$
Age (moyen et ET)	4.43 (.28)	4.41 (.30)	$t(723) = -1.86, p = .29, ns$
SES (moyen et ET)	3.94 (1.38)	4.19 (1.31)	$t(723) = 2.01, p = .052, ns$
Score des capacités cognitives générales	11.07	11.33 (3.34)	$t(723) = 1.02, p = .31, ns$
Pourcentage des élèves en REP	22.3	22.7	$\chi^2(1,722) = .02, p = .90, ns$
Ancienneté des enseignants en année	21.78 (8.21)	19.43 (7.94)	$t(70) = -.98, p = .34, ns$

5.5. Mesures

Littératie émergente

Pour mesurer le niveau des enfants en littératie émergente nous avons utilisé l'Echelle Préscolaire de Littératie Emergente (EPLE, Thomas et al. Sous-presse). Cette échelle est composée de 14 subtests mesurant différentes compétences de LE (*cf.* annexe. 1). Une analyse factorielle confirmatoire a été effectuée sur les scores aux subtests de LE. Le modèle testait une structure avec trois facteurs du premier ordre : connaissance des lettres, conscience phonologique et langage oral. Un facteur du second ordre regroupant les trois du premier ordre. Toutes les épreuves saturant de manière significative sur leur facteur respectif. L'adéquation des données au modèle est satisfaisante ($\chi^2 = 259$ pour 75 degrés de liberté ; $p = 0.01$; RMSEA (résidus) = 0.06 ; CFI = 0.96 ; NNFI = 0.95).

Numératie émergente

Pour mesurer le niveau des enfants en NE nous avons utilisé les 11 subtests en langue française développé par Thomas et al. (Sous presse) (*cf.* annexe. 2). Une analyse factorielle confirmatoire a été effectuée sur les scores aux subtests de numératie émergente. Cette analyse a montré l'aspect unidimensionnel de la numératie émergente : un seul facteur a été retenu. L'adéquation des données au modèle est satisfaisante ($\chi^2 = 184$ pour 42 degrés de liberté ; $p = 0.01$; RMSEA (résidus) = 0.07 ; CFI = 0.96 ; NNFI = 0.95).

Capacités cognitives générales

Pour mesurer les capacités cognitives générales, nous avons utilisé les matrices progressives de Raven (Raven, Court & Raven, 1995). Le score a été introduit comme variable de contrôle dans les modèles de régression. Nous l'avons utilisé également pour écarter de notre échantillon les enfants ayant un développement atypique.

6. Résultats

6.1. Fidélité de l'implémentation

Lors de l'utilisation d'AppLinou par les élèves dans les classes, nous avons enregistré via un dispositif informatique plusieurs informations comme, la nature de l'activité ou encore le temps que les élèves consacrent à chaque activité. Les traces des élèves ont été extraites de l'application et exporté dans un fichier « .csv » pour être ensuite analysées et transformées avec le langage de programmation Python en fichier compatible avec le logiciel SPSS.25. Sur les dix semaines de l'expérimentation, nous avons constaté que 98.4 % des activités prévues en littératie ont été effectuées. Ce chiffre est quasi identique pour les activités de numératie (98.2 %). Les enfants ont passé en moyenne 164.93 minutes sur les activités de littératie (ET = 33.88 minutes, étendu 51.78 - 302.77). Pour les activités de numératie le temps moyen 152.76 minutes (ET = 40.78 minutes, étendu 58.18 - 349.82). Nous n'avons pas constaté de différences dans le temps d'utilisation entre les écoles en REP et hors REP et pas différences non plus en fonction du sexe de l'enfant.

6.2. Analyses préliminaires de l'effet de l'interaction

A titre descriptif, le tableau 2 compare les performances du GC et du GE en T1 et T2 sur l'ensemble de l'échantillon ainsi que sur les sous-échantillons des écoles REP et non REP. On constate que sur l'ensemble de l'échantillon en T2 les différences de moyennes entre le GE et le GC ne sont pas statistiquement significatives. Lorsqu'on scinde l'échantillon en fonction du type d'école, les élèves du GE progressent significativement plus que ceux du GC aussi bien en LE qu'en NE. Pour les écoles de REP c'est le phénomène inverse qui se produit. Ces premiers résultats sont purement descriptifs. Les analyses de régression multiniveaux dans la section

suivante vont nous permettre de contrôler le niveau initial de l'élève ainsi que ses caractéristiques (sexe, âge et SES).

Tableau 2.

Comparaisons des moyennes du GC et GC en LE et en NE en T1 et en T2

	T1			T2		
	GC	GE	t-test	GC	GE	t-test
Total						
Score LE	.33 (.17)	.31 (.16)	ns	.44 (.17)	.44 (.19)	ns
Score NE	.40 (.20)	.40 (.21)	ns	.57 (.20)	.60 (.21)	ns
REP						
Score LE	.26 (.13)	.23 (.13)	ns	.41 (.17)	.31 (.18)	**
Score NE	.33 (.18)	.31 (.18)	ns	.56 (.20)	.49 (.24)	*
Non REP						
Score LE	.35 (.17)	.33 (.16)	ns	.45 (.17)	.48 (.17)	*
Score NE	.42 (.20)	.43 (.21)	ns	.58 (.20)	.63 (.19)	**

6.3. La modélisation multiniveau

Les analyses statistiques standard reposent sur l'hypothèse de l'indépendance des observations. Or pour les données ayant une structure hiérarchique, les individus ne sont pas indépendants étant donné que les personnes d'une même unité ont tendance à être semblables les unes aux autres. Ignorer la structure hiérarchique des données conduit à sous-estimer l'erreur standard et à obtenir de nombreux résultats faussement significatifs (Hox, 2010). Pour éviter les biais d'agrégation et les erreurs écologiques, la modélisation à plusieurs niveaux est nécessaire (e.g. Raudenbusch & Byrk, 2002). Il est important de noter que les analyses de régression à plusieurs niveaux sont également conçues pour contrôler les différences initiales qui sont statistiquement significatives entre les groupes.

Dans la présente étude, des équations de régression à plusieurs niveaux ont été utilisées pour analyser l'impact de l'intervention sur les résultats des élèves au post-test. Cinq variables de niveau 1 relatives aux élèves ont été prises en compte : le score au pré-test, le sexe, l'âge de l'enfant, le statut socio-économique et le score au facteur général de l'intelligence. Au niveau 2, dans un premier temps, quatre variables ont été incluses : la condition expérimentale, le score moyen de la classe au pré-test, la tonalité sociale de la classe (Moyen SES de la classe), et le type d'école. Dans un second temps, une variable d'interaction entre la condition expérimentale et le type d'école a été introduite dans l'équation.

Conformément aux recommandations des spécialistes de la modélisation à plusieurs niveaux (e.g. Peugh, 2010 ; Raudenbush & Bryk, 2002), et afin de faciliter l'interprétation des résultats, nous avons centré et réduit ($m = 0$, $s = 1$) toutes les variables, à l'exception des variables dichotomiques. Comme nous nous sommes surtout intéressés aux différences à l'intérieur des groupes, les variables ont été centrées sur la moyenne du groupe (Enders & Tofighi, 2007). Le logiciel MLwiN 3.05 a été utilisé pour estimer les paramètres (Rasbash et al., 2020). Afin de tester la signification des coefficients de régression, nous avons utilisé le test z pour les variables de niveau 1 et le test t pour les variables de niveau 2 (le nombre de degrés de liberté de t est égal à $N-q-1$, où N est le nombre d'unités de niveau 2 [c'est-à-dire 32 dans cette étude] et q est le nombre de variables explicatives de niveau 2 ; voir Snijders & Bosker, 1999).

Ainsi, les résultats des post-tests ont été analysés à l'aide de trois modèles à plusieurs niveaux : **Modèle 1** : modèle nul (ou modèle inconditionnel) sans des variables explicatives. Ce modèle nous a permis de diviser la variance totale du score en deux parties additives, correspondant à la variance inter-école et intra-école.

Modèle 2 : Nous avons introduit dans le modèle toutes les variables explicatives de niveau 1 et 2 (prédicteurs). Les intercepts étaient aléatoires (chaque classe avait sa propre intercept) mais les pentes des prédicteurs de niveau 1 étaient fixes. Ce modèle nous a permis de déterminer dans quelle mesure les résultats du post-test pouvaient être expliqués en termes de caractéristiques des élèves, des caractéristiques des classes ainsi que de l'effet de l'intervention. Il est important de noter que la variable dépendante ne consiste pas en des scores de gain (différences entre les scores du post-test et du pré-test), mais en des scores du post-test contrôlés par les scores du pré-test.

Modèle 3 : Nous avons introduit une variable relative à l'interaction entre le groupe et le type d'école.

6.3.1. Effet de l'intervention sur le développement des compétences de LE

Le tableau 3 indique que, quelle que soit la variable dépendante considérée (score total en LE ou les sous-dimensions de LE), la plus grande part des différences se situe entre élèves à l'intérieur des écoles (variance intra-écoles) : entre 79 et 93 % des différences de scores entre élèves s'expliquent par le fait que les élèves sont différents les uns des autres (âge, sexe, milieu social, niveau en début, etc.). Nous pouvons constater également que la part de variance inter-

école est plus importante pour la variable « langage orale » (21%) contre 11% pour la variable « conscience phonologique » et uniquement 7% pour la variable « connaissance des lettres ».

Concernant le score total de LE, l'introduction des variables explicatives (modèle 2) a permis d'améliorer significativement le modèle, $\chi^2(9,725) = 1206.18$, $p < .001$. Ensemble, ces variables expliquent 71 % de la variance intra-école ($100 \times (.83 - .24) / .83$) et 67,71% de la variance inter-école ($100 \times (.17 - .06) / .17$). Pour le modèle 3, l'introduction du terme d'interaction a permis d'améliorer également significativement le modèle $\chi^2(1,725) = 8.84$, $p < .001$. Ce dernier modèle ne permet pas d'expliquer plus de variance intra-école. En revanche, il permet d'expliquer 8,76% en plus de la variance inter-école.

Dans le modèle 2, les coefficients significatifs étaient, au niveau 1, le score de pré-test ($\beta = .77$, $p < .001$) et le SES ($\beta = .06$, $p < .05$). Le score de début d'année affecte positivement et très significativement le score de fin d'année. Un écart-type de plus au score initial s'accompagne en moyenne, toutes choses égales par ailleurs, d'une augmentation de .77 écart-type au score final. De même, les enfants de milieu sociaux favorisés obtiennent des meilleures performances en fin d'année toutes choses égales par ailleurs. Toujours dans le modèle 2, aucune de variable de niveau 2 n'a un effet significatif sur le score de post-test. Tout particulièrement, le fait d'appartenir au groupe expérimental ou au groupe contrôle n'a pas d'effet sur la progression en fin d'année.

Dans le modèle 3, au niveau 1, le score de pré-test et le SES restent significatif. Au niveau 2 l'interaction entre le groupe et le type d'école est significative ($\beta = .64$, $p < .001$). Autrement dit, le fait d'être élève dans le groupe expérimental et dans une école en dehors du REP permet de progresser plus que les autres.

Lorsqu'on s'intéresse aux sous-dimensions de LE, on trouve globalement des résultats identiques pour les modèles relatifs aux « connaissance des lettres » et « langage oral ». En revanche, la sous-dimension « conscience phonologique » présente quelques différences. Tout d'abord, au niveau 1, en plus du score de pré-test ($\beta = .53$, $p < .001$) et le SES ($\beta = .12$, $p < .05$) l'âge et les capacités cognitives générales ont un impact sur le score au post-test (respectivement $\beta = .09$ et $.11$, $p < .05$). Ensuite, au niveau 2 (modèle M2), l'intervention a un effet significatif ($\beta = .22$, $p < .05$). Les élèves du groupe expérimental progressent plus dans le domaine de la conscience phonologique que les élèves du groupe contrôle. En fin, l'interaction entre le groupe et le type d'école est toujours significative ($\beta = .44$, $p < .001$).

Tableau 3. Modèles multiniveaux expliquant le score du post-test des différentes dimensions de littératie émergente (N=725)

Paramètres	Score total LE			Connaissance des lettres			Langage oral			Conscience phonologique		
	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3	M1	M2	M3
<i>Effets fixes</i>												
Constante	-01 (.08)	-.21 (.13)	.04 (.14)	-.01 (.06)	-.09 (.14)	.15 (.16)	-.02 (.09)	-.24 (.12)	-.03 (.13)	-.01 (.07)	-.08 (.14)	.10 (.16)
Variables de niveau 1												
Performances en T1		.77 (.03)**	.77 (.03)**		.68 (.03)**	.68 (.03)**		.71 (.03)**	.71 (.03)**		.53 (.04)**	.53 (.04)**
Sexe (0 = Garçon, 1 = fille)		.04 (.05)	.05 (.05)		.06 (.05)	.06 (.05)		.07 (.05)	.07 (.05)		-.04 (.07)	-.03 (.07)
Age		.01 (.02)	.01 (.02)		.05 (.03)	.05 (.03)		-.01 (.03)	-.01 (.03)		.09 (.04)*	.09 (.04)*
SES		.06 (.03)*	.06 (.03)*		.14 (.04)**	.14 (.04)**		.06 (.03)*	.06 (.03)*		.12 (.05)*	.12 (.05)*
Capacités cognitives générales		.05 (.03)	.05 (.03)		.03 (.03)	.03 (.03)		.07 (.03)*	.07 (.03)*		.11 (.04)**	.11 (.04)**
Variables de niveau 2												
Groupe (0 = control, 1 = expl)		.12 (.10)	-.36 (.18)*		.02 (.11)	-.45 (.20)*		.07 (.09)	-.33 (.16)*		.22 (.11)*	-.11 (.20)
Moyenne de l'école en LE en T1		-.03 (.09)	-.03 (.08)		.04 (.09)	.03 (.08)		-.04 (.08)	-.04 (.07)		.04 (.10)	.02 (.09)
Tonalité sociale de la classe		-.02 (.10)	-.02 (.08)		-.14 (.10)	-.14 (.09)*		.01 (.09)	.01 (.08)		.04 (.10)	.04 (.10)
Type école (0 = REP, 1 = Non REP)		.15 (.16)	-.20 (.18)		.06 (.17)	-.28 (.20)		.24 (.14)	-.05 (.16)		-.01 (.16)	-.26 (.20)
Interaction groupe vs type d'école			.64 (.20)**			.62 (.22)**			.53 (.18)*			.44 (.22)*
<i>Effets aléatoires</i>												
variance inter-école	.17 (.05)	.06 (.02)	.04 (.01)	.07 (.03)	.06 (.02)	.05 (.02)	.21 (.06)	.04 (.02)	.03 (.01)	.11 (.04)	.04 (.02)	.03 (.02)
variance intra-école	.83 (.05)	.24 (.02)	.24 (.02)	.93 (.05)	.35 (.05)	.35 (.02)	.79 (.04)	.28 (.02)	.28 (.02)	.89 (.05)	.55 (.04)	.55 (.04)
-2 log L	1952.12	745.94	737.10	2005.51	927.38	920.43	1920.48	817.61	810.13	1980.87	1134.41	1130.81

Note : seuil de significativité des effets fixes : * : significatif au seuil de 10 % ; ** : significatif au seuil de 5 % ; *** : significatif au seuil de 1 %. Les erreurs type des coefficients figurent entre parenthèses.

6.3.2. Effet de l'intervention sur le développement des compétences de NE

Le tableau 4 indique que la plus grande part des différences se situe entre élèves à l'intérieur des écoles (variance intra-écoles) 89 %. Concernant le score total de NE, l'introduction des variables explicatives (modèle 2) a permis d'améliorer significativement le modèle, $\chi^2(9,725) = 1106.43$, $p < .001$. Ensemble, ces variables expliquent 64 % de la variance intra-école ($100 \times (.89 - .32) / .89$) et 36,36% de la variance inter-école ($100 \times (.11 - .07) / .17$). Pour le modèle 3, l'introduction du terme d'interaction a permis d'améliorer également significativement le modèle $\chi^2(1,725) = 5.6$, $p < .05$. Ce dernier modèle ne permet d'expliquer que 1% de la variance intra-école et 5% en plus de la variance inter-école.

Dans le modèle 2, les coefficients significatifs étaient, au niveau 1, le score de pré-test ($\beta = .64$, $p < .001$), l'âge ($\beta = .11$, $p < .01$), le SES ($\beta = .11$, $p < .01$) et le score en facteur général d'intelligence ($\beta = .10$, $p < .01$). Le score de début d'année affecte positivement et très significativement le score de fin d'année. Un écart-type de plus au score initial s'accompagne en moyenne d'une augmentation de .64 écart-type au score final. Les enfants les plus âgés progressent plus en fin d'année que les autres. De même, les enfants de milieu sociaux favorisés obtiennent des meilleures performances en fin d'année toutes choses égales par ailleurs. Toujours dans le modèle 2, aucune de variable de niveau 2 n'a un effet significatif sur le score de post-test. Tout particulièrement, le fait d'appartenir au groupe expérimental ou au groupe contrôle n'a pas d'effet sur la progression en fin d'année.

Dans le modèle 3, au niveau 1, le score de pré-test, l'âge, le SES et le score en facteur général d'intelligence restent significatif. Au niveau 2 l'interaction entre le groupe et le type d'école est significatif ($\beta = .64$, $p < .001$). Autrement dit, le fait d'être élève dans le groupe expérimental et dans une école en dehors du REP permet de progresser plus que les autres.

Tableau 4.

Modèles multiniveaux expliquant le score du post-test en numératie émergente (N=725)

Paramètres	Score total NE		
	M1	M2	M3
<i>Effets fixes</i>			
Constante	-.01 (.07)	.03 (.09)	.22 (.17)
Variables de niveau 1			
Performances en T1		.64 (.03)**	.64 (.03)**
Sexe (0 = Garçon, 1 = fille)		-.02 (.05)	-.02 (.05)
Age		.11 (.03)**	.10 (.03)**
SES		.11 (.03)**	.11 (.03)**
Capacité cognitive générale		.10 (.03)**	.10 (.03)**
Variables de niveau 2			
Groupe (0 = control, 1 = expl)		.06 (.12)	-.37 (.21)*
Moyenne de l'école en numératie en T1		-.05 (.08)	-.07 (.08)
Tonalité sociale de la classe		-.04 (.10)	-.03 (.09)
Type école (0 = REP, 1 = Non REP)		.04 (.17)	-.28 (.21)
Interaction groupe vs type d'école			.58 (.24)**
<i>Effets aléatoires</i>			
variance inter-école	.11 (.04)	.07 (.02)	.06 (.02)
variance intra-école	.89 (.05)	.32 (.02)	.31 (.02)
-2 log L	1980.91	874.48	868.88

7. Discussion

La recherche présentée dans cet article est la première en France à tester l'efficacité d'une intervention éducative sur les apprentissages des enfants âgés de 4 à 5 ans par l'intermédiaire d'une application éducative. Notre travail présente la particularité de s'intéresser conjointement aux apprentissages en LE et en NE ce qui a été rarement réalisé dans la littérature. Tout au long de notre recherche, nous avons essayé de maintenir une rigueur méthodologique aux niveaux de la conception de l'application, de la fidélité de l'implémentation et des analyses des données.

Tout d'abord, comme évoqué précédemment l'application AppLINOU a été élaborée selon un cadre théorique de co-conception (Kucirkova, 2016). Le contenu de l'application a été conçu sur la base de données probantes. Nous avons également doté l'application de certaines qualités pédagogiques nécessaires aux apprentissages (Hirsh-Pasek et al., 2015). Ensuite, l'analyse des traces laissées par les élèves sur la tablette nous a offert un moyen efficace pour évaluer la fidélité de l'implémentation de l'intervention. Enfin, nous avons adopté un protocole quasi-expérimental rigoureux en étant vigilant aux qualités psychométriques des mesures effectuées. De même, nous avons eu recours à des analyses de régression multiniveaux indispensables dans ce type de recherche (Bressoux 2020).

7.1. Effets de l'intervention

Les analyses de régression multiniveaux ont montré un certain nombre de résultats classiques. Nos résultats mettent en évidence l'importance de la variabilité intra-école qui est plus importante que variabilité inter-école. Ceci est observé aussi bien en LE qu'en NE.

Concernant les variables de niveau 1, on constate le poids important du niveau initial dans la détermination du niveau final. De même, le SES a un impact sur tous les scores aux post-tests. Les enfants issus des familles avec un SES élevé montrent de meilleures performances en LE et en NE (DeFlorio & Beliakoff, 2015; Hornburg et al., 2018; Mendive et al., 2020). Ces liens pourraient s'expliquer par le fait que les parents ayant un niveau socio-économique plus élevé engagent plus souvent leurs enfants dans des activités langagières ou mathématiques (e.g. Elliott & Bachman, 2018). Nous avons trouvé également un impact de l'âge sur la NE et sur la conscience phonologique. En revanche, contrairement à quelques études qui ont trouvé des différences entre les filles et les garçons (e.g. Below et al., 2010; Deasley et al., 2018), nous n'avons trouvé aucune différence de performances à ce niveau scolaire.

Lorsqu'on s'intéresse aux variable de niveau 2, on constate que l'intervention n'a pas eu d'impact sur la progression moyenne des élèves en fin d'année concernant le score global de LE et de NE. En revanche, lorsqu'on s'intéresse aux sous-dimensions de LE on trouve un effet de l'intervention uniquement sur la progression en conscience phonologique. Par ailleurs, les analyses de régression multiniveaux ont montré également que les élèves REP du GE n'ont pas plus progressés que les élèves REP du GC. Lorsqu'on introduit le terme d'interaction entre le groupe (expérimental *vs* contrôle) et le type d'école (REP *vs* non REP), on constate que les élèves du groupe expérimental scolarisés hors réseau d'éducation prioritaire ont de meilleures

performances en fin de moyenne section que les autres élèves de l'échantillon à tous les scores en post-test en LE et en NE. Autrement dit, le fait d'être élève du groupe expérimental et dans une école en dehors d'un réseau d'éducation prioritaire permet de progresser plus que les autres.

7.2. Eléments d'explication

Plusieurs facteurs peuvent expliquer la non-efficacité de l'intervention auprès des enfants scolarisés en REP. Premièrement, le programme de l'intervention était assez lourd pour les enseignants. Ceux-ci étaient contraints à réaliser plusieurs séances sur dix semaines. Les enseignants des REP, comparativement aux autres, avaient une plus grande hétérogénéité des niveaux des élèves et plus de difficultés scolaires à gérer. De même, l'utilisation en classe de l'application éducative a été ponctuée de soucis techniques comme par exemple des difficultés de connexion internet. Malgré, la réactivité notre équipe de recherche, cela a causé des contraintes et du stress supplémentaire aux enseignants du groupe expérimental. Par ailleurs, dans le cadre du projet LINUMEN nous avons mesuré l'acceptance par les enseignants de l'application AppLINO (Hoareau et al. Soumis). Ce travail a montré que les scores d'acceptance des enseignants de REP sont plus faibles que ceux des enseignants hors REP. Les différences sont significatives. En référence au modèle de Kucirkova (2016), on peut supposer que les enseignants en REP n'ont pas eu la motivation, le temps et suffisamment d'opportunités pour analyser les affordances offertes par l'application.

Deuxièmement, nous avons fait le choix de proposer une intervention où les élèves réalisent des séances en autonomie, même si l'enseignant devait être à disposition des élèves afin de réagir à leurs demandes. Bien qu'AppLINO présente certaines qualités pédagogiques favorisant l'engagement, l'apprentissage actif et la mise en sens, celles-ci demeurent insuffisantes pour faire progresser les élèves en difficultés. Pour ces derniers, la présence d'un adulte pour étayer les interactions avec l'application aurait été probablement un meilleur choix (Neumann & Neumann, 2016 ; Yelland & Masters, 2007).

Troisièmement, il est probable que les élèves scolarisés en REP aient besoin de plus de temps et de semaines pour tirer profit de l'application. Les évaluations post-test ont été effectuées quatre mois après les évaluations pre-test. L'application AppLINO proposait des activités diverses et variées. Pour chaque période, l'enfant n'utilisait que 10 minutes chaque activité. Or, plusieurs méta-analyses ont montré que les gains d'apprentissages n'apparaissent qu'après plusieurs sessions d'utilisation d'un même outil (Leroux et al., 2017). De même, la

durée du programme peut également avoir un impact sur le gain d'apprentissage. Ainsi, une utilisation supérieure à 30 minutes par semaine aurait un effet plus important sur les gains d'apprentissages (Cheung & Slavin, 2012, 2013).

Conclusion

Les recherches de type écologiques sont beaucoup moins nombreuses que les recherches menées en laboratoire et ont obtenu des résultats beaucoup plus mitigés. Le passage du laboratoire à la salle de classe est donc loin d'être aisé. Les travaux qui ont analysé les réussites et les échecs d'implémentations de pratiques fondées sur des données probantes (e.g. Fixsen, 2005 ; Nilsen, 2015) soulignent la nécessité de cycles d'amélioration. Les résultats de notre étude sont encourageants et nous fournissent des pistes d'amélioration de nos futures interventions.

Bibliographie

- Åberg, E., Lantz-Andersson, A., & Pramling, N. (2014). 'Once upon a time there was a mouse': Children's technology-mediated storytelling in preschool class. *Early Child Development and Care, 184*(11), 1583–1598. doi:10.1080/03004430.2013.867342
- American Academy of Pediatrics (2016). American Academy of Pediatrics Announces New Recommendations for Children's Media Use. retrieved from <https://www.aap.org/enus/about-the-aap/aap-press-room/Pages/American-Academy-of-Pediatrics-Announces-New-Recommendations-for-Childrens-Media-Use.aspx>.
- Anthony, J. L., Williams, J. M., McDonald, R., & Francis, D. J. (2007). Phonological processing and emergent literacy in younger and older preschool children. *Annals of dyslexia, 57*(2), 113.
- Alexandre, B., Reynaud, E., Osiurak, F., & Navarro, J. (2018). Acceptance and acceptability criteria: a literature review. *Cognition, Technology & Work, 20*, 165-177.
- Archer, K., Savage, R., Sanghera-Sidhu, S., Wood, E., Gottardo, A., & Chen, V. (2014). Examining the effectiveness of technology use in classrooms: A tertiary meta-analysis. *Computers & Education, 78*, 140-149.
- Aunola, K., Leskinen, E., Lerkkanen, M., & Nurmi, J. (2004). Developmental dynamics of math performances from preschool to Grade 2. *Journal of Educational Psychology, 96*, 699 - 713.

- Below, J. L., Skinner, C. H., Fearing, J. Y., & Sorrell, C. A. (2010). Gender Differences in Early Literacy : Analysis of Kindergarten through Fifth-Grade Dynamic Indicators of Basic Early Literacy Skills Probes. *School Psychology Review*, 39(2), 240-257.
- Berkowitz, T., Schaeffer, M. W., Maloney, E. A., Peterson, L., Gregor, C., Levine, S. C., & Beilock, S. L. (2015). Math at home adds up to achievement in school. *Science*, 350, 196–198. <http://dx.doi.org/10.1126/science.aac7427>
- Bressoux, P. (2020). Using multilevel models is not just a matter of statistical adjustment. Illustrations in the educational field. *L'Année psychologique*, 120, 5-38.
- Bianco, M., Bressoux, P., Doyen, A.-L., Lambert, E., Lima, L., Pellenq, C., & Zorman, M. (2010). Early Training in Oral Comprehension and Phonological Skills : Results of a Three-Year Longitudinal Study. *Scientific Studies of Reading*, 14(3), 211-246. <https://doi.org/10.1080/10888430903117518>
- Blackwell, C. K., Lauricella, A. R., Wartella, E., Robb, M., & Schomburg, R. (2013). Adoption and use of technology in early education: The interplay of extrinsic barriers and teacher attitudes. *Computers & Education*, 69, 310–319. doi:10.1016/j.compedu.2013.07.024
- Briquet-Duhazé, S., & Rezrazi, A. (2014). Résultat d'un entraînement en conscience phonologique chez des élèves en difficultés de lecture au cycle 3. *Enfance*, 2014(02), 119-134. <https://doi.org/10.4074/S0013754514002018>
- Catts, H. W., Fey, M. E., Zhang, X., & Tomblin, J. B. (2001). Estimating the risk of future reading difficulties in kindergarten children. *Language, speech, and hearing services in schools*, 32(1), 38-50.
- Cheung, A. C. K., & Slavin, R. E. (2013). The effectiveness of educational technology applications for enhancing mathematics achievement in K-12 classrooms: A meta-analysis. *Educational Research Review*, 9, 88–113. <http://dx.doi.org/10.1016/j.edurev.2013.01.001>
- Chera, P., & Wood, C. (2003). Animated multimedia “talking books” can promote phonological awareness in children beginning to read. *Learning and Instruction*, 13, 33-52.
- Chetty, R., Friedman, J. N., & Rockoff, J. E. (2014). Measuring the impacts of teachers I: Evaluating bias in teacher value-added estimates. *American Economic Review*, 104(9), 2593-2632. <http://dx.doi.org/10.1257/aer.104.9.2593>
- Ching, C., Wang, X. C., Shih, M. L., & Kedem, Y. (2006). Digital photography and journals in a kindergarten-first-grade classroom: Toward meaningful technology integration in early childhood education. *Early Education & Development*, 17(3), 347–371. doi:10.1207/s15566935eed1703_3
- Clements, D. H., & Sarama, J. (2004). Learning trajectories in mathematics education. *Mathematical Thinking and Learning*, 6, 81–89.
- Clements, D. H., Sarama, J., Wolfe, C. B., & Spitler, M. E. (2015). Sustainability of a scale-up intervention in early mathematics: A longitudinal evaluation of implementation fidelity.

Early Education and Development, 26, 427–449.
<http://dx.doi.org/10.1080/10409289.2015.968242>

- Cubelic, C. C., & Larwin, K. H. (2014). The use of iPad technology in the kindergarten classroom: A quasi-experimental investigation of the impact on early literacy skills. *Comprehensive Journal of Educational Research*, 2, 47–59.
- Crescenzi, L., Jewitt, C., & Price, S. (2014). The role of touch in preschool children's learning using iPad versus paper interaction. *Australian Journal of Language and Literacy*, 37, 87–95
- Deasley, S., Evans, M. A., Nowak, S., & Willoughby, D. (2018). Sex Differences in Emergent Literacy and Reading Behaviour in Junior Kindergarten. *Canadian Journal of School Psychology*, 33(1), 26-43. <https://doi.org/10.1177/0829573516645773>
- DeFlorio, L., & Beliakoff, A. (2015). Socioeconomic Status and Preschoolers' Mathematical Knowledge : The Contribution of Home Activities and Parent Beliefs. *Early Education and Development*, 26(3), 319-341. <https://doi.org/10.1080/10409289.2015.968239>
- De Jong, M., & Bus, A. (2004). The efficacy of electronic books in fostering kindergarten children's emergent story understanding. *Reading Research Quarterly*, 39, 378-393.
- Duncan, G. J., Dowsett, C. J., Claessens, A., Magnuson, K., Huston, A. C., Klebanov, P., ... Duckworth, K. (2007). School Readiness and Later Achievement. *Developmental Psychology*, 43(6), 1428-1446.
- Elliott, L., & Bachman, H. J. (2018). How Do Parents Foster Young Children's Math Skills? *Child Development Perspectives*, 12(1), 16-21. <https://doi.org/10.1111/cdep.12249>
- Enders, C. K., & Tofighi, D. (2007). Centering predictor variables in crosssectional multilevel models: A new look at an old issue. *Psychological Methods*, 12, 121–138.
- Fixsen, D. L., Naoom, S. F., Blase, K. A., Friedman, R. M. & Wallace, F. (2005). Implementation research: A synthesis of the literature. Tampa, FL : University of South Florida, Louis de la Parte Florida Mental Health Institute, The National Implementation Research Network (FMHI Publication #231).
- Fridin, M. (2014). Storytelling by a kindergarten social assistive robot: A tool for constructive learning in preschool education. *Computers & Education*, 70, 53–64. doi:10.1016/j.compedu.2013.07.043
- Foulin, J. N. (2005). Why is letter-name knowledge such a good predictor of learning to read? *Reading and writing*, 18(2), 129-155.
- Foulin, J. N. (2007). La connaissance des lettres chez les prélecteurs: aspects pronostiques, fonctionnels et diagnostiques. *Psychologie française*, 52, 431–444.

- Granić, A., & Marangunić, N. (2019). Technology acceptance model in educational context: A systematic literature review. *British Journal of Educational Technology*, 50(5), 2572-2593. <https://doi.org/10.1111/bjet.12864>
- Gelman, R., & Gallistel, C. R. (1978). *The child's understanding of number*. Oxford, England: Harvard University Press.
- Ginsburg, H. P., & Baroody, A. J. (2003). *Test of early mathematics ability (3rd ed.)*. Austin, TX: Pro-Ed.
- Ginsburg, H. P. (1977). *Children's arithmetic: The learning process*. Oxford, England: Van Nostrand
- Greenfield, S. (2015). *Mind change: How digital technologies are leaving their mark on our brains*. London, UK: Random House.
- Griffith, S. H., Hagan, M. B., Heymann, P., Heflin, B. H. & Bagner, D. M. (2020). Apps As Learning Tools : A systematic review. *Pediatrics*, 145(1).
- Haßler, B., Major, L., & Hennessy, S. (2015). Tablet use in schools: A critical review of the evidence for learning outcomes. *Journal of Computer Assisted Learning*, 32(2), 139–156. <http://dx.doi.org/10.1111/jcal.12123>
- Hirsh-Pasek, K., Zosh, J., Golinkoff, R., Gray, J., Robb, M., & Kaufman, J. (2015). Putting Education in « Educational » Apps : Lessons From the Science of Learning. *Psychological Science in the Public Interest*, 16(1), 3-34.
- Hoareau, L., Thomas, A., Tazouti, Y., Dinet, J., Luxembourger, C., Hubert, B., Fischer, J.P., & Jarlégan, A. (accepté). Co-designing a new educational tablet app for preschoolers. *Computers in the Schools*.
- Hox, J. J. (2010). *Multilevel Analysis : Techniques and Applications*. Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum.
- Hooper, S. R., Roberts, J., Sideris, J., Burchinal, M., & Zeisel, S. (2010). Longitudinal predictors of reading and math trajectories through middle school for African-American versus Caucasian students across two samples. *Developmental Psychology*, 46, 1018–1029.
- Hornburg, C. B., Schmitt, S. A., & Purpura, D. J. (2018). Relations between preschoolers' mathematical language understanding and specific numeracy skills. *Journal of Experimental Child Psychology*, 176, 84-100. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2018.07.005>
- Huber, B., Tarasuik, J., Antoniou, M. N., Garrett, C., Bowe, S. J., Kaufman, J., et al. (2016). Young children's transfer of learning from a touchscreen device. *Comput. Human Behav.* 56, 56–64. doi: 10.1016/j.chb.2015.11.010

- Ihmeideh, F. (2009). The role of computer technology in teaching reading and writing: Preschool teachers' beliefs and practices. *Journal of Research in Childhood Education*, 24(1), 60–79. doi:10.1080/02568540903439409
- Ingram, N., Williamson-Leadley, S., & Pratt, K. (2016). Showing and telling: using tablet technology to engage students in mathematics. *Mathematics Education Research Journal*, 28(1), 123–147.
- Institute of Education Sciences (2018). What Works Clearinghouse. Retrieved from <https://ies.ed.gov/ncee/wwc/>
- Jordan, N. C., Kaplan, D., Ramineni, C., & Locuniak, M. N. (2009). Early math matters: Kindergarten number competence and later mathematics outcomes. *Developmental Psychology*, 45, 850 - 867.
- Karemaker, A., Pitchford, N., & O'Malley, C. (2010). Enhanced recognition of written words and enjoyment of reading in struggling beginner readers through whole-word multimedia software. *Computers and Education*, 54(1), 199-208.
- Kendeou, P., van den Broek, P., White, M. J., & Lynch, J. S. (2009). Predicting reading comprehension in early elementary school : The independent contributions of oral language and decoding skills. *Journal of Educational Psychology*, 101(4), 765-778. <https://doi.org/10.1037/a0015956>.
- Kendeou, P., van den Broek, P., White, M., & Lynch, J. (2007). Preschool and early elementary comprehension: Skill development and strategy interventions. In D. S. McNamara (Ed.) *Reading comprehension strategies: Theories, interventions, and technologies*, (pp. 27–45). Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Kim, Y.-S., Otaiba, S. A., Puranik, C., Folsom, J. S., & Grulich, L. (2014). The contributions of vocabulary and letter writing automaticity to word reading and spelling for kindergartners. *Reading and Writing*, 27(2), 237-253. <https://doi.org/10.1007/s11145-013-9440-9>
- Kwok, K., Ghrear, S., Li, V., Haddock, T., Coleman, P., and Birch, S. A. J. (2016). Children can learn new facts equally well from interactive media versus face to face instruction. *Front. Psychol.* 7:1603. doi: 10.3389/fpsyg.2016.01603
- Krajewski, K., & Schneider, W. (2009). Early development of quantity to number–word linkage as a precursor of mathematical school achievement and mathematical difficulties: Findings from a four-year longitudinal study. *Learning and Instruction*, 19, 513–526.
- Kucirkova, N., Messer, D., Sheehy, K., & Flewitt, R. (2013). Sharing personalised stories on iPads: A close look at one parent-child interaction. *Literacy*, 47, 115–122.
- Larkin, K., & Calder, N. (2016). Mathematics education and mobile technologies. *Mathematics Education Research Journal*, 28(1), 1–7.
- Lonigan, C. J., & Shanahan, T. (2008). Executive Summary Developing Early Literacy: Report of the National Early Literacy Panel A Scientific Synthesis of Early Literacy Development

- and Implications for Intervention (pp. v-xii). In *Developing early literacy: Report of the national early literacy panel* (pp. 55-106). Washington, DC: National Institute for Literacy.
- Marsh, J. (2016). The digital literacy skills and competencies of children of pre-school age. *Media Education Studies and Research*, 7, 197–214.
- Marsh, J., Yamada-Rice, D., Bishop, J., Lahmar, J., Scott, F., Plowman, L., et al. (2015). *Exploring Play and Creativity in Pre-Schoolers' Use of Apps: Technology and Play*. Economic and Social Research Council. Retrieved from: <http://www.techandplay.org/tap-media-pack.pdf>.
- Massonnié, J., Bianco, M., Lima, L., & Bressoux, P. (2019). Longitudinal predictors of reading comprehension in French at first grade : Unpacking the oral comprehension component of the simple view. *Learning and Instruction*, 60, 166–179. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2018.01.005>
- McCarrick, K., & Xiaoming, L. (2007). Buried treasure: The impact of computer use on young children's social, cognitive, language development and motivation. *AACE Journal*, 15(1), 73–95.
- Melhuish, K., & Falloon, G. (2010). Looking to the future: M-learning with the iPad. *Computers in New Zealand Schools: Learning, Leading, Technology*, 22(3), 1–16.
- Mendive, S., Mascareño Lara, M., Aldoney, D., Pérez, J. C., & Pezoa, J. P. (2020). Home Language and Literacy Environments and Early Literacy Trajectories of Low-Socioeconomic Status Chilean Children. *Child Development*. <https://doi.org/10.1111/cdev.13382>
- Merchant (2015). Keep taking the tablets: iPads, story apps and early literacy. *Australian Journal of Language and Literacy*, 38, 3–11.
- Milman, N. B., Carlson-Bancroft, A., & Boogart, A. V. (2014). Examining differentiation and utilization of iPads across content areas in an independent, preK–4th grade elementary school. *Computers in the Schools*, 31(3), 119–133.
- Moody, A. (2010). Using electronic books in the classroom to enhance emergent literacy skills in young children. *Journal of Literacy and Technology*, 11(4), 22-52.
- Moyer-Packenham, P. S., Bullock, E. K., Shumway, J. F., Tucker, S. I., Watts, C. M., Westenskow, A., Anderson-Pence, K. L., Maahs-Fladung, C., Boyer-Thurgood, J., Gulkilik, H., & Jordan, K. (2016). The role of affordances in children's learning performance and efficiency when using virtual manipulative mathematics touch-screen apps. *Mathematics Education Research Journal*, 28(1), 79–105.
- Muter, V., Hulme, C., Snowling, M. J., & Stevenson, J. (2004). Phonemes, rimes, vocabulary, and grammatical skills as foundations of early reading development: evidence from a longitudinal study. *Developmental psychology*, 40(5), 665-681.

- National Early Literacy Panel. (2008). *Developing early literacy: Report of the National Early Literacy Panel*. Washington, DC: National Institute for Literacy.
- National Mathematics Advisory Panel. (2008). *Foundations for success: The final report of the National Mathematics Advisory Panel*. Washington, DC: US Department of Education.
- National Research Council. (2009). *Mathematics learning in early childhood: Paths toward excellence and equity*. Washington DC: National Academies Press.
- Negro, I., & Genelot, S. (2009). Les prédicteurs en grande section maternelle de la réussite en lecture en fin de première année d'école élémentaire: l'impact du nom des lettres. *Bulletin de psychologie*, (3), 291-306.
- Neumann, M.M. (2018). Using tablets and apps to enhance emergent literacy skills in young children. *Early Childhood Research Quarterly*, 42, 239-246.
- Neumann, M. M., & Neumann, D. L. (2014). Touch screen tablets and emergent literacy. *Early Childhood Education Journal*, 42, 231–239. <http://dx.doi.org/10.1007/s10643-013-0608-3>.
- Neumann, M. M., & Neumann, D. L. (2015). The use of touch screen tablets at home and pre-school to foster emergent literacy. *Journal of Early Childhood Literacy*, 17, 203–220. <http://dx.doi.org/10.1177/1468798415619773>
- Neumann, M. M., Finger, G., & Neumann, D. L. (2016). A conceptual framework for emergent digital literacy. *Early Childhood Education Journal*, 45, 471–479. <http://dx.doi.org/10.1007/s10643-016-0792-z>.
- Nilsen, P. (2015). Making sense of implementation theories, models and frameworks. *Implementation Science*, 10(1), 1–20. <https://doi.org/10.1186/s13012-015-0242-0>
- Oakhill, J. V., Cain, K., & Bryant, P. E. (2003). The dissociation of word reading and text comprehension: Evidence from component skills. *Language and cognitive processes*, 18(4), 443-468.
- Outhwaite, L. A., Gulliford, A., Pitchford, N. J. (2017). Closing the gap: Efficacy of a tablet intervention to support the development of early mathematical skills in UK primary school children. *Computers & Education*, 108, 43-58.
- Outhwaite, L. A., Faulder, M., Gulliford, A., & Pitchford, N. J. (2019). Raising early achievement in math with interactive apps: A randomized control trial. *Journal of Educational Psychology*, 111(2), 284-298. <http://dx.doi.org/10.1037/edu0000286>
- Papadakis, S., Kalogiannakis, M., and Zaranis, N. (2018). The effectiveness of computer and tablet assisted intervention in early childhood students' understanding of numbers. An empirical study conducted in Greece. *Education and Information Technologies*. 23, 1849–1871. doi: 10.1007/s10639-018-9693-7

- Patchan, M. M., & Puranik, C. S. (2016). Using tablet computers to teach preschool children to write letters: Exploring the impact of extrinsic and intrinsic feedback. *Comput. Educ.* 102, 128–137. doi: 10.1016/j.compedu.2016.07.007
- Parish-Morris, J., Mahajan, N., Hirsh-Pasek, K., Golinkoff, R. M., and Collins, M. F. (2013). Once upon a time: parent–child dialogue and storybook reading in the electronic era. *Mind Brain Educ.* 7, 200–211. doi: 10.1111/mbe.12028
- Pegrum, M., Howitt, C. & Striepe, M. (2013). Learning to take the tablet : How pre-service teachers use iPads to facilitate their learning. *Australasian Journal of Educational Technology*, 29(4), 464-479.
- Pelletier, J., Reeve, R., & Halewood, C. (2006). Young children's knowledge building and literacy development through knowledge forum. *Early Education & Development*, 17(3), 323–346. doi:10.1207/s15566935eed1703_2
- Peugh, J. L. (2010). A practical guide to multilevel modeling. *Journal of School Psychology*, 48, 85–112.
- Piquard-Kipffer, A., & Sprenger-Charolles, L. (2013). Early predictors of future reading skills : A follow-up of French-speaking children from the beginning of kindergarten to the end of the second grade (age 5 to 8). *L'Année Psychologique*, 113(04), 491-521. <https://doi.org/10.4074/S0003503313014012>
- Pitchford, N. J. (2015). Development of early mathematical skills with a tablet intervention: a randomized control trial in Malawi. *Frontiers in Psychology*, 6:485. doi: 10.3389/fpsyg.2015.00485
- Piotrowski, J. T., and Krcmar, M. (2017). Reading with hotspots: young children's responses to touchscreen stories. *Comput. Human Behav.* 70, 328–334. doi: 10.1016/j.chb.2017.01.010
- Puranik, C. S., Petscher, Y., & Lonigan, C. J. (2013). Dimensionality and reliability of letter writing in 3- to 5-year-old preschool children. *Learning and Individual Differences*, 28, 133–141. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.06.011>
- Purpura, D. J., Baroody, A. J., & Lonigan, C. J. (2013). The transition from informal to formal mathematical knowledge: Mediation by numeral knowledge. *Journal of Educational Psychology*, 105, 453–464.
- Rasbash, J., Steele, F., Browne, W., & Goldstein, H. (2020). *A user's guide to MLwiN: Version 3.05*. University of Bristol, England: Centre for Multilevel Modelling.
- Raudenbush, S. W., & Bryk, A. S. (2002). *Hierarchical linear models: Applications and data analysis methods (2nd ed.)*. Thousand Oaks, CA: Sage Publications.
- Raven, J. C., Court, J. H., & Raven, J. (1995). *Raven, Matrices Progressives (Escalas: CPM, SPM, APM)*. Madrid: TEA Ediciones, S.A

- Roskos, K., Burnstein, K., Shang, Y., & Gray, E. (2014). Young children's engagement with ebooks at school: Does device matter? *Sage Open* 1–9 January–March.
- Sarama, J., & Clements, D. H. (2009). *Early childhood mathematics education research: Learning trajectories for young children*. New York, NY: Routledge.
- Schacter, J., & Jo, B. (2016). Improving low-income preschoolers mathematics achievement with Math Shelf, a preschool tablet computer curriculum. *Comput Human Behav.* 55, 223–229.
- Schtschneider, C., Fletcher, J. M., Francis, D. J., Carlson, C. D., & Foorman, B. R. (2004). Kindergarten prediction of reading skills: A longitudinal comparative analysis. *Journal of educational psychology*, 96(2), 265.
- Scarborough, H. S. (1998). Predicting the future achievement of second graders with reading disabilities: Contributions of phonemic awareness, verbal memory, rapid naming, and IQ. *Annals of Dyslexia*, 48(1), 115-136.
- Schacter, J., and Jo, B. (2016). Improving low-income preschoolers mathematics achievement with Math Shelf, a preschool tablet computer curriculum. *Comput. Human Behav.* 55, 223–229. doi: 10.1016/j.chb.2015. 09.013
- Shahrimin, M. I., & Butterworth, D. M. (2001). Young children's collaborative interactions in a multimedia computer environment. *The Internet and Higher Education*, 4(3), 203–215. doi:10.1016/S1096-7516(01)00068-9
- Schroeder, E. L., and Kirkorian, H. L. (2016). When seeing is better than doing: Preschoolers' transfer of STEM skills using touchscreen games. *Front. Psychol.* 7:1377. doi: 10.3389/fpsyg.2016.01377
- Sheehan, K. J., & Uttal, D. H. (2016). Children's learning from touch screens: a dual representation perspective. *Frontiers in Psychology*, 7, 1220.
- Sigman, A. (2012). Time for a view on screen time. *Archives of Disease in Childhood*, 97, 935–942. <http://dx.doi.org/10.1136/archdischild-2012-302196>
- Snijders, T. A. B., & Bosker, R. J. (1999). *Multilevel analysis: An introduction to basic and advanced multilevel modeling*. Londo, England: Sage.
- Stockless, A., Villeneuve, S. & Gingras, B. (2018). Maîtrise d'outils technologiques : son influence sur la compétence TIC des enseignants et les usages pédagogiques. *Canadian Journal of Learning and Technology*, 44(2).
- Thomas, A., Tazouti, Y., Hoareau, L., Luxembourger, C., Hubert, B., Fischer, J.P., & Jarlégan, A. (en révision). Development of a French-language early literacy scale: Structural analysis and links between the dimensions of early literacy. *Journal of Research in Reading*.
- Voogt, J., & McKenney, S. (2008). Using ICT to foster pre-reading and writing skills in young children. *Computers in the Schools*, 24(3), 83–94. doi:10.1300/J025v24n03_06

- Wagner, R. K., & Torgesen, J. K. (1987). The nature of phonological processing and its causal role in the acquisition of reading skills. *Psychological bulletin*, *101*(2), 192.
- Wagner, R. K., Torgesen, J. K., & Rashotte, C. A. (1994). Development of reading-related phonological processing abilities: New evidence of bidirectional causality from a latent variable longitudinal study. *Developmental psychology*, *30*(1), 73.
- Wang, F., Xie, H., Wang, Y., Hao, Y., An, J., and Chen, J. (2016). Using touchscreen tablets to help young children learn to tell time. *Front. Psychol.* *7*:1800. doi: 10.3389/fpsyg.2016.01800
- Wang, X. C., & Hoot, J. L. (2006). Information and communication technology in early childhood education. *Early Education & Development*, *17*(3), 317–322. doi:10.1207/s15566935eed1703_1
- Whitehurst, G. J., & Lonigan, C. J. (1998). Child development and emergent literacy. *Child development*, *69*(3), 848-872.
- Wood, C., Pillinger, C., & Jackson, E. (2010). Understanding the impact of young readers' literacy interactions with talking books and during adult reading support. *Computers and Education*, *54*(1), 190-198.
- Xie, H., Peng, J., Qin, M., Huang, X., Tian, F. & Zhou, Z. (2018). Can touchscreen devices be used to facilitate young children's learning ? A meta-analysis of touchscreen learning effect. *Frontiers in Psychology*, *9*(2580).
- Yelland, N. J. (2018). A pedagogy of multiliteracies: Young children and multimodal learning with tablets. *British Journal of Educational Technology*, *49*(5), 847-858.
- Yelland, N., & Masters, J. (2007). Rethinking scaffolding in the information age. *Computers and Education*, *48*, 362–382.
- Zevenbergen, R. (2007). Digital natives come to preschool: Implications for early childhood practice. *Contemporary Issues in Early Childhood*, *8*(1), 19–29. doi:10.2304/ciec.2007.8.1.19
- Zipke, M. (2017). Preschoolers explore interactive storybook apps: the effect on word recognition and story comprehension. *Educ. Inf. Technol.* *22*, 1695–1712. doi: 10.1007/s10639-016-9513-x

Annexe 1.

Description des différentes compétences évaluées en littérature émergente

Compétences (Dimension)	Description
Connaissance des lettres	
1. Reconnaissance des lettres	Des lettres en écriture majuscule ou en écriture cursive ont été présentées aux enfants sous forme d'une matrice avec quatre réponses possibles. Les enfants devaient pointer celle qui est nommée par l'expérimentateur.
2. Dénommer oralement des lettres	Dans cette épreuve, une lettre était présentée à l'enfant et celui-ci devait donner le nom de la lettre.
3. Prononcer oralement le son des lettres	Dans cette épreuve, une lettre était présentée à l'enfant et celui-ci devait donner le son de la lettre.
Vocabulaire	
4. Reconnaître des mots courants	Cette épreuve évalue le vocabulaire en réception. Quatre images étaient présentées à l'écran sans être nommées. Il était demandé aux enfants de montrer l'image qui représente le mot-cible.
5. Dénommer des parties du corps	Dans cette épreuve de vocabulaire en production, les enfants devaient dénommer différentes parties du corps humain.
6. Fluence verbale sémantique	Dans cette épreuve, une catégorie sémantique était présentée à l'enfant et celui-ci devait donner le plus de noms associés dans un temps fixe de vingt secondes.
Conscience phonologique	
7. Enlever la syllabe de la fin du mot	Cette épreuve de conscience phonologique consistait dans la manipulation des syllabes en enlevant celles de la fin des mots.
8. Enlever la syllabe du début du mot	Cette épreuve de conscience phonologique consistait dans la manipulation des syllabes en enlevant celles du début des mots.
9. Inverser les syllabes d'un mot	Cette épreuve de conscience phonologique consistait dans la manipulation des syllabes en inversant les syllabes des mots.
10. Identifier des rimes	Une dernière épreuve de conscience phonologique était une tâche de détection de l'intrus, il s'agissait d'identifier le mot qui ne rime avec les autres.
Comprehension	

11. Comprendre des consignes simples	Dans cette épreuve de compréhension des consignes simples l'expérimentateur demandait aux enfants de montrer l'élément de l'image correspondant aux informations données dans la consigne (par exemple : montre-moi le bus le plus long ?).
12. Comprendre des consignes organisation spatiale	XXX
13. Comprendre des textes courts	Dans cette épreuve de compréhension de texte lu, l'expérimentateur lisait aux enfants une histoire courte et leur posait par la suite des questions sur des éléments explicites de l'histoire (personnages, évènements...).
14. Comprendre des inférences à partir de textes courts	Dans cette dernière épreuve de compréhension l'expérimentateur lisait aux enfants une histoire et leur posait par la suite des questions sur des éléments implicites de l'histoire. Cette épreuve concernait l'inférence à partir d'un texte lu.

Annexe 2.

Description des différentes compétences évaluées en numératie émergente

Compétence	Description
1. Reconnaissance des chiffres	Des chiffres ou nombres sont présentés à l'enfant sous forme d'une matrice avec six réponses possibles. L'enfant doit pointer celui qui est nommé par l'expérimentateur.
2. Dénommer des chiffres / nombres	Des chiffres ou nombres sont présentés à l'enfant un seul à la fois. L'enfant doit dire quel était le nombre ou le chiffre.
3. Acquisition de la chaîne numérique	L'expérimentateur demande à l'enfant de compter aussi loin qu'il le peut. La tâche est arrêtée lorsqu'un enfant a fait une erreur ou a correctement compté jusqu'à 42 sans commettre d'erreur.
4. Dénombrement d'une collection	Dans cette épreuve, l'expérimentateur demande à l'enfant de compter des animaux présentés dans des images comportant un ensemble de 4, 6 ou 12. Les animaux sont disposés soit dans un ordre linéaire soit dans un ordre aléatoire. L'enfant reçoit un point pour chaque série s'il a correctement compté la collection.
5. Cardinalité	Pour chaque item de l'épreuve de dénombrement d'une collection, l'enfant doit indiquer combien il y a d'animaux en tout dans chaque image. L'enfant reçoit un point pour chaque bonne réponse correspondant à l'acquisition du principe cardinal. Sans recomptage de l'ensemble.
6. Estimation comparative	Il s'agit de comparer deux collections de points de taille identique ou de collections où les points diffèrent également par leur taille ou leur hauteur. Ce qui est évalué ici est la capacité d'estimer approximativement des quantités sans recours au comptage.
7. Subitizing	L'expérimentateur présente à l'enfant un ensemble de points (de 1 à 6) de manière linéaire et non linéaire pendant une demi seconde. L'enfant doit indiquer le nombre exact de points.
8. Correspondre nombres/collections	L'enfant doit apparier un chiffre (ou nombre) à la bonne collection d'objets.
9. Correspondre collections/nombres	Dans cette épreuve l'enfant doit apparier une collection au bon chiffre (ou nombre)
10. Problèmes verbaux	L'expérimentateur présente à l'enfant oralement des problèmes à histoire qui ne contenaient pas de distracteurs. L'enfant doit ensuite apporter une réponse à la question posée. Ces problèmes à histoire correspondaient à des problèmes d'addition ou de soustraction simples.
11. Sériation des nombres	Dans cette épreuve, l'enfant doit ranger dans l'ordre une ou plusieurs cartes représentant des nombres dans une série ordonnée.

Annexe 3.

Statistiques descriptives et analyses d'items des différentes épreuves

	T1				T2		
	Nombre d'items	Alpha de Cronbach	M	SD	Alpha de Cronbach	M	SD
Littératie émergente							
Reconnaitre une lettre isolée	14	.84	.26	.22	.85	.42	.24
Dénommer oralement des lettres	10	.93	.40	.38	.92	.63	.36
Comprendre des consignes simples	8	.79	.79	.27	.73	.87	.20
Reconnaitre des mots courants	14	.76	.44	.21	.76	.54	.21
Identifier des rimes	10	.77	.29	.25	.86	.44	.32
Comprendre consignes simples orga spatiale	8	.78	.57	.29	.80	.68	.29
Fluence verbale sémantique	2	-	.21	.14	-	.27	.14
Enlever la syllabe de la fin du mot	8	.87	.16	.25	.84	.29	.28
Dénommer des parties du corps	10	.81	.29	.26	.82	.42	.28
Comprendre des textes courts	8	.90	.38	.37	.89	.57	.36
Enlever la syllabe du début du mot	8	.82	.06	.16	.84	.15	.23
Prononcer oralement le son des lettres	8	.88	.17	.27	.90	.31	.35
Inverser les syllabes d'un mot	8	.98	.03	.16	.97	.11	.29
Comprendre des inférences à partir de textes courts	8	.88	.35	.34	.85	.51	.32
Numératie émergente							
Reconnaitre un chiffre en écriture normale	12	.99	.46	.32	.88	.67	.28
Dénommer des chiffres / nombres	10	.86	.23	.25	.87	.42	.28
Récitation de la chaîne numérique	-	-	.33	.24	-	.50	.28
Subitizing	18	.91	.25	.25	.91	.49	.27
Savoir résoudre des problèmes à histoire	8	.66	.18	.20	.79	.34	.28
Dénombrer une collection (ordinalité)	6	.83	.49	.34	.76	.69	.29
Dénombrer une collection (cardinalité)	6	.91	.51	.41	.85	.71	.33
Faire correspondre des collections avec des nombres	6	.72	.53	.32	.77	.73	.29
Faire correspondre des nombres avec des collections	6	.69	.51	.29	.71	.70	.27
Estimer des collections	8	.71	.67	.25	.75	.79	.23
Sérialisation des nombres écrits	6	.74	.26	.28	.76	.44	.32

Annexe 4.

Matrice de corrélations entre les variables de l'étude

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1														
2	.44	1													
3	.48	.55	1												
4	.74	.74	.91	1											
5	.75	.40	.46	.63	1										
6	.48	.62	.56	.66	.52	1									
7	.44	.46	.80	.75	.52	.58	1								
8	.64	.58	.76	.83	.78	.81	.89	1							
9	.59	.51	.65	.73	.54	.59	.62	.70	1						
10	.70	.48	.55	.70	.62	.54	.51	.65	.81	1					
11	.39	.45	.47	.53	.33	.44	.42	.48	.44	.42	1				
12	.69	.53	.64	.76	.62	.60	.59	.72	.92	.97	.52	1			
13	.52	.39	.57	.63	.60	.54	.64	.72	.69	.67	.31	.71	1		
14	.60	.38	.49	.60	.67	.55	.57	.71	.65	.72	.31	.73	.85	1	
15	.36	.40	.56	.57	.43	.50	.56	.61	.52	.43	.39	.50	.49	.47	1
16	.60	.43	.57	.66	.68	.59	.65	.76	.71	.73	.35	.76	.94	.97	.59

NB. 1. CONNLETTRE1, 2. CONSPHONO1, 3. LO1, 4. TOTLIT1, 5. CONNLETTRE2, 6. CONSPHONO2, 7. LO2, 8. TOTLIT2, 9. NOMBRE1, 10. RELATION1, 11. OPERATION1, 12. TOTNUM1, 13. NOMBRE2, 14. RELATION2, 15. OPERATION2 et 16. TOTNUM2

Chapitre 5 : L'aspect prédictif et les liens entre les compétences en littératie et en numératie émergente

Dans ce chapitre, nous nous proposons d'aborder d'une part, l'aspect prédictif des compétences en littératie et en numératie émergentes et d'autre part les liens entre ces compétences. De nombreuses recherches ont montré l'influence des compétences émergentes sur le développement des compétences ultérieures (Duncan et al., 2007; Krajewski & Schneider, 2009b). Les compétences en numératie et en littératie émergentes ne se développeraient pas séparément l'une de l'autre. Leur développement semblerait être lié de façon bidirectionnelle de la maternelle jusqu'au lycée (Claessens & Engel, 2013; Duncan et al., 2007; Praet et al., 2013). Ainsi, la numératie et la littératie émergentes sont prédictives l'une de l'autre sur le long terme (Welsh et al., 2010). Les enfants ayant des difficultés dans l'un des deux domaines sont plus susceptibles d'avoir aussi des difficultés dans l'autre domaine.

Les relations entre littératie et numératie émergentes pourraient s'expliquer par des processus d'apprentissage communs, par des compétences cognitives spécifiques ou encore par des compétences langagières associées aux deux domaines. La littératie et la numératie émergentes suivent donc des étapes développementales similaires. Par exemple, les enfants commencent à apprendre des mots de nombres en même temps que d'autres étiquettes verbales. Dès l'âge de deux ans, les enfants sont capables de reconnaître les mots réservés aux nombres et de les employer correctement (Fuson et al., 1982). Dans les langues alphabétiques, l'enfant perçoit d'abord les unités sonores les plus larges pour aller ensuite vers les unités les plus fines. La découverte du langage suit donc un modèle de développement allant du mot au phonème : l'enfant identifie le mot avant la syllabe, la syllabe avant l'attaque ou la rime et l'attaque ou la rime avant le phonème (Anthony et al., 2003). Le développement de la numératie suit le même chemin : l'enfant, principalement américain (de petites différences existences dans l'ordre d'acquisition des principes de comptage), perçoit les mots de nombres comme une chaîne non-sécable puis progressivement il les considère comme des composites, c'est-à-dire des ensembles d'autres nombres (Julie Sarama & Clements, 2009). Chez les enfants ayant des difficultés d'apprentissage, des déficits en littératie et en numératie émergentes vont souvent de pair (Hecht et al., 2001; Snow et al., 1998). Par exemple, au CM1 certains petits calculs à un chiffre et la lecture de texte partageraient un processus cognitif sous-jacent, à savoir la capacité de récupérer facilement des connaissances déclaratives à partir de la mémoire à long terme

(Koponen et al., 2007). La littératie et la numératie émergentes semblent donc suivre des trajectoires développementales similaires.

Dans un premier temps, nous nous intéresserons à l'aspect prédictif des différentes compétences en littératie et en numératie émergentes. Ensuite, nous aborderons les liens existants entre la littératie et la numératie émergente. Enfin, dans un dernier temps, nous tenterons d'explicitier plus finement les facteurs expliquant ces liens.

5.1.L'aspect prédictif de la littératie émergente

Rabiner et al. (2016) se sont intéressés aux caractéristiques influençant la réussite académique. Plus particulièrement, ils se sont concentrés sur l'influence des connaissances en littératie émergente sur la réussite académique. Ainsi, les enfants ayant de meilleures compétences en littératie émergente obtenaient de meilleurs résultats en lecture au CM2 (*fifth grade*). De même, les compétences en littératie émergente influençaient aussi les résultats en mathématiques cinq années plus tard (Rabiner et al., 2016). Cependant, les compétences attentionnelles des enfants apparaissent comme une variable intermédiaire entre les compétences émergentes et les résultats ultérieurs. Lopez et al. (2007) ont aussi montré que de meilleures compétences en littératie émergente (maîtrise de l'espagnol et de l'anglais) chez les enfants d'âge préscolaire engendraient de meilleurs résultats en mathématiques dans les premières années de l'école primaire.

5.1.1. La connaissance des lettres

La connaissance du nom et celle du son des lettres sont d'importants prédicteurs des compétences de lecture (Lonigan et al., 2008; Puranik et al., 2013; Schatschneider et al., 2004). Ainsi, des capacités de reconnaissance de l'alphabet peu développées peuvent entraîner des difficultés de lecture ultérieures (Catts et al., 2001; Snow et al., 1998). La connaissance des lettres en grande section de maternelle serait corrélée avec la lecture de texte au CM1 (*grade 4*) (Koponen et al., 2007) et prédirait les scores en lecture au CM2 (*grade 5*) (Rabiner et al., 2016). La dénomination des lettres serait le facteur le plus prédictif de la reconnaissance des mots (Negro & Genelot, 2009). La connaissance du nom des lettres apparaît aussi comme étant un prédicteur plus puissant de la lecture que la connaissance du son des lettres (Schatschneider et

al., 2004). Par ailleurs, des liens directs ont été observés entre la connaissance du nom des lettres et les capacités de décodage (Hillairet de Boisferon et al., 2010). La dénomination des lettres serait aussi un prédicteur des performances ultérieures de compréhension de textes (Schatschneider et al., 2004). La connaissance du son des lettres est aussi un prédicteur important de la réussite de l'apprentissage de la lecture (McBride-Chang, 1999). Les enfants qui ont de faibles connaissances des sons des lettres sont plus à risques d'avoir des difficultés de lecture et d'écriture (Storch & Whitehurst, 2002). Plus spécifiquement, la connaissance du son des lettres est fortement corrélée à la capacité qu'a le jeune enfant à écrire son prénom (Blair & Savage, 2006).

5.1.2. La conscience phonologique

Plusieurs études portant sur différentes langues (anglais, français, portugais, néerlandais, hongrois, tchèque et finnois) ont montré que la conscience phonémique était un prédicteur important des différences individuelles de compétences en lecture (Caravolas et al., 2005; Vaessen et al., 2010; Ziegler et al., 2010). Plus globalement, le développement de la conscience phonologique constituerait l'un des prérequis nécessaires à l'apprentissage de la lecture. Ainsi, la conscience phonologique est la compétence de traitement phonologique la plus liée à l'apprentissage de la lecture, à la lecture de mots et aussi à la compréhension (Lonigan et al., 2008; Sprugevica & Hoiem, 2004; Storch & Whitehurst, 2002; Wagner et al., 1994; Wagner & Torgesen, 1987). Par exemple, la conscience phonologique à l'école maternelle influencerait la lecture de texte au CM1 (*grade 4*) (Koponen et al., 2007). Wagner et Torgesen (1987) ont montré que les compétences de conscience phonologique facilitent l'acquisition du principe alphabétique. Lonigan et al. (2000) ont montré que la conscience phonologique, comparée à d'autres prédicteurs, était l'indicateur le plus stable et le plus robuste des compétences de lecture au CP (*first grade*). De même, les compétences de conscience phonologique en maternelle sont l'un des cinq facteurs permettant de prédire la présence d'un trouble de la lecture en CE1, tout comme les compétences d'identification des lettres, l'imitation de phrases, la dénomination rapide et le niveau scolaire de la mère (Catts et al., 2001). Anthony et al. (2007) ont montré que la conscience phonologique était le meilleur prédicteur des compétences de décodage des enfants d'âge préscolaire plus âgés. La conscience phonologique encourage le développement du décodage, par la correspondance entre les graphèmes dans le langage écrit et les phonèmes dans le langage oral (Whitehurst & Lonigan, 2001). Ainsi, si l'enfant n'arrive

pas à isoler les sons du langage oral, alors il aura des difficultés pour réaliser les correspondances entre écrit et oral. Cela peut expliquer qu'un entraînement de la conscience phonologique semblerait améliorer les compétences en lecture des enfants (Suggate, 2016). Enfin, la conscience phonologique est aussi un fort prédicteur de l'orthographe (Kim et al., 2014).

5.1.3. Le vocabulaire

Dès le plus jeune âge, le niveau de vocabulaire de l'enfant conditionne fortement de nombreux apprentissages. Le niveau de vocabulaire de l'enfant durant la période préscolaire est prédictif de la réussite académique ultérieures, des compétences en littératie et des compétences langagières (Bleses et al., 2016; Bornstein et al., 2014). La connaissance du vocabulaire chez les jeunes enfants de 16 à 24 mois prédit la connaissance du vocabulaire, la conscience phonologique, la précision du décodage et la compréhension de lecture lorsque les enfants sont âgés de 5 à 9 ans (Duff et al., 2015). De même, Suggate et al. (2018) ont montré que le niveau de vocabulaire à l'âge de 19 mois prédit la compréhension de la lecture à l'âge 12 ans.

De nombreuses habiletés linguistiques sont nécessaires à l'apprentissage de la lecture. Le vocabulaire apparaît comme étant l'un des éléments fondamentaux de l'apprentissage de la lecture. Le vocabulaire joue ainsi un rôle dans le décodage de mots, aussi bien lors de l'apprentissage de la lecture (Suggate et al., 2014) que plusieurs années plus tard (Oakhill & Cain, 2012). Plus spécifiquement, les performances des enfants d'âge préscolaire à des tâches de vocabulaire (sémantique) et de grammaire (syntaxe) sont des prédicteurs des compétences en lecture à l'école élémentaire (Scarborough, 1998). De même, les enfants ayant de plus faibles compétences de vocabulaire en réception et en émission, à l'âge de quatre ans, ont tendance à développer plus de problèmes de lecture (Scarborough, 1990). Plus globalement, les élèves qui ont des difficultés précoces dans le développement du vocabulaire et de leurs compétences grammaticales ont plus de probabilités de rencontrer des difficultés en lecture et en écriture (Catts et al., 2001; Scarborough, 1998; Whitehurst & Lonigan, 2001). La connaissance du vocabulaire affecte aussi le degré de compréhension orale et écrite de l'élève (Cain et al., 2004; Currie & Cain, 2015; Muter et al., 2004; Oakhill et al., 2003). Plus précisément, l'étude de Currie et Cain (2015) a montré que le niveau de vocabulaire de l'enfant lui permet de comprendre des inférences de deux manières : d'une part, la connaissance de la signification

des mots permet à l'enfant de percevoir les inférences et d'autre part, le vocabulaire soutient les processus de mémoire nécessaires aux processus inférentiels.

5.1.4. La compréhension orale

Les compétences linguistiques orales jouent un rôle essentiel, indépendamment de la capacité phonologique, dans la réussite en lecture. En maternelle, les compétences linguistiques orales affectent le développement des capacités liées au code, l'expression orale, la connaissance des lettres et l'écriture. Ces compétences vont à leur tour influencer le décodage des mots (Storch & Whitehurst, 2002). La compréhension orale en maternelle joue ainsi un rôle important vis-à-vis de la compréhension de lecture à l'école primaire (Kendeou et al., 2009; Storch & Whitehurst, 2002). Certains programmes entraînant les compétences nécessaires à la compréhension du langage ont montré des gains à long terme sur la compréhension de lecture (Lyster et al., 2016). Catts et al. (2006) ont aussi montré que des élèves de 12 ans ayant une faible compréhension de la lecture avaient obtenu de bons résultats lors de tâches phonologiques, mais de mauvais résultats lors de tâches de compréhension du vocabulaire, des compétences grammaticales et du discours à l'âge de 6 et 8 ans.

5.2. L'aspect prédictif de la numératie émergente

Ten Braak et al. (2018) ont observé des corrélations entre les compétences en numératie émergente évaluées en grande section de maternelle et les compétences mathématiques en CP (*grade 1*). Les compétences en numératie émergente en maternelle expliquent une part de variance importante de la réussite scolaire des élèves de CM1 (*grade 4*) (Pagani et al., 2010). Claessens et al. (2009) ont montré que les compétences mathématiques en grande section de maternelle étaient prédictives des résultats en CM2 (*grade 5*). Les compétences en mathématiques étaient non seulement très prédictives des résultats ultérieurs en mathématiques, mais aussi des résultats en lecture. De même, dans leur étude, Duncan et al. (2007) ont montré que le niveau des élèves en numératie émergente prédisait la réussite en mathématiques jusqu'au CM2 (*grade 5*). L'étude de Watts et al. (2014), qui a suivi 1364 élèves âgés de 4,5 ans à 15 ans, a également constaté qu'il existe des liens significatifs entre les compétences en numératie émergente des enfants d'âge préscolaire et les résultats en mathématiques des adolescents de 15 ans, même en tenant compte des résultats en littératie émergente, des

compétences cognitives et des caractéristiques de la famille et de l'enfant. Plus spécifiquement, cette même étude a montré que les gains entre l'école maternelle et le CP étaient plus prédictifs des compétences mathématiques des élèves de 15 ans que les seules compétences des élèves en numératie émergente. Enfin, l'étude de MacDonald et Carmichael (2018) confirme aussi ces résultats. Leur étude a montré l'importance des mathématiques dans la petite enfance. Ainsi, des analyses bivariées ont montré que l'acquisition en numératie émergente est modérément associée aux résultats mathématiques ultérieurs (corrélation de .30), même jusqu'en troisième (*grade 9*).

Toutes les compétences en numératie émergente sont nécessaires et prédictives du développement des compétences mathématiques ultérieures (National Research Council (U.S.), 2009). En utilisant des analyses de régression, Nguyen et al. (2016) ont montré que les compétences de comptage plus avancées étaient plus prédictives que les compétences basiques de comptage. Dans leur étude, les compétences basiques de comptage renvoient à la récitation de la chaîne numérique, à la correspondance terme-à-terme, à la reconnaissance des chiffres et au subitizing perceptif (reconnaitre une quantité sans compter). Tandis que les compétences de comptage plus avancées incluent le dénombrement avec la cardinalité, le comptage à partir ou avant un nombre spécifique et le subitizing conceptuel (reconnaitre une quantité comme un ensemble d'ensembles ou comme un tout). Morgan, Farkas et Wu (2009) ont constaté que 70% des enfants ayant commencé et terminé la maternelle en étant dans les 10% les plus faibles en numératie émergente étaient également les plus faibles en CM2 (*grade 5*). Rabiner et al. (2016) ont obtenu des résultats similaires : les résultats en mathématiques au CM2 (*grade 5*) des élèves de leur cohorte étaient prédits par les compétences en numératie émergente. Cela souligne donc l'importance des connaissances en numératie émergente pour les résultats mathématiques ultérieurs. La numératie émergente, plus spécifiquement les compétences en comptage, serait un bon prédicteur des performances mathématiques ultérieures (Aubrey et al., 2006). Les compétences de comptage comme l'utilisation de la chaîne numérique verbale ou le dénombrement prédisent les compétences mathématiques basiques au début de l'école primaire (Aunola et al., 2004; Jordan et al., 2007; Koponen et al., 2007). Les compétences de comptage chez des enfants d'âge préscolaire apparaissent comme corrélées à la fluence de calcul, au calcul procédural et à la lecture de texte au CM1 (*grade 4*) (Koponen et al., 2007). La fluence de calcul fait référence à la capacité à résoudre des problèmes à un chiffre présentés sous forme chiffrée, tandis que le calcul procédural renvoie à la capacité à utiliser des algorithmes pour résoudre des problèmes écrits avec plusieurs chiffres. Les compétences de comptage à l'école maternelle

impacteraient les compétences de calcul à un chiffre. Ces compétences de calcul à un chiffre atténueraient l'impact des compétences de comptage en maternelle sur le calcul procédural. De plus, des corrélations modérées ont été observées entre le concept de nombre chez les enfants d'âge préscolaire et la fluence de calcul (.40), le calcul procédural (.48) et la lecture de texte (.39) au CM1 (*grade 4*). L'étude d'Aunio et Niemivirta, (2010) montre que l'acquisition des compétences de comptage (utilisation de la chaîne numérique verbale) et de la compréhension des relations entre les nombres et leurs quantités avant l'école élémentaire sont prédictives de l'acquisition de compétences arithmétiques et des performances mathématiques globales au CP. Certaines études longitudinales ont montré que le développement des compétences en numératie émergente de l'entrée en maternelle jusqu'au milieu du CP était un facteur prédictif des résultats en mathématiques au CP (Jordan et al., 2007) et prédirait à la fois la trajectoire développementale et les résultats en mathématiques entre le CP et le CE2 (Jordan et al., 2009). Plus globalement, les études des Jordan et al. (Jordan et al., 2006, 2009, 2010) ont montré que les compétences en numératie émergente en maternelle étaient hautement prédictives des compétences en calcul et en résolution de problèmes jusqu'au CM1 (*grade 4*).

5.2.1. La connaissance des chiffres

Nous allons désormais nous intéresser à l'influence de la connaissance des chiffres sur le développement des autres compétences en numératie émergente et des compétences ultérieures. La connaissance émergente des nombres écrits influence les compétences mathématiques formelles et, plus tard, les résultats en mathématiques. Les liens entre connaissances informelles et formelles en mathématiques chez les enfants d'âge préscolaire sont ainsi entièrement soutenus par la connaissance des symboles numériques (Purpura et al., 2013). Des études longitudinales ont aussi indiqué que les compétences numériques en fin de grande section (connaissance des chiffres et dénombrement) étaient de puissants prédicteurs des résultats en mathématiques à la fin du CP (Chard et al., 2005; Clarke & Shinn, 2004). De même, la reconnaissance de nombres évaluée au début du CP est ainsi un puissant prédicteur de la croissance des compétences en arithmétique au cours des 11 mois suivants (Göbel et al., 2014). Les connaissances symboliques des nombres, c'est-à-dire l'utilisation du symbole pour représenter le nombre, au cours de la maternelle est ainsi associée de manière certaine à la réussite ultérieure en mathématiques et au développement arithmétique (Merkley & Ansari, 2016). De plus, les connaissances symboliques des nombres des enfants d'âge préscolaire

permettent d'établir un lien entre leurs compétences informelles en calcul et leurs résultats futurs en mathématiques (Purpura et al., 2013). Plus précisément, la capacité de nommer les chiffres arabes et de les relier à leurs quantités respectives permet de faire les liens entre compétences formelles et informelles. Ainsi, il est important que l'enfant puisse faire la correspondance entre les trois représentations du nombre : les mots de nombres, leurs représentations visuelle-arabe et leurs représentations quantitatives (Purpura et al., 2013).

5.2.2. La récitation de la chaîne numérique

La connaissance de la chaîne numérique constitue une base pour l'apprentissage des mathématiques (Aunola et al., 2004; Nguyen et al., 2016b; Zhang et al., 2014, 2017). La récitation de la chaîne numérique verbale est l'un des plus puissants prédicteurs du niveau et de l'évolution des compétences mathématiques durant l'école primaire (Aunola et al., 2004; Zhang et al., 2017). Zhang et al. (2020) ont aussi observé que la connaissance de la chaîne numérique était corrélée aux compétences mathématiques du CP (*grade 1*) au CM1 (*grade 4*). Toutes les corrélations observées se situaient entre .38 et .48.

5.2.3. Le dénombrement et la cardinalité

L'acquisition du principe cardinal permettrait aux enfants de construire une représentation des nombres entiers, c'est-à-dire de comprendre que chaque nombre dans la chaîne numérique verbale s'applique à un ensemble comportant un élément de plus que le nombre précédent (M Le Corre et al., 2006). La compréhension de la cardinalité est un prérequis pour l'apprentissage du nombre chez les enfants de grande section de maternelle et de CP et prédit la réussite mathématique ultérieure (Geary & vanMarle, 2018; Jordan et al., 2006, 2007, 2009; Merkley & Ansari, 2016). L'acquisition du principe cardinal par les enfants d'âge préscolaire servirait ainsi de médiateur dans la relation entre les compétences approximatives non symboliques (sens du nombre ou système approximatif du nombre) et les premiers résultats en mathématiques (Chu et al., 2015; Van Marle et al., 2014). Plus précisément, Chu et al. (2015) ont montré que des tâches de sens du nombre et de cardinalité étaient des prédicteurs significatifs des résultats en mathématiques en fin d'année de petite section de maternelle. Cependant, la relation entre sens du nombre et la réussite mathématique serait médiatisée par la cardinalité. Ainsi, le sens du nombre faciliterait la compréhension explicite du principe

cardinal qui à son tour influencerait le développement de la numératie émergente. De même, les enfants ayant acquis le principe cardinal ont plus de chances de réussir des tâches numériques non symboliques (Slusser et al., 2013). Les compétences en matière de comptage et de cardinalité des enfants d'âge préscolaire sont significativement prédictives des résultats en mathématiques en cinquième année (Nguyen et al., 2016b). De résultats similaires ont été obtenus par Fyfe et al. (2019) : la correspondance terme-a-terme et le principe cardinal (compétences de comptage) sont corrélées aux compétences mathématiques en CM1 (*grade 4*), CM2 (*grade 5*) et sixième (*grade 6*). Geary et al. (2018) ont aussi montré que ce n'est pas simplement la connaissance du cardinal d'une collection mais l'âge d'acquisition du principe cardinal qui est central pour le développement mathématique ultérieur et la préparation à l'école.

5.2.4. Le subitizing, l'estimation et les comparaisons de quantités

Le subitizing est un processus perceptif rapide et automatique des petites quantités, qui est remplacé par le comptage lorsque la quantité est supérieure ou égale à quatre. Kroesbergen et al. (2009) ont montré que le subitizing était étroitement lié à la numératie émergente. Dans leur étude, le subitizing expliquait 22% de la variance des compétences en matière de comptage. Le subitizing semble précéder et soutenir le développement de la capacité de comptage (Le Corre et al., 2006).

Chez des enfants de grande section de maternelle, les comparaisons approximatives symboliques (i.e. comparaisons de nombres) et non-symboliques (i.e. comparaisons de quantités : points, doigts, constellations) sont corrélées aux compétences de dénombrement et aux additions (e.g. Fischer & Thierry, 2020 ; Xenidou-Dervou et al., 2013). Cependant, d'autres auteurs ont montré que les comparaisons de quantités utilisant des représentations non symboliques du nombre n'étaient pas réellement corrélées à la performance mathématique ultérieure (Leibovich & Ansari, 2016). Une récente méta-analyse a confirmé que la taille de l'effet était plus forte pour la corrélation entre la comparaison symbolique et les compétences mathématiques que pour la comparaison non symbolique et les compétences mathématiques (Schneider et al., 2017). Mussolin et al. (2012) ont montré que la comparaison de quantités chez des enfants de trois à six ans était associée à la maîtrise des nombres symboliques. Selon l'âge

de l'enfant, les compétences de comparaisons de quantités sont liées différemment à la connaissance des noms de nombres et à la connaissance des chiffres arabes.

5.2.5. Les correspondances chiffre/quantité et quantité/chiffre

La compréhension des relations entre les chiffres et les quantités est fondamentale pour le développement mathématique à long terme de l'enfant (Jordan et al., 2009). De plus, Fyfe et al. (2019) ont observé des corrélations modérées entre les correspondances entre chiffre et quantité et les compétences mathématiques en CM1 (*grade 4*), CM2 (*grade 5*) et sixième (*grade 6*).

5.2.6. Les problèmes verbaux (calculs simples)

De même que la compréhension des relations entre les chiffres, la capacité à utiliser des procédures arithmétiques pour manipuler ces relations est fondamentale pour le développement mathématique à long terme de l'enfant (Jordan et al., 2009). Les problèmes verbaux sont couramment utilisés dans les recherches longitudinales et prédisent les résultats des enfants en mathématiques plusieurs années plus tard (Jordan et al., 2007, 2009). Rabiner et al. (2016) ont montré que les problèmes verbaux en grande section de maternelle prédisaient les scores en calcul au CM2 (*grade 5*).

5.3. Les liens existants entre les différentes composantes de la littératie émergente et de la numératie émergente

5.3.1. Les liens synchroniques entre les compétences en littératie émergente à l'école maternelle

Comme nous l'avons défini précédemment, la littératie émergente se compose de quatre domaines spécifiques : la connaissance des lettres, la conscience phonologique et le vocabulaire et la compréhension orale. Le vocabulaire et la compréhension orale renvoient tout deux aux compétences de langage oral. Ces quatre domaines se développent en interaction durant toute la période préscolaire. Koponen et al. (2007) ont observé des corrélations modérées entre la compréhension orale, la connaissance des lettres et la conscience phonologique chez des enfants

d'âge préscolaire. La connaissance du son des lettres contribue au développement de la littératie émergente chez l'enfant de trois manières (Huang et al., 2014). Tout d'abord, la connaissance du son des lettres aide l'enfant à comprendre le principe alphabétique, c'est-à-dire que le langage est composé de sons et que les lettres représentent ces sons. Ensuite, la connaissance du son des lettres est nécessaire pour commencer à décoder des mots. Enfin, elle permet aussi d'avoir les bases nécessaires pour développer la conscience phonologique. La connaissance du nom des lettres de l'alphabet serait de surcroit nécessaire au développement de la conscience phonémique (Castles & Coltheart, 2004; Foulin, 2005). Biot-Chevrier et al., (2008) ont également montré que les enfants qui connaissaient plus de noms de lettres que les autres avaient de meilleures capacités phonologiques.

Dans son article, Foulin (2005) suggère que l'enfant commence à développer ses compétences de conscience phonémique lorsqu'il apprend l'alphabet. Dans l'étude de Pears et al. (2016), la conscience phonémique est faiblement corrélée avec les concepts liés à l'écrit. Purpura et al. (2011) ont observé une corrélation modérée entre la conscience phonologique et les connaissances liées à l'écrit. Enfin, une corrélation modérée existe aussi entre la conscience phonologique et le vocabulaire. Betts et al. (2009) ont observé une corrélation de .61 entre la connaissance du nom de lettres et la connaissance du son des lettres. Ces mêmes auteurs ont aussi démontré une forte corrélation entre deux compétences de conscience phonologique : le repérage de rimes et les allitérations. Dans l'étude de Powell et Atkinson (2020), des corrélations entre la connaissance des lettres et la conscience phonologique ont été observées chez des enfants de trois ans. De plus, la connaissance des lettres à trois ans était corrélée avec les compétences de conscience phonologique à l'âge de quatre ans et demi et six ans. Lerner et Lonigan (2016) se sont intéressés aux relations bidirectionnelles entre connaissance des lettres et conscience phonologique durant la moyenne section de maternelle (*preschool*). Ainsi, la connaissance des lettres et la conscience phonologique sont liées de manière bidirectionnelle : le niveau initial de chacune prédisait de manière unique la croissance de l'autre. Les enfants qui avaient initialement une plus grande connaissance des noms de lettres ont vu leur conscience phonologique s'accroître, et réciproquement les enfants qui avaient initialement de meilleures compétences de conscience phonologique ont vu leur connaissance des noms de lettres s'accroître. Pears et al. (2016) ont observé des corrélations entre différentes compétences en littératie émergente chez des enfants de moyenne section de maternelle (*pre-kindergarten*). Ainsi, la connaissance du nom des lettres apparait comme étant faiblement corrélée ($r = .27$, p

< .05) avec la connaissance du phonème initial des mots (conscience phonémique) et moyennement corrélée ($r = .56$, $p < .05$) avec les concepts liés à l'écrit.

Les compétences langagières orales des élèves de maternelle affectent le développement de leurs capacités liées au code, l'expression orale, la connaissance des lettres et l'écriture (Storch & Whitehurst, 2002). Quelques recherches ont aussi examiné les relations entre le langage oral et la conscience phonologique dans les années préscolaires. Cooper et al. (2002) ont rapporté que les compétences en langage oral (vocabulaire expressif et réceptif, syntaxe et morphologie), expliquaient une part importante de la variance des scores de conscience phonologique. Le langage oral exercerait une influence sur le développement de la conscience phonologique. Une forte corrélation ($r = .60$, $p < .01$) existe entre le vocabulaire et la conscience phonologique chez des enfants de grande section de maternelle (Hipfner-Boucher et al., 2014). Goodrich et Lonigan (2015) ont également fait état d'une relation significative entre le vocabulaire expressif et la conscience phonologique chez des enfants de grande section de maternelle (*kindergarten*). Le vocabulaire semble être aussi lié à la mémoire phonologique ($r = .60$, $p < .01$) et à la connaissance de l'alphabet (Hipfner-Boucher et al., 2014).

Nous avons réalisé une étude auprès de 167 élèves de grande section de maternelle afin d'explorer les liens entre les différentes dimensions de la littératie émergente (Thomas et al., soumis a). De nombreuses tâches ont ainsi été évaluées telles que la reconnaissance des lettres, la connaissance du nom des lettres, la connaissance du son des lettres, le vocabulaire en réception (reconnaître l'image correspondant au mot prononcé), le vocabulaire en production (nommer des parties du corps), la fluence verbale, la suppression de la dernière syllabe du mot, la suppression de la première syllabe du mot, l'inversion de syllabes, l'identification d'une syllabe dans un mot, l'identification de rimes, la compréhension de phrases, la compréhension littérale de texte et la compréhension d'inférences. Toutes ces tâches sont corrélées les unes avec les autres avec des corrélations se situant entre .26 et .74, ce qui montre bien l'importance des liens entre les différentes compétences (voir Tableau 10). Les plus fortes corrélations s'observent entre les tâches mesurant un même domaine. Ainsi, la reconnaissance des lettres est fortement corrélée avec la dénomination des lettres ($r = .74$, $p < .01$) et avec la connaissance du son des lettres ($r = .70$, $p < .01$). De même, le vocabulaire en réception est fortement corrélé avec le vocabulaire en production ($r = .67$, $p < .01$). Les différentes tâches de conscience phonologique apparaissent comme étant modérément corrélées les unes aux autres. Nous pouvons toutefois noter une corrélation de .69 ($p < .01$) entre la suppression de la première

syllabe du mot et l'inversion de syllabes qui sont deux des tâches les plus difficiles de la conscience phonologique. Enfin, la compréhension de phrases est fortement corrélée avec la compréhension littérale de texte ($r=.68, p < .01$) et modérément corrélée avec la compréhension d'inférences ($r=.52, p < .01$).

Tableau 10.

Matrice de corrélation entre les différentes tâches en littératie émergente (Thomas et al., soumis a)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	1												
2	.74	1											
3	.70	.58	1										
4	.40	.29	.39	1									
5	.41	.34	.32	.67	1								
6	.42	.30	.31	.55	.58	1							
7	.39	.42	.34	.46	.43	.40	1						
8	.50	.38	.55	.43	.45	.45	.47	1					
9	.54	.43	.58	.43	.47	.42	.49	.69	1				
10	.46	.38	.50	.51	.42	.29	.44	.47	.48	1			
11	.46	.38	.40	.53	.60	.38	.43	.46	.51	.42	1		
12	.41	.37	.36	.56	.53	.58	.50	.44	.37	.41	.44	1	
13	.39	.34	.34	.53	.54	.52	.48	.40	.41	.37	.46	.68	1
14	.38	.26	.28	.42	.44	.46	.27	.31	.30	.32	.36	.52	.57

NB. N = 167, toutes les corrélations sont significatives à .01. 1. Reconnaissance des lettres ; 2. Dénomination des lettres ; 3. Connaissance du son des lettres ; 4. Reconnaître des mots courants ; 5. Dénomination des parties du corps ; 6. Fluence verbale ; 7. Supprimer la syllabe finale des mots ; 8. Supprimer la syllabe initiale des mots ; 9. Inverser les syllabes dans un mot ; 10. Identifier une syllabe dans un mot ; 11. Identifier des rimes ; 12. Compréhension de phrases ; 13. Compréhension littérale de texte ; 14. Compréhension d'inférences.

5.3.2. Les liens synchroniques entre les compétences en numératie émergente à l'école maternelle

La numératie émergente se compose de plusieurs compétences et concepts (Jordan et al., 2007). La connaissance des chiffres est fortement corrélée avec les correspondances chiffres/quantités (Purpura & Lonigan, 2015). Le concept de nombre à l'école maternelle serait aussi fortement corrélé avec les compétences de comptage (Koponen et al., 2007). Dans leur étude, Rausch et Pásztor (2017) ont observé des corrélations modérées entre la reconnaissance

des chiffres et la connaissance de la chaîne numérique. De fortes corrélations ont été repérées entre la reconnaissance des chiffres et le calcul (addition et soustraction simples sans symboles).

La connaissance de la chaîne numérique verbale est une base nécessaire à l'acquisition d'autres compétences en numératie émergente. Ainsi, la connaissance de l'ordre des mots des nombres est essentielle au développement du dénombrement, et elle joue un rôle important dans la résolution des additions et soustractions (Aunio & Räsänen, 2016). Purpura et Lonigan (2015) ont aussi montré que la récitation de la chaîne numérique était fortement corrélée avec le dénombrement et la correspondance terme-à-terme. Plus récemment, Hornburg et al. (2018) ont observé des corrélations modérées entre la récitation de la chaîne numérique, la correspondance terme à terme, l'identification des chiffres, la cardinalité, les relations nombres/quantités, la comparaison de quantité et de chiffres, les problèmes à histoire et le subitizing. Les enfants apprennent à réciter la chaîne numérique verbale par cœur avant de comprendre la signification numérique des mots de nombre et des chiffres arabes (Wynn, 1990).

Les compétences de comptage se développent rapidement après l'acquisition de la chaîne numérique verbale. Le dénombrement est aussi une composante importante de la numératie émergente. Il est lié au principe cardinal, c'est-à-dire lorsque les enfants identifient le dernier nombre de la séquence comme étant la quantité d'éléments qu'ils ont comptée (Aunio & Niemivirta, 2010). Le dénombrement apparaît aussi comme étant fortement corrélé avec la connaissance des chiffres (Purpura & Lonigan, 2015). De même, la correspondance terme à terme est fortement liée aux compétences de comptage comme le principe cardinal ou le dénombrement.

Dans l'étude de Chu et al. (2016), les problèmes arithmétiques (additions et soustractions à un chiffre) apparaissent comme étant fortement corrélées à différentes compétences en numératie émergente évaluées en petite et en moyenne section de maternelle. Ainsi, les problèmes arithmétiques verbaux sont corrélés avec la reconnaissance des chiffres, le dénombrement, le principe cardinal, l'estimation, la comparaison de quantités et les calculs non-verbaux.

Le subitizing semble précéder et soutenir le développement des compétences de comptage (Le Corre et al., 2006). Beltrán-Navarro et al. (2018) ont aussi montré que le subitizing était fortement corrélé aux compétences de comptage comme la correspondance terme-à-terme, le dénombrement et le principe cardinal. De plus, cette même étude a démontré des corrélations

modérées entre le subitizing, la comparaison de quantités et les problèmes à histoire (problèmes arithmétiques verbaux). Tandis que l'étude de Hornburg et al. (2018) a montré que le subitizing était modérément corrélé avec toutes les compétences en numératie émergente.

Globalement, malgré une structure factorielle instable de la numératie émergente, la majorité des études s'accordent à dire qu'il existe des effets modérés à forts entre les différentes compétences évaluées (Hornburg et al., 2018). Pour certains auteurs, la numératie émergente serait composée d'un seul et unique facteur. Ce facteur serait lui-même influencé différemment en fonction des compétences testées (Aragón et al., 2016).

Nous nous sommes intéressés aux liens entre les différentes dimensions de la numératie émergente (Thomas et al., soumis b). Cette étude a été réalisée auprès de 167 élèves de grande section de maternelle et neuf tâches en numératie émergente ont été évaluées. Ainsi, la reconnaissance des chiffres, la dénomination de chiffres, la récitation de la chaîne numérique, le dénombrement terme-à-terme, le principe cardinal, la comparaison d'ensemble, le subitizing, les relations chiffres/quantités et les problèmes à histoire ont été mesurés. Toutes ces tâches sont corrélées les unes avec les autres avec des corrélations se situant entre .27 et .75, ce qui montre bien l'importance des liens entre les différentes compétences (voir Tableau 11). Les corrélations les plus remarquables se situent entre la reconnaissance des chiffres et la dénomination des chiffres ($r=.72$, $p < .01$), entre la reconnaissance des chiffres et le subitizing ($r=.66$, $p < .01$) ou encore entre la reconnaissance des chiffres et les relations chiffres/quantités ($r=.75$, $p < .01$). De même, la connaissance du nom des chiffres est fortement corrélée avec la récitation de la chaîne numérique verbale ($r=.68$, $p < .01$). Enfin, le subitizing est aussi fortement corrélé avec les relations chiffres/quantités ($r=.71$, $p < .01$).

Tableau 11.

Matrice de corrélation entre les différentes tâches en numératie émergente (Thomas et al., soumis b)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	1								
2	0.72	1							
3	0.58	0.68	1						
4	0.59	0.47	0.50	1					
5	0.56	0.43	0.37	0.48	1				
6	0.41	0.43	0.39	0.40	0.44	1			
7	0.66	0.60	0.58	0.46	0.46	0.56	1		
8	0.75	0.64	0.57	0.55	0.47	0.54	0.71	1	
9	0.33	0.43	0.46	0.25	0.27	0.39	0.49	0.36	1

NB. N = 167, toutes les corrélations sont significatives à .01. Identification des chiffres ; 2. Dénomination des chiffres ; 3. Récitation de la chaîne numérique verbal ; 4. Dénombrement ; 5. Cardinalité ; 6. Comparaison d'ensembles ; 7. Subitizing ; 8. Correspondances chiffres/quantités ; 9. Problèmes à histoire.

5.3.3. Les liens synchroniques entre les compétences en littératie émergente et en numératie émergente à l'école maternelle

Dans cette partie, nous allons aborder les liens synchroniques entre littératie et numératie émergentes durant l'école maternelle et plus précisément en moyenne et en grande section de maternelle. De nombreuses études se sont intéressées aux liens entre littératie et numératie émergentes de manière générale. Les corrélations entre les scores de littératie et de numératie émergente peuvent être importantes et dépasser les .70 à l'école maternelle (Welsh et al., 2010) et atteindre .60 à l'école élémentaire (Hecht et al., 2001). Betts et al. (2009) ont observé une corrélation de .88 entre les deux facteurs de littératie et de numératie émergente. La littératie émergente se divise en plusieurs composantes qui sont corrélées différemment aux compétences en numératie émergente (Purpura et al., 2011). La connaissance de l'écrit, la conscience phonologique et le langage oral influencent spécifiquement le développement des compétences en numératie (Hecht et al., 2001; Krajewski & Schneider, 2009b; Praet et al., 2013; Purpura et al., 2011; Purpura & Napoli, 2015). De fortes corrélations ont alors été observées entre les compétences en littératie émergente et le développement mathématique de l'enfant (Lopez et

al., 2007; Purpura et al., 2011; Rabiner et al., 2016). Plusieurs auteurs ont montré que les compétences en littératie sont directement corrélées aux compétences en numératie émergente (Krajewski & Schneider, 2009b; LeFevre, Fast, et al., 2010). Des déficits précoces en littératie pourraient induire un développement plus lent de la numératie (e.g. Durand et al., 2005). De même, des difficultés dans l'acquisition des compétences en littératie émergente pourraient aussi induire un ralentissement du développement de la numératie émergente (Jordan et al., 2009). Aragón et al. (2016) ont observé que la littératie émergente entretenait des liens forts avec la numératie émergente, ce qui suggère qu'une forte relation existerait entre les précurseurs langagiers et les mathématiques (Cirino, 2011).

Plusieurs études ont montré que la conscience phonologique était la compétence en littératie émergente la plus corrélée aux compétences en numératie émergente (Hecht et al., 2001; Krajewski & Schneider, 2009a). Plusieurs études explorent la relation directe ou indirecte entre conscience phonologique et compétences mathématiques (Krajewski, 2008b; Simmons & Singleton, 2008). Simmons et Singleton (2008) postulent que ces liens seraient dus à de faibles représentations phonologiques qui engendreraient des difficultés dans la manipulation des mots de nombre. Tandis que l'hypothèse Krajewski (2008) indique que la relation entre la lecture et les mathématiques pourrait s'expliquer par l'influence de la conscience phonologique sur l'apprentissage des mots de nombres et de la chaîne numérique verbale. La conscience phonologique reflète la capacité de différencier les segments de la langue et à les manipuler et permettrait alors aux enfants de différencier et de manipuler les mots individuels dans la séquence des nombres. Plusieurs études ont ainsi montré des corrélations modérées à fortes (entre .23 et .58) entre la conscience phonologique et les compétences de comptage (Koponen et al., 2007; Krajewski & Schneider, 2009a; Zhang et al., 2014). Koponen et al. (2007) ont aussi montré que la conscience phonologique était corrélée avec le concept de nombre et la connaissance des lettres. Les compétences de conscience phonologique apparaissent donc comme étant importantes pour le développement des compétences en numératie émergente. Certaines tâches en numératie émergente (comme le dénombrement ou la récitation de la chaîne numérique verbale) utilisent le code verbal commun aux compétences de conscience phonologique (Dehaene et al., 2003; Simmons & Singleton, 2008).

La connaissance des lettres et la connaissance des chiffres sont très liées à l'école maternelle (Piasta et al., 2010). Les lettres et les chiffres ont de nombreuses similitudes telles que leurs propriétés perceptives ou encore leurs caractéristiques géométriques. Les deux sont

représentés par des symboles arbitraires qui doivent être perçus visuellement et être distingués. Cette distinction pose des problèmes aux enfants de 4 à 6 ans qui ne distinguent pas un symbole de son image en miroir (*e.g.* Fischer & Tazouti, 2012 ; Fischer & Luxembourger, 2020) par suite du processus neurologique de généralisation ou symétrisation en mémoire (Dehaene, 2007). Ces symboles visuels sont ensuite associés à leur forme sonore. Neumann et al. (2013) ont déterminé qu'il existait une corrélation entre ces deux compétences. De plus, la connaissance de lettres serait aussi fortement corrélée aux compétences de comptage et de concept de nombre (Koponen et al., 2007). Matthews et al. (2009) ont observé une corrélation de .61 entre la dénomination de lettres et les problèmes verbaux (calculs) chez des enfants de grande section de maternelle. La compréhension des fonctions de l'écrit et de ses symboles peut être liée aux compétences en numératie émergente, car de nombreux aspects des mathématiques informelles et formelles reposent sur des nombres ou des symboles écrits (Purpura et al., 2011). Purpura et al. (2011) ont observé que les connaissances liées à l'écrit étaient particulièrement prédictives des performances en numératie émergente en fin de maternelle lorsqu'on prend en compte les performances initiales en matière de numératie émergente et de la capacité cognitive non verbale de l'enfant.

Les compétences langagières seraient elles-aussi directement liées aux performances précoces en mathématiques. Ainsi, les compétences langagières seraient nécessaires à la construction d'une terminologie mathématique précoce (Hooper et al., 2010; LeFevre, Fast, et al., 2010). Le développement langagier du jeune enfant apparaît donc comme étant capital dans l'acquisition des compétences en numératie émergente. Les liens entre littératie et numératie émergentes peuvent s'expliquer par la part importante du langage dans les compétences en numératie émergente (LeFevre, Fast, et al., 2010; Purpura & Ganley, 2014). Les compétences langagières du jeune enfant apparaissent de surcroît comme étant un facteur fortement corrélé aux compétences mathématiques (Praet et al., 2013; Purpura et al., 2011). Elles permettraient à l'enfant de mieux comprendre et de mieux se représenter les quantités exactes. Le langage mathématique est fortement prédictif du développement des compétences mathématiques de l'enfant (Purpura & Logan, 2015; Toll & Van Luit, 2014). En outre, les compétences verbales du jeune enfant seraient un prérequis nécessaire au développement du langage mathématique (Kleemans et al., 2011). Cependant, une autre étude a montré qu'une part assez faible de la variance des compétences de comptage verbal s'expliquait par les compétences linguistiques et le raisonnement non verbal à l'âge de 5 ans (Koponen et al., 2018).

Purpura et Logan (2015) ont observé que le langage mathématique prédisait mieux l'évolution des compétences mathématiques durant la période préscolaire que les compétences initiales en numératie émergente. L'étude d'Hornburg et al. (2018) a montré des corrélations entre le langage mathématique et toutes les compétences en numératie émergente (connaissance des chiffres, dénombrement, cardinalité, correspondances nombres/quantités, comparaison de quantités, problèmes à histoire et subitizing). Cependant, le langage mathématique prédirait plus spécifiquement les compétences plus complexes en numératie émergente comme la cardinalité, les relations nombres/quantités, la comparaison de quantité et de nombres et les problèmes à histoire. Ces résultats confirmeraient donc que les compétences en numératie émergentes seraient fortement basées sur le langage oral (LeFevre, Fast, et al., 2010; Purpura & Ganley, 2014). De plus, des corrélations modérées ont été observées entre le vocabulaire et le langage mathématique durant la moyenne et la grande section de maternelle (Schmitt et al., 2019). Purpura et al. (2017) ont aussi confirmé le rôle important du langage mathématique comme un médiateur entre les compétences en numératie émergente et les compétences en littératie émergente (conscience de l'écrit, conscience phonologique et vocabulaire) cinq mois plus tard.

Les compétences de vocabulaire expressif chez l'enfant d'âge préscolaire sont corrélées modérément avec toutes les compétences en numératie émergente (Hornburg et al., 2018). De plus, Purpura et al. (2011) ont montré que le vocabulaire de l'enfant prédisait les performances en numératie émergente en fin de maternelle lorsqu'on prenait en compte les performances initiales en matière en numératie émergente et la capacité cognitive non verbale de l'enfant. Purpura et Ganley (2014) ont aussi constaté que le vocabulaire était un prédicteur important de nombreuses compétences en numératie émergente, notamment la comparaison des nombres, la connaissance des chiffres et les problèmes à histoire. L'étude de Harvey et Miller (2017) a montré que le vocabulaire réceptif expliquait une part de variance importante des compétences en numératie émergente comme le dénombrement ou les calculs simples. Negen et Sarnecka (2012) ont observé de fortes corrélations entre la connaissance des mots de nombres et le vocabulaire expressif et réceptif chez des enfants de 30 à 60 mois. Deux études ont examiné plus spécifiquement les relations entre vocabulaire, vocabulaire mathématique et performance en numératie émergente (Purpura & Reid, 2016; Toll & Van Luit, 2014). Le vocabulaire spécifique aux mathématiques serait donc un meilleur prédicteur des performances en mathématiques que le vocabulaire général. La plupart des connaissances mathématiques, que ce soient les compétences de base en calcul ou en comparaison, dépendent de la compréhension

du langage par les enfants. Certains concepts et mots mathématiques doivent être compris et utilisés par l'enfant (« plus », « moins », « autant que »). Ainsi, Koponen et al. (2007) ont observé que la compréhension orale était corrélée avec les compétences de comptage, le concept de nombre, la connaissance des lettres et la conscience phonologique chez des enfants d'âge préscolaire.

Les problèmes arithmétiques évalués en grande section de maternelle sont fortement corrélés aux compétences de connaissance des lettres et de leurs sons ainsi qu'à la lecture de mots communs (Chu et al., 2016). Enfin, de fortes corrélations ont également été observées entre la récitation de la chaîne numérique et la conscience phonologique en grande section de maternelle (Zhang et al., 2020). De plus, cette même étude rapporte aussi de faibles corrélations entre la récitation de la chaîne numérique, la connaissance des lettres et le vocabulaire en réception.

5.3.4. Les liens diachroniques entre les compétences en littératie émergente et en numératie émergente et les compétences ultérieures

Nous allons désormais nous intéresser aux liens diachroniques entre la littératie émergente et les compétences mathématiques ultérieures et entre la numératie émergente et les compétences de lecture et d'écriture ultérieures. Trois modèles différents peuvent être utilisés pour observer et expliquer ces liens. Le modèle le plus courant consiste à observer l'influence des compétences en littératie émergente sur les compétences en numératie émergente. Un second modèle peu employé, vise à tester l'influence des compétences en numératie émergentes sur les compétences en littératie émergente. Enfin, un dernier modèle postule pour une interaction bidirectionnelle entre les compétences en littératie et en numératie émergentes. Plusieurs études ont indiqué que les compétences en numératie émergente seraient un meilleur indicateur des compétences ultérieures de littératie que le sont les compétences en littératie émergente elles-mêmes (Duncan et al., 2007; Hooper et al., 2010; Pagani et al., 2010). Les compétences en numératie émergente prédiraient statistiquement les compétences en littératie et ce bien au-delà de la période préscolaire (Claessens et al., 2009; Claessens & Engel, 2013; Duncan et al., 2007; Hecht et al., 2001).

La connaissance des lettres est fortement corrélée avec la fluence de calcul et le calcul procédural au CM1 (*grade 4*) (Koponen et al., 2007). De même, Rabiner et al. (2016) ont montré

que la connaissance des lettres en grande section de maternelle prédisait les scores en calcul au CM2 (*grade 5*). Enfin, des corrélations moyennes ont également été observées entre la connaissance des lettres en grande section de maternelle et les compétences mathématiques du CP (*grade 1*) au CM1 (*grade 4*) (Zhang et al., 2020). Plus globalement, l'identification de lettres isolées est prédictive de la réussite mathématique ultérieure (Duncan et al., 2007; Watts et al., 2014) et prédictive des compétences mathématiques au CM1 (*grade 4*) (Fyfe et al., 2019). Korpipää et al. (2017) ont aussi observé des corrélations d'intensité modérée entre la connaissance des lettres et les compétences arithmétiques au CP (*grade 1*) et en cinquième (*grade 7*).

La conscience phonologique est aussi fortement corrélées avec la fluence de calcul et le calcul procédural au CM1 (*grade 4*) (Koponen et al., 2007). Enfin, de faibles corrélations ont également été observées entre la conscience phonologique en grande section de maternelle et les compétences mathématiques du CP (*grade 1*) au CM1 (*grade 4*) (Zhang et al., 2020). Korpipää et al. (2017) ont eux-aussi observé de faibles corrélations entre la conscience phonologique et les compétences arithmétiques au CP (*grade 1*) et en cinquième (*grade 7*). Enfin, ten Braak et al. (2018) ont montré des corrélations modérées entre les compétences de conscience phonologique en grande section de maternelle et les compétences mathématiques au CP.

Zhang et al. (2020) ont observé de faibles corrélations entre le vocabulaire en réception en grande section de maternelle et les compétences mathématiques du CP (*grade 1*) au CM1 (*grade 4*). L'étude de Manfra et al. (2017) a aussi montré de faibles corrélations entre le vocabulaire expressif à l'école maternelle et les compétences en mathématiques au CE2 (*grade 3*). La compréhension orale est elle-aussi corrélée avec les compétences futures de calcul procédural (Koponen et al., 2007). L'étude de Manfra et al. (2017) a également montré de faibles corrélations entre la compréhension à l'école maternelle et les compétences en mathématiques au CE2 (*grade 3*).

La connaissance des chiffres chez des enfants de deux à quatre ans est fortement corrélée avec leur vocabulaire expressif et réceptif (Negen & Sarnecka, 2012).

Dans leur étude, Korpipää et al. (2017) ont observé une corrélation modérée entre la récitation de la chaîne numérique et les compétences en lecture au CP (*grade 1*). Cette corrélation diminue avec le temps : en cinquième (*grade 7*), la corrélation entre la chaîne numérique verbale et les compétences en lecture est plus faible (.27). Le comptage est une

compétence fortement corrélée à la fluence de calcul ultérieure (Koponen et al., 2016; Zhang et al., 2014). Il prédit aussi fortement la fluence de lecture ultérieure (Durand et al., 2005; Koponen et al., 2016), même en prenant en compte les prédicteurs classiques que sont la conscience phonologique, la dénomination rapide, la mémoire à court-terme verbale et la mémoire de travail (Koponen et al., 2016). Manfra et al. (2017) ont également observé de faibles corrélations entre les compétences de comptage à l'école maternelle et les compétences en lecture au CE2 (*grade 3*).

5.4. Les facteurs explicatifs des liens entre compétences en littératie et en numératie émergentes

5.4.1. Le vocabulaire

Comme nous l'avons vu précédemment, le vocabulaire est une compétence corrélée avec toutes les autres compétences en littératie émergente (Dickinson et al., 2003) ainsi qu'avec les compétences en numératie émergente (Purpura et al., 2011). De nombreuses compétences en littératie et en numératie émergentes font appel au vocabulaire de l'enfant. Par exemple, le comptage verbal ou le dénombrement font tous deux appel à l'utilisation verbale de mots de nombres, et donc au vocabulaire. Pour extraire les informations pertinentes d'un texte, d'une consigne ou encore des problèmes à histoire, l'enfant doit utiliser ses compétences de vocabulaire et plus largement ses compétences langagières. La manipulation des codes verbaux apparaît ainsi être nécessaire aux compétences en littératie et en numératie émergentes et renvoie à une activité cérébrale dans les mêmes régions corticales (Dehaene et al., 2003).

5.4.2. Les compétences de traitement visuel

Plusieurs compétences cognitives générales peuvent expliquer la covariance entre les compétences en littératie et en numératie émergentes. Les compétences de traitement visuel sont fortement liées à la littératie (e.g. Davidse et al., 2011) et à la numératie émergentes (e.g. Krajewski & Schneider, 2009a). Dès le début du développement de la reconnaissance des lettres, l'enfant utilise la forme visuelle de celles-ci pour les distinguer. Il en est de même pour le développement de la lecture, les mots sont d'abord reconnus grâce à leur forme visuelle (Levy et al., 2006). Les symboles numériques se distinguent eux-aussi par leur forme visuelle

(Dehaene, 2011). Deux régions fonctionnelles spécifiques, se trouvant au fond du cortex occipito temporal, jouent une fonction particulière dans la reconnaissance des lettres et des nombres (Hannagan et al., 2015). Ainsi, l'aire de forme visuelle des mots (VWFA) s'active dès lors qu'un mot ou une lettre est présentée de manière visuelle. De même, l'aire de forme des nombres (NFA) est activée dès qu'un chiffre est présenté visuellement. Des déficits au niveau de ces aires peuvent entraîner des difficultés de reconnaissance des lettres et des chiffres.

5.4.3. L'intelligence générale non-verbale

Plusieurs études ont montré l'impact de l'intelligence générale non-verbale sur les compétences en numératie émergente. L'intelligence générale non verbale pourrait alors aider les enfants à comprendre les relations entre les nombres et leurs symboles (Wong et al., 2016). Dans leur étude, l'intelligence générale non verbale, mesurée avec les matrices de Raven, est corrélée significativement avec les comparaisons non symboliques (*e.g.* montrer quel ensemble de points contient le plus de points), les opérations arithmétiques non symboliques (*e.g.* après avoir effectué des manipulations, comme l'addition, la soustraction ou la multiplication, sur une quantité initiale de points, l'enfant comparer celle-ci à une seconde quantité) et les correspondances nombre-numérosité (*e.g.* estimation chiffrée de quantité, ligne numérique). L'étude d'Ecalte et al. (2008) a également montré que l'intelligence non verbale, mesurée par l'intermédiaire des cubes de Kohs, était corrélée avec la connaissance des lettres et la conscience phonologique. De même, l'intelligence générale non verbale de l'enfant serait corrélée avec ses compétences ultérieures en lecture.

5.4.4. La vitesse de traitement de l'information

La vitesse de traitement de l'information par les enfants peut aussi être une variable explicatrice des liens entre littératie et numératie émergentes. Certaines études ont montré que la vitesse de traitement de l'information est corrélée aux compétences en littératie émergente (Furnes & Samuelsson, 2011) et aux compétences en numératie émergentes (Cirino, 2011). Tandis que l'étude de Davidse et al. (2014) n'a montré que de faibles corrélations entre la vitesse de traitement et les compétences en littératie et en numératie émergentes. Ces auteurs émettent alors l'hypothèse que la vitesse de traitement devient une source de co-variation entre

les compétences en littératie et en numératie émergente lorsque les compétences s'automatisent (Geary, 2011).

5.4.5. Les fonctions exécutives

Une autre hypothèse à explorer serait l'influence des fonctions exécutives sur les compétences en littératie et en numératie émergentes. Les fonctions exécutives sont généralement représentées par trois fonctions principales : l'inhibition, la mise à jour en mémoire de travail et la flexibilité cognitive (Miyake et al., 2000). L'inhibition correspond à la capacité de traiter les informations en supprimant celles qui ne sont pas pertinentes vis-à-vis de l'objectif à atteindre. La mise à jour en mémoire de travail fait référence à la capacité de l'enfant à retenir et à réviser les informations en mémoire, ce qui permet de remplacer les informations les plus anciennes par des informations actualisées. La flexibilité cognitive renvoie à la capacité de l'enfant à alterner mentalement entre deux opérations cognitives (Chevalier, 2010). Ainsi, les fonctions exécutives pourraient expliquer une part de covariance entre la littératie et la numératie émergentes. Plus précisément, les fonctions exécutives affectent les compétences en numératie émergente (*e.g.* Kroesbergen et al., 2009) et les compétences en littératie émergente. L'étude de Purpura, Schmitt, et al. (2017) a observé l'influence des fonctions exécutives sur les différentes compétences en littératie et en numératie émergentes. Ainsi, l'inhibition apparaît comme étant la plus corrélée avec les compétences en numératie émergente. La mémoire de travail est liée aux compétences mathématiques plus avancées comme la comparaison de chiffres ou les problèmes à histoire. Enfin, la flexibilité cognitive est liée à des compétences mathématiques plus conceptuelles comme le principe cardinal ou l'ordonnement de chiffres. Pour les compétences en littératie émergente, Purpura, Schmitt, et al. (2017) ont montré que l'inhibition et la flexibilité cognitive sont liées à la connaissance de l'écrit (*print knowledge*). Tandis que la mémoire de travail est corrélée uniquement aux compétences de conscience phonologique. Ce résultat peut probablement s'expliquer par le fait que dans les épreuves de conscience phonologique, les enfants doivent retenir plusieurs sons ou mots en mémoire, les combiner ou les séparer, puis produire un nouveau mot. Dans d'autres études, la mémoire de travail apparaît comme étant corrélée avec le vocabulaire (McClelland et al., 2014). De plus, Purpura, Schmitt, et al. (2017) ont également observé qu'aucune des fonctions exécutives n'était liée au vocabulaire : ces résultats sont similaires à ceux observés dans l'étude de (McClelland et al., 2014). Wolf et McCoy (2019) ont également montré que les fonctions

exécutives chez des enfants de cinq ans prédisaient les compétences en littératie et en numératie émergentes une année plus tard. De même, les compétences en littératie et en numératie émergentes prédisaient les compétences de fonctions exécutives une année plus tard. Les fonctions exécutives permettent à l'enfant de garder des informations en mémoire, de réprimer de fausses réponses ou de fausses perceptions et de changer rapidement de tâche : ces compétences sont alors nécessaires pour le développement des compétences en littératie et en numératie émergentes et pourraient expliquer une part de covariance entre celles-ci. Enfin, Mulder et al. (2017) ont également montré que, même en contrôlant des variables telles que le vocabulaire, le niveau d'éducation parental ou encore la langue parlée à la maison, les fonctions exécutives à l'âge de deux ans sont un prédicteur significatif des compétences en littératie et en numératie émergentes à l'âge de cinq ans.

5.4.6. Les facteurs génétiques et environnementaux

Des facteurs génétiques et environnementaux pourraient aussi expliquer les liens entre les compétences en littératie et en numératie émergentes. Par exemple, Hart et al. (2009) ont montré l'influence des facteurs génétiques et environnementaux sur les compétences en numératie et en littératie émergentes. Dans leur étude, ils ont suivi 314 paires de jumeaux de l'âge de six ans jusqu'à l'âge de dix ans. L'influence de la génétique est statistiquement significative pour la fluence de calcul quel que soit l'âge de l'enfant. Les influences environnementales ont été observées pour le calcul, la résolution de problème ou encore pour les concepts quantitatifs, mais seulement chez des enfants plus âgés (huit et dix ans).

L'un des principaux facteurs environnementaux influençant le développement des compétences en littératie et en numératie émergentes correspond au statut socio-économique de la famille. La relation entre statut socio-économique de la famille et compétences en littératie et en numératie émergentes est forte. Ainsi, les enfants des familles ayant un statut socio-économique plus élevé montrent de meilleures performances en littératie et en numératie émergentes (DeFlorio & Beliakoff, 2015; Fischer & Thierry, 2020; Hornburg et al., 2018; Mendive et al., 2020; Starkey et al., 2004). Ces liens pourraient s'expliquer par le fait que les parents ayant un niveau socio-économique plus élevé engagent plus souvent leurs enfants dans des activités langagière ou mathématiques (*e.g.* Elliott & Bachman, 2018). Certaines pratiques familiales encouragent le développement des compétences en littératie et en numératie

émergentes. Par exemple, la lecture partagée de livres pour enfants favorise le développement de la littératie émergente (Davidse et al., 2011; Mol & Bus, 2011) et de la numératie émergente (e.g. LeFevre et al., 2009). Des comparaisons interculturelles ont également montré que la langue ainsi que la culture de l'enfant jouaient un rôle dans l'acquisition des compétences des littératie et en numératie émergentes. Dans de nombreuses études, les enfants chinois ont de meilleures compétences en numératie émergente que les enfants parlant anglais (LeFevre et al., 2018; Miller et al., 1995). Même si la langue chinoise propose des mots de nombres plus courts et une structure de mots de nombres plus simple (Chan, 2014) que la langue anglaise, les enfants chinois évoluent dans le cadre d'une culture qui valorise plus les mathématiques que d'autres cultures.

5.5.Résultats

5.5.1. Les liens synchroniques entre les compétences en littératie et en numératie émergentes

Afin d'observer les liens entre les différentes compétences en littératie et en numératie émergentes, différents modèles en piste ont été testés. Dans un premier temps, nous avons testé l'influence des compétences en littératie émergente sur les compétences en numératie émergente en début d'année de moyenne section. Pour cela, les différentes compétences en littératie émergente ont été regroupées en trois facteurs (connaissance des lettres, conscience phonologique et langage oral) comme observé dans l'analyse factorielle précédemment réalisée. Les compétences en numératie émergente, quant à elles, se structurent en un unique facteur. Cependant, afin d'étudier plus finement les liens entretenus entre les compétences en littératie et en numératie émergentes, nous avons fait le choix d'organiser les différentes compétences en numératie émergente en trois domaines comme présenté dans l'étude de Purpura et Lonigan (2013). Ainsi, le domaine « nombres » comprend les épreuves de récitation de la chaîne numérique verbale, de dénombrement, de cardinalité, d'estimation et de subitizing. Ces épreuves font toutes références à l'utilisation verbale des nombres. Le domaine « relations » fait référence aux épreuves de reconnaissance des chiffres, de dénomination des chiffres, de correspondances quantités/nombres et nombres/quantités et de sériation des nombres écrits. Toutes ces épreuves nécessitent l'utilisation du nombre écrit. Enfin, le domaine « opérations » comprend uniquement l'épreuve de problèmes à histoire.

Comme mentionné précédemment, peu d'études ont examiné les liens entre les dimensions de la littératie émergente et celles de numératie émergente tout en prenant en compte les caractéristiques de l'enfant (sexe, âge, SSE). Pour les différents modèles en pistes présentés ci-dessous, le logiciel LISREL 9.3 a été utilisé pour estimer les paramètres et les indices d'adéquations des modèles. De même, dans tous les modèles présentés, seuls les pistes significatives à .01 sont en lignes continues. Les pistes non significatives sont présentées sous la forme de lignes en pointillés.

Dans un premier temps, l'influence des compétences en littératie émergente sur les compétences en numératie émergente en début d'année de moyenne section a été testé (voir Figure 18). La concordance entre les données et le modèle était satisfaisante ($\chi^2 = 44,63$ pour 9 degrés de liberté ; $p = 0.01$; SRMR (résidus) = 0.028 ; NNFI = 0.95 ; CFI = 0.99).

Tout d'abord, concernant l'influence des caractéristiques de l'enfant sur les compétences en littératie émergente :

(1) Le sexe de l'enfant n'a aucun effet sur les différents domaines de littératie émergente.

(2) L'âge de l'enfant influence positivement et significativement la connaissance des lettres ($\beta = .16, p < .01$), la conscience phonologique ($\beta = .17, p < .01$) et le langage oral ($\beta = .25, p < .01$). Ainsi, plus l'enfant est âgé, meilleures sont ses compétences en littératie émergente.

(3) Enfin, le SSE de l'enfant est la variable influençant le plus les compétences en littératie émergente de l'enfant. Le SSE influence positivement et significativement la connaissance des lettres ($\beta = .28, p < .01$), la conscience phonologique ($\beta = .37, p < .01$) et le langage oral ($\beta = .52, p < .01$). Plus précisément, nous pouvons noter que le SSE a une influence plus importante sur les compétences de langage oral et de conscience phonologique. Ainsi, plus le statut socio-économique de l'enfant est élevé et meilleures sont ses compétences en littératie émergente.

Nous pouvons également remarquer que les trois différents domaines de la littératie émergente exercent une influence sur l'ensemble des domaines de la numératie émergente.

(1) La connaissance des lettres en début de moyenne section de maternelle influence positivement et significativement les domaines nombres ($\beta = .32, p < .01$), relations ($\beta = .53, p < .01$) et opérations ($\beta = .16, p < .01$). Nous pouvons observer que la connaissance des lettres

influence plus fortement le domaine relation qui englobe toutes les épreuves associant des quantités à des nombres écrits. En outre, meilleures sont les compétences de l'enfant en connaissance des lettres et meilleures sont ses compétences en numératie émergente.

(2) Les compétences de conscience phonologique en début de moyenne section de maternelle influencent positivement et significativement les domaines nombres ($\beta = .14, p < .01$), relations ($\beta = .11, p < .01$) et opérations ($\beta = .23, p < .01$). Nous pouvons observer que les compétences de conscience phonologique influencent plus fortement le domaine opérations qui concerne les problèmes à histoire. Ainsi, plus les compétences de conscience phonologique de l'enfant sont développées, meilleures sont ses compétences en numératie émergente.

(3) Le langage oral en début de moyenne section de maternelle influence également positivement et significativement les domaines nombres ($\beta = .42, p < .01$), relations ($\beta = .24, p < .01$) et opérations ($\beta = .27, p < .01$). Nous pouvons noter que le langage oral influence plus les compétences liées au nombre, qui font usage de la dimension verbale de mots de nombres. Plus le langage oral de l'enfant est développé, meilleures sont ses compétences en numératie émergente.

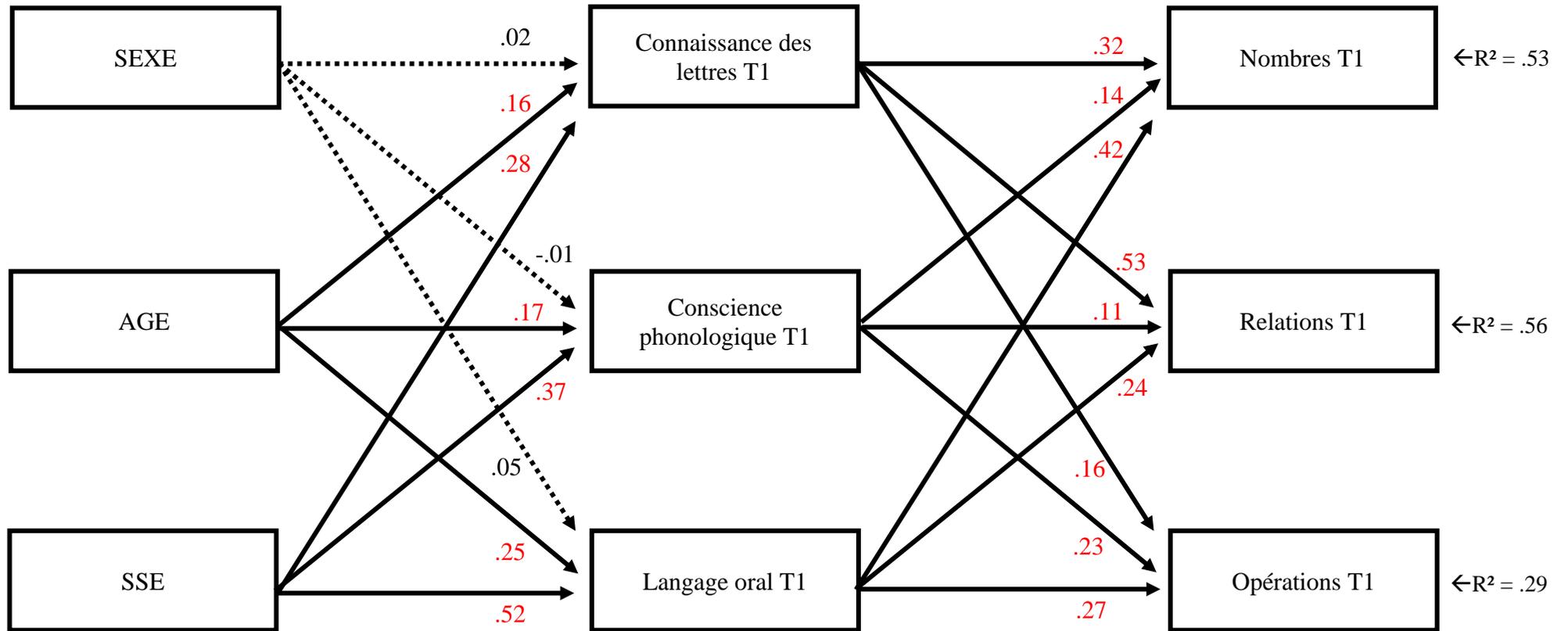


Figure 18. Modèle S1 montrant l'influence des compétences en littératie émergente sur les compétences en numératie émergente en début d'année de moyenne section

Note. $\chi^2 = 44,63$ pour 9 degrés de liberté ; $p < 0.01$; SRMR (résidus) = 0.028 ; NNFI = 0.95 ; CFI = 0.99

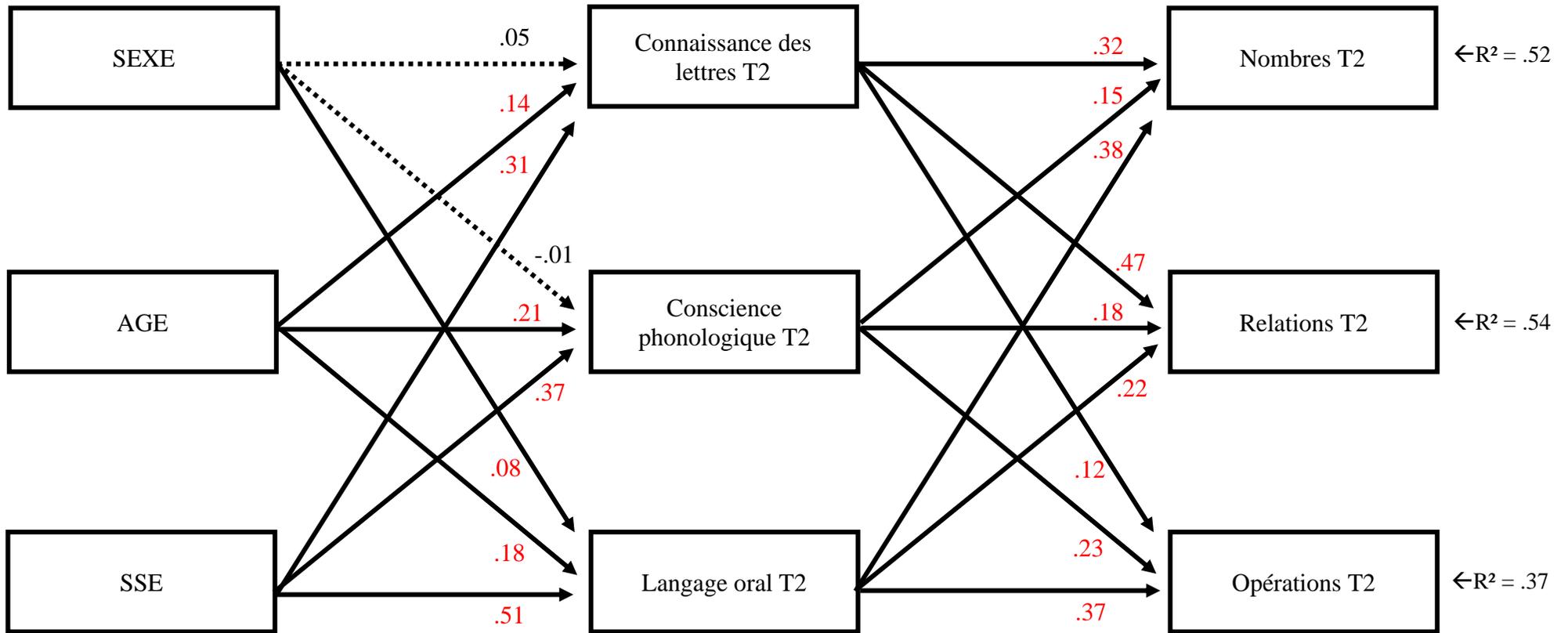


Figure 19. Modèle S2 montrant l'influence des compétences en littératie émergente sur les compétences en numératie émergente en fin d'année de moyenne section

$\chi^2 = 80,50$ pour 9 degrés de liberté ; $p < 0.01$; SRMR (résidus) = 0.038 ; NNFI = 0.90 ; CFI = 0.95

Dans un second temps, l'influence des compétences en littératie émergente sur les compétences en numératie émergente en fin d'année de moyenne section a été testé (voir Figure 19). La concordance entre les données et le modèle était satisfaisante ($\chi^2 = 80,50$ pour 9 degrés de liberté ; $p < 0.01$; SRMR (résidus) = 0.038 ; NNFI = 0.90 ; CFI = 0.95). Des influences semblables à celle présentées dans le modèle S1 (voir Figure 18) ont été observées. Cependant, contrairement au modèle précédent, le sexe de l'enfant impacte désormais faiblement les compétences de langage oral ($\beta = .08, p < .01$). Les filles obtiendraient alors de meilleurs scores dans cette dimension que les garçons.

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés aux liens existants entre les compétences en numératie émergente et les compétences en littératie émergente en début et en fin d'année. Les deux modèles présentés montrent une influence de la littératie sur la numératie. Cependant, deux modèles alternatifs ont été testés, montrant l'influence des compétences en numératie émergente sur les compétences en littératie émergente, soit en début, soit à la fin de la moyenne section (voir Tableau 12 pour la comparaison des différents modèles). Cependant, ces modèles montrent des indicateurs statistiques moins satisfaisants : pour le modèle S3 (influence de la numératie sur la littératie en début d'année), $\chi^2 = 145,25$ pour 9 degrés de liberté ; $p < 0.01$; SRMR (résidus) = 0.045 ; NNFI = 0.79 ; CFI = 0.95 et pour le modèle S4 (influence de la numératie sur la littératie en fin d'année), $\chi^2 = 114,80$ pour 9 degrés de liberté ; $p < 0.01$; SRMR (résidus) = 0.043 ; NNFI = 0.85 ; CFI = 0.96.

Tableau 12. *Comparaison des différents modèles présentés*

Modèles		χ^2	df	CFI	NNFI	SRMR
S1	Littératie T1 → Numératie T1	44.63	9	.986	.945	.028
S2	Littératie T2 → Numératie T2	80.50	9	.950	.900	.038
S3	Numératie T1 → Littératie T1	145.25**	9	.947	.789	.045
S4	Numératie T2 → Littératie T2	114.80**	9	.963	.853	.043

Note. N = 725. CFI = Comparative Fit Index; NNFI = Non-Normed Fit Index; SRMR = Standardized Root Mean Square Residual.

Pour résumé, ces différents modèles nous permettent de montrer que l'âge et le statut socio-économique de l'enfant influencent le développement des compétences en littératie émergente chez l'enfant de moyenne section. Le statut socio-économique reste néanmoins le facteur ayant la plus grande influence sur les compétences initiales de l'enfant en littératie émergente. De plus, nous n'observons qu'un seul effet du sexe sur les compétences de langage oral de l'enfant, seulement en fin de moyenne section. Ainsi, les filles auraient de meilleures compétences langagières que les garçons en fin de moyenne section. Ce résultat est consistant avec notre étude préalable (voir Article 1).

Ces modèles nous montrent également que les compétences en littératie et en numératie émergentes sont liées chez les élèves de moyenne section de maternelle que ce soit au début ou à la fin de l'année scolaire. La conscience phonologique est le facteur ayant le moins d'influence sur les compétences en numératie émergente. Il s'agit d'une compétence développée plus tardivement que les autres et nécessitant de nombreuses ressources cognitives (*e.g.* mémoire, attention). Le langage oral influence plus particulièrement les compétences en numératie émergente nécessitant l'utilisation de la représentation verbale des mots de nombres, tandis que la connaissance des lettres influence le domaine des relations.

5.5.2. Les liens diachroniques entre les compétences en littératie et en numératie émergentes

Après nous être intéressés aux liens synchroniques entre les compétences en littératie et en numératie émergentes en début et en fin d'année, nous allons désormais nous intéresser aux liens diachroniques entre celles-ci. Ainsi, dans un premier temps, nous observerons l'effet des compétences initiales dans un domaine sur les compétences ultérieures dans ce même domaine. Puis, nous nous intéresserons à l'aspect prédictif des compétences en littératie émergente sur les compétences ultérieures en numératie émergente. Et réciproquement, nous observerons l'influence des compétences en numératie émergente sur les compétences ultérieures en littératie émergente.

L'influence des compétences en littératie émergente en début d'année sur les compétences en littératie émergente en fin d'année de moyenne section a été testé (voir Figure 20). La concordance entre les données et le modèle était satisfaisante ($\chi^2 = 34,13$ pour 9 degrés de liberté ; $p < 0.001$; RMSEA (résidus) = 0.062 ; NNFI = 0.96 ; CFI = 0.99 ; AGFI = 0.95).

Tout d'abord, concernant l'influence des caractéristiques de l'enfant sur les compétences en littératie émergente :

(1) Le sexe de l'enfant n'a aucun impact sur les différents domaines de la littératie émergente en début d'année de moyenne section.

(2) L'âge de l'enfant influence toujours positivement et significativement la connaissance des lettres ($\beta = .16, p < .01$), la conscience phonologique ($\beta = .17, p < .01$) et le langage oral ($\beta = .25, p < .01$). Ainsi, plus l'enfant est âgé et meilleures sont ses compétences en littératie émergente.

(3) Enfin, le SSE de l'enfant est toujours la variable influençant le plus les compétences en littératie émergente de l'enfant. Le SSE influence positivement et significativement la connaissance des lettres ($\beta = .28, p < .01$), la conscience phonologique ($\beta = .37, p < .01$) et le langage oral ($\beta = .52, p < .01$). Le SSE a un effet plus important sur les compétences de langage oral et de conscience phonologique. Ainsi, plus le statut socio-économique de l'enfant est élevé et meilleures sont ses compétences en littératie émergente.

Nous pouvons également remarquer que les compétences en début d'année en littératie émergente influencent ces mêmes compétences en fin d'année. Plus particulièrement, les effets

les plus remarquables sont constatés entre les compétences initiales dans un domaine et les compétences ultérieures dans ce même domaine.

(1) La connaissance des lettres en début de moyenne section de maternelle influence positivement et significativement la connaissance des lettres ($\beta = .67, p < .01$), la conscience phonologique ($\beta = .17, p < .01$) et le langage oral en fin d'année ($\beta = .06, p < .01$). La connaissance des lettres influence principalement les compétences de connaissance des lettres de l'enfant quelques mois plus tard. En outre, meilleures sont les compétences de l'enfant en connaissance des lettres et meilleures seront ses compétences ultérieures en littératie émergente.

(2) Les compétences de conscience phonologique en début de moyenne section de maternelle influencent uniquement la conscience phonologique en fin d'année ($\beta = .41, p < .01$). Plus les compétences de conscience phonologique de l'enfant sont développées au début de l'année et meilleures seront ses compétences ultérieures de conscience phonologique.

(3) Le langage oral en début de moyenne section de maternelle influence également positivement et significativement, en fin d'année, la connaissance des lettres ($\beta = .13, p < .01$), la conscience phonologique ($\beta = .25, p < .01$) et le langage oral ($\beta = .75, p < .01$). Nous pouvons noter que le langage oral influence plus les compétences langagières. Plus le langage oral de l'enfant est développé et meilleures seront ses compétences ultérieures en littératie émergente.

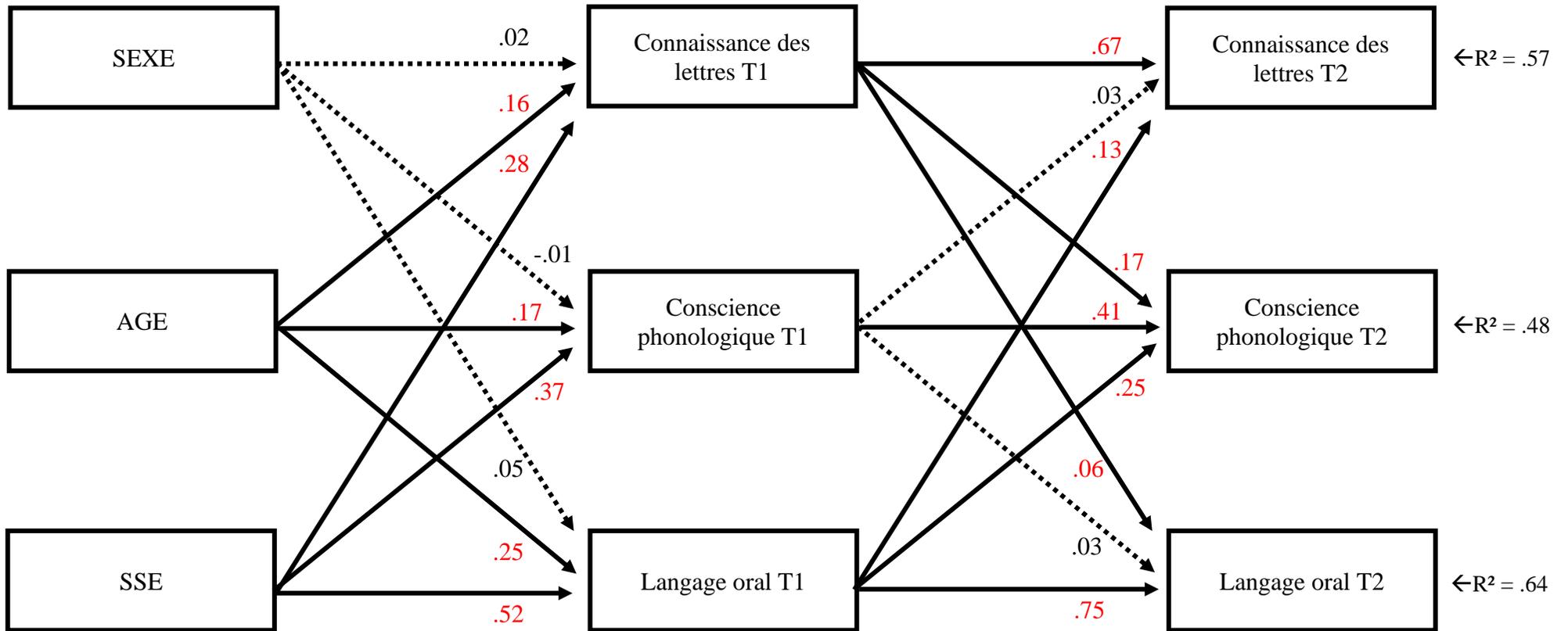


Figure 20. Modèle D1 montrant l'influence des compétences en littératie émergente en début d'année sur les compétences en littératie émergente en fin d'année de moyenne section

$\chi^2 = 34,13$ pour 9 degrés de liberté ; $p = 0.001$; RMSEA (résidus) = 0.062 ; NNFI = 0.96 ; CFI = 0.99 ; AGFI = 0.95

Dans un second temps nous avons souhaité observer l'influence des compétences en numératie émergente en début d'année sur les mêmes compétences en fin d'année de moyenne section (voir Figure 21). La concordance entre les données et le modèle était satisfaisante ($\chi^2 = 44,26$ pour 8 degrés de liberté ; $p < 0.01$; RMSEA (résidus) = 0.08 ; NNFI = 0.95 ; CFI = 0.90 ; AGFI = 0.93).

Tout d'abord, concernant l'influence des caractéristiques de l'enfant sur les compétences en numératie émergente :

(1) Le sexe de l'enfant n'a aucun impact sur les différents domaines de la numératie émergente en début d'année de moyenne section.

(2) L'âge de l'enfant a une influence importante et significative sur les trois domaines : nombres ($\beta = .30, p < .01$), relations ($\beta = .30, p < .01$) et opérations ($\beta = .17, p < .01$). Ainsi, plus l'enfant est âgé et meilleures sont ses compétences en numératie émergente.

(3) Enfin, le SSE de l'enfant est la variable influençant le plus les compétences en numératie émergente de l'enfant. Le SSE influence positivement et significativement les domaines des nombres ($\beta = .39, p < .01$), des relations ($\beta = .32, p < .01$) et des opérations ($\beta = .27, p < .01$). De plus, nous pouvons également constater un effet direct du statut socio-économiques sur le domaine des nombres en fin d'année ($\beta = .11, p < .01$). Ainsi, cet effet n'est pas uniquement médiatisé par les performances de l'enfant en début d'année. De manière plus générale, plus le statut socio-économique de l'enfant est élevé et meilleures sont ses compétences en numératie émergente.

Nous pouvons également remarquer que les compétences en début d'année en numératie émergente influencent ces mêmes compétences en fin d'année. Plus particulièrement, les effets les plus remarquables sont constatés entre les compétences initiales dans un domaine et les compétences ultérieures dans ce même domaine.

(1) Le domaine des nombres en début de moyenne section de maternelle influence positivement et significativement en fin de moyenne section le domaine des nombres ($\beta = .40, p < .01$), celui des relations ($\beta = .20, p < .01$) et celui des opérations ($\beta = .44, p < .01$). Le domaine des nombres influence quelques moins plus tard celui des nombres ainsi que celui des opérations. Afin de répondre aux problèmes à histoire, l'enfant doit être en mesure de manipuler

les mots de nombres. En effet, meilleures sont les compétences de l'enfant dans le domaine des nombres et meilleures seront ses compétences ultérieures en numératie émergente.

(2) Le domaine des relations en début de moyenne section de maternelle influence le domaine des relations en fin d'année ($\beta = .57, p < .01$) ainsi que celui des nombres ($\beta = .33, p < .01$). Plus les compétences de relations entre quantités et chiffre écrit sont développées au début de l'année et meilleures seront les compétences ultérieures de l'enfant dans ces mêmes compétences ainsi que dans les compétences liées aux nombres.

(3) Le domaine des opérations en début de moyenne section de maternelle influence uniquement le domaine des opérations en fin d'année ($\beta = .20, p < .01$). En outre, plus l'enfant a de bonnes compétences de résolution des problèmes à histoire et meilleures seront ses compétences ultérieures de résolution des problèmes à histoire.

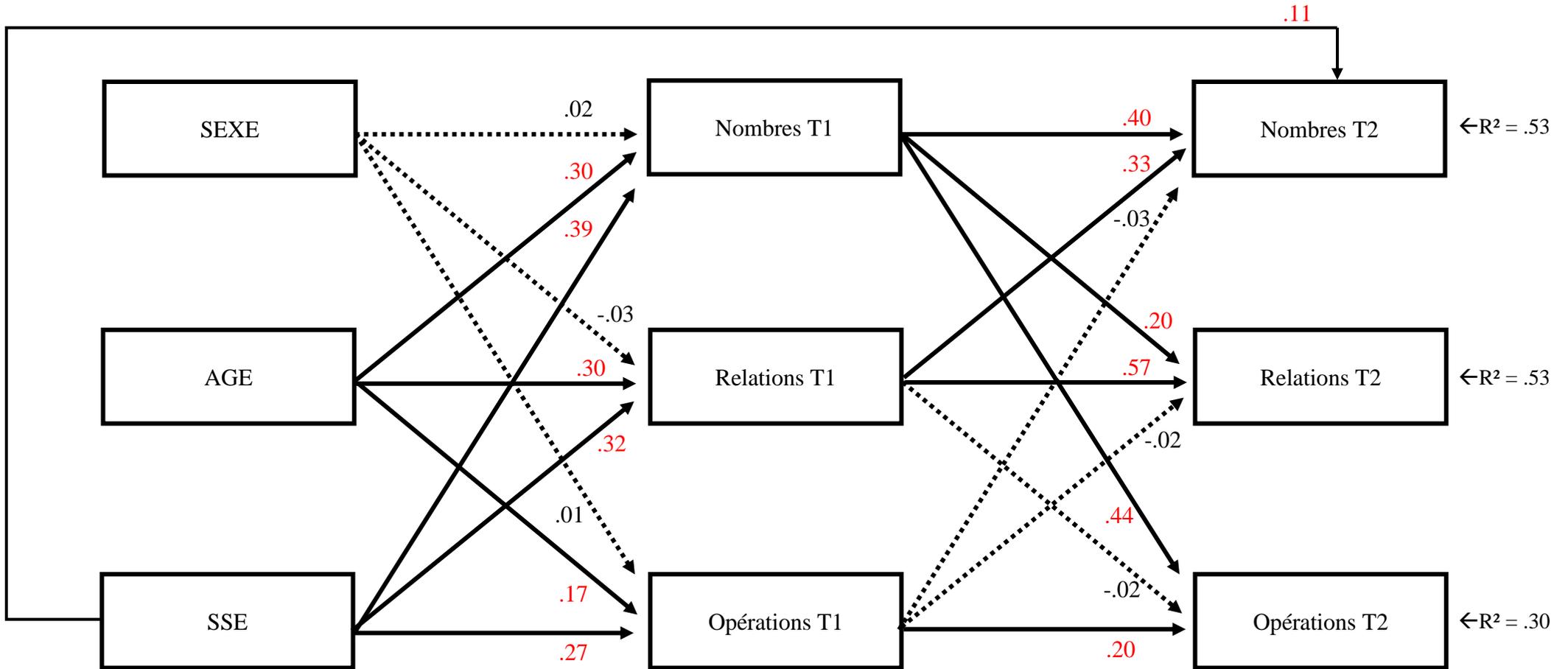


Figure 21. Modèle D2 montrant l'influence des compétences en numératie émergente en début d'année sur les compétences en numératie émergente en fin d'année de moyenne section

$\chi^2 = 44,26$ pour 8 degrés de liberté ; $p < 0.01$; RMSEA (résidus) = 0.08 ; NNFI = 0.95 ; CFI = 0.90 ; AGFI = 0.93

Enfin, dans un dernier temps, nous nous sommes intéressés à l'influence des compétences en littératie émergente en début d'année sur les compétences en numératie émergente en fin d'année de moyenne section (voir Figure 22). Nous avons aussi testé la réciproque, c'est-à-dire l'effet des compétences en numératie émergente au début d'année sur les compétences en littératie émergente en fin d'année (voir Figure 23).

L'influence des compétences en littératie émergente en début d'année sur les compétences en numératie émergente en fin d'année de moyenne section (Figure 22)

Dans le modèle D3 (voir Figure 22), la concordance entre les données et le modèle était satisfaisante ($\chi^2 = 60,76$ pour 9 degrés de liberté ; $p = 0.001$; SRMR (résidus) = 0.036 ; NNFI = 0.92 ; CFI = 0.98).

En observant tout d'abord l'influence des caractéristiques de l'enfant sur les compétences en littératie émergente, nous constatons que :

(1) Le sexe de l'enfant n'a aucun impact sur les différents domaines de la littératie émergente en début d'année de moyenne section.

(2) L'âge de l'enfant influence toujours positivement et significativement la connaissance des lettres ($\beta = .16, p < .01$), la conscience phonologique ($\beta = .17, p < .01$) et le langage oral ($\beta = .25, p < .01$). Ainsi, plus l'enfant est âgé et meilleures sont ses compétences en littératie émergente.

(3) Enfin, le SSE de l'enfant est toujours la variable influençant le plus les compétences en littératie émergente de l'enfant. Le SSE influence positivement et significativement la connaissance des lettres ($\beta = .28, p < .01$), la conscience phonologique ($\beta = .37, p < .01$) et le langage oral ($\beta = .52, p < .01$). Le SSE a un effet plus important sur les compétences de langage oral et de conscience phonologique. Ainsi, plus le statut socio-économique de l'enfant est élevé et meilleures sont ses compétences en littératie émergente.

Puis, en s'intéressant à l'influence des compétences en littératie en début d'année sur les compétences en numératie en fin d'année, nous constatons que :

(1) La connaissance des lettres en début de moyenne section de maternelle influence positivement et significativement en fin de moyenne section le domaine des nombres ($\beta = .32,$

$p < .01$), celui des relations ($\beta = .46, p < .01$) et celui des opérations ($\beta = .08, p < .01$). L'influence de la connaissance des lettres est plus importante sur les domaines « nombres » et « relations » que sur celui des « opérations ». En effet, meilleures sont les compétences de l'enfant en connaissance des lettres et meilleures seront ses compétences ultérieures en numératie émergente.

(2) La conscience phonologique est la compétence en littératie émergente la moins influente sur les compétences en numératie émergente ultérieures. Celle-ci influence uniquement les problèmes à histoire ($\beta = .12, p < .01$). Plus les compétences de conscience phonologique sont développées au début de l'année et meilleures seront les compétences ultérieures de l'enfant en résolution de problèmes à histoire.

(3) Le langage oral en début de moyenne section de maternelle influence significativement les trois domaines de numératie émergente en fin d'année. Il influence alors le domaine des nombres ($\beta = .40, p < .01$), celui des relations ($\beta = .24, p < .01$) et celui des opérations ($\beta = .46, p < .01$). De plus, l'influence du langage oral est plus importante pour les compétences en numératie émergente nécessitant l'utilisation verbale de mots de nombre. En outre, plus l'enfant a de bonnes compétences langagières et meilleures seront ses compétences ultérieures en numératie émergente.

L'influence des compétences en numératie émergente en début d'année sur les compétences en littératie émergente en fin d'année de moyenne section (Figure 23)

Dans le modèle D4 (voir Figure 23), la concordance entre les données et le modèle était satisfaisante ($\chi^2 = 121,59$ pour 8 degrés de liberté ; $p < 0.01$; SRMR (résidus) = 0.048 ; NNFI = 0.82 ; CFI = 0.96).

En observant tout d'abord l'influence des caractéristiques de l'enfant sur les compétences en littératie émergente, nous constatons que :

(1) Le sexe de l'enfant n'a aucun impact sur les différents domaines de la numératie émergente en début d'année de moyenne section.

(2) L'âge de l'enfant a une influence importante et significative sur les trois domaines : nombres ($\beta = .29, p < .01$), relations ($\beta = .30, p < .01$) et opérations ($\beta = .17, p < .01$). Ainsi, plus l'enfant est âgé et meilleures sont ses compétences en numératie émergente.

(3) Enfin, le SSE de l'enfant est la variable influençant le plus les compétences en numératie émergente de l'enfant. Le SSE influence positivement et significativement les domaines des nombres ($\beta = .39, p < .01$), des relations ($\beta = .32, p < .01$) et des opérations ($\beta = .26, p < .01$). De manière plus générale, plus le statut socio-économique de l'enfant est élevé et meilleures sont ses compétences en numératie émergente.

Puis, en s'intéressant à l'influence des compétences en numératie en début d'année sur les compétences en littératie en fin d'année, nous constatons que :

(1) Le domaine des nombres en début de moyenne section de maternelle influence positivement et significativement en fin de moyenne section la conscience phonologique ($\beta = .38, p < .01$) et le langage oral ($\beta = .53, p < .01$). En outre, meilleures sont les compétences de l'enfant dans le domaine des nombres et meilleures seront ses compétences ultérieures de conscience phonologique et de langage oral.

(2) Le domaine des relations en début de moyenne section de maternelle influence la connaissance des lettres ($\beta = .52, p < .01$) et la conscience phonologique ($\beta = .14, p < .01$). Plus les compétences de relations entre quantités et chiffre écrit sont développées au début de l'année et meilleures seront les compétences ultérieures de l'enfant en connaissance des lettres et en conscience phonologique.

(3) Le domaine des opérations en début de moyenne section de maternelle influence la connaissance des lettres ($\beta = .08, p < .01$), la conscience phonologique ($\beta = .22, p < .01$) et le langage oral en fin d'année ($\beta = .19, p < .01$). En outre, plus l'enfant a de bonnes compétences de résolution des problèmes à histoire et meilleures seront ses compétences ultérieures en littératie émergente.

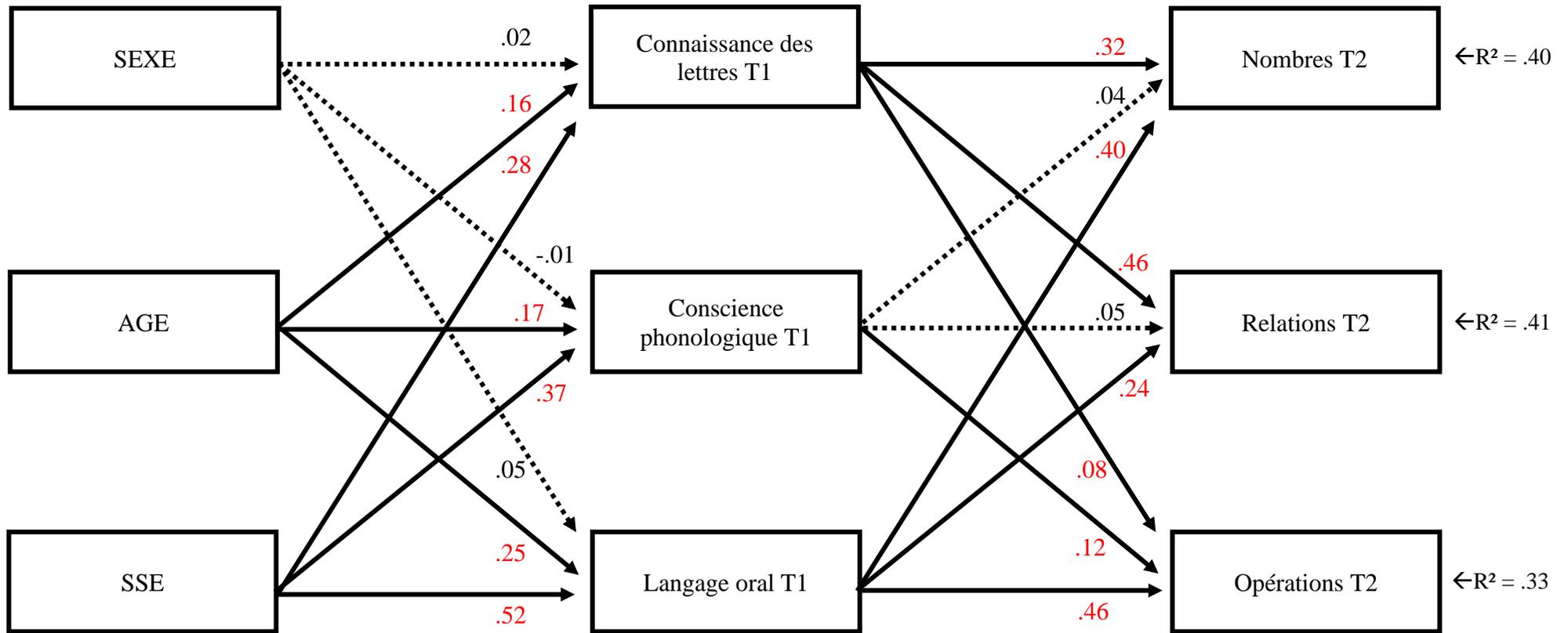


Figure 22. Modèle D3 montrant l'influence des compétences en littératie émergente en début d'année sur les compétences en numératie émergente en fin d'année de moyenne section

$\chi^2 = 60,76$ pour 9 degrés de liberté ; $p = 0,001$; SRMR (résidus) = 0,036 ; NNFI = 0,92 ; CFI = 0,98

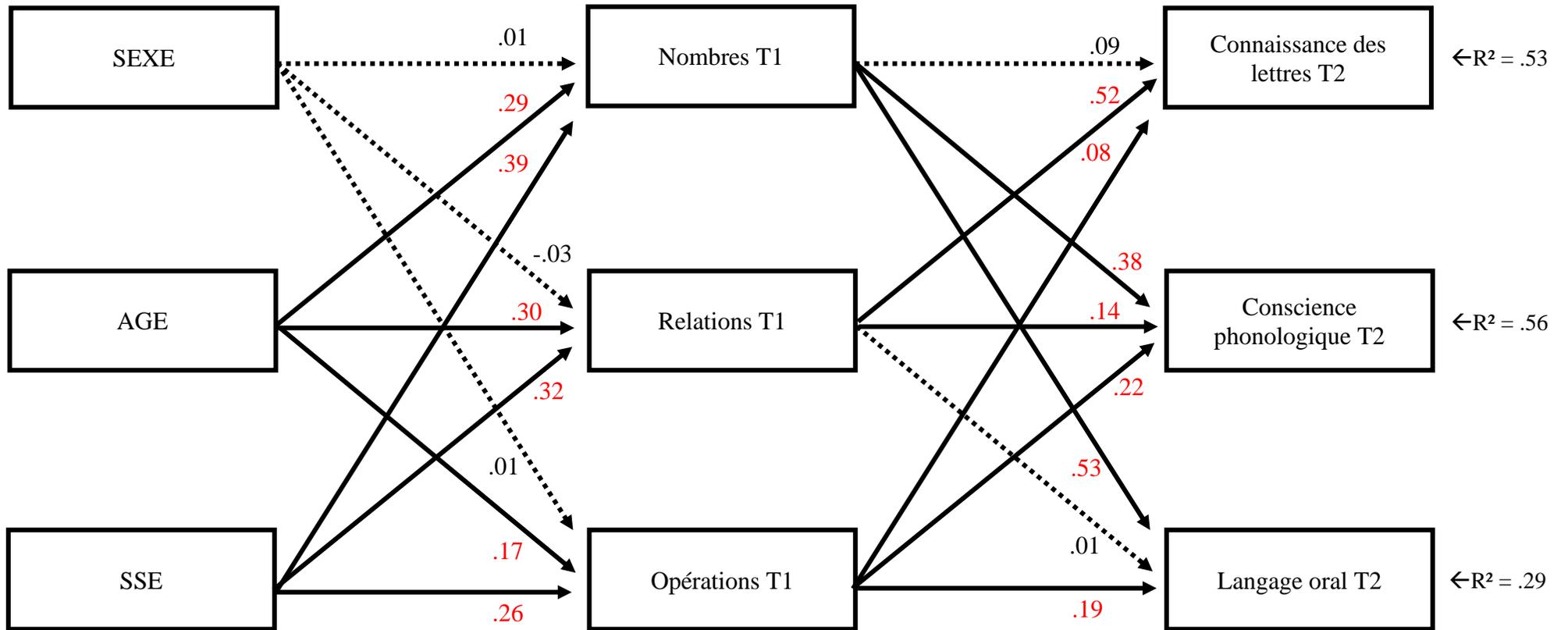


Figure 23. Modèle D4 montrant l'influence des compétences en numératie émergente en début d'année sur les compétences en littératie émergente en fin d'année de moyenne section

$\chi^2 = 121,59$ pour 8 degrés de liberté ; $p < 0.01$; SRMR (résidus) = 0.048 ; NNFI = 0.82 ; CFI = 0.96

Dans cette partie, nous avons étudié les liens diachroniques existants entre les compétences en numératie émergente et les compétences en littératie émergente en début et en fin d'année. Le premier modèle présenté (voir Figure 20) s'intéresse aux aspects prédictifs des compétences en littératie émergente en T1 sur les compétences en littératie émergente en T2. Le second (voir Figure 21) questionne les aspects prédictifs des compétences en numératie émergente en T1 sur les compétences en numératie émergente en T2. Pour chaque facteur en littératie émergente observé en T2, l'influence principale émanait du même facteur mesuré en T1. Cependant, pour les compétences en numératie émergente, nous pouvons noter que le domaine « opérations » mesuré en T2 est principalement prédit par le domaine « nombres » en T1 et suivi par le domaine « opérations » en T1.

Les modèles D3 et D4 (voir Figures 22 et 23) nous montrent que les compétences initiales en littératie et en numératie émergentes influencent leur développement durant l'année de moyenne section. Le langage oral en début de moyenne section apparaît alors comme le facteur influençant le plus le développement des compétences en numératie émergente. Concernant l'influence de la numératie émergente, le domaine « nombres » est un prédicteur des compétences de langage oral tandis que le domaine « relations » influence davantage les compétences de connaissance des lettres.

5.6. Discussion

5.6.1. Les liens synchroniques entre les compétences en littératie et en numératie émergentes

De nombreuses études internationales montrent que la plupart des compétences en littératie émergente sont modérément corrélées les unes avec les autres (Koponen et al., 2007; Powell & Atkinson, 2020; Purpura et al., 2011). Dans notre étude, les plus fortes corrélations ont été observées entre les compétences au sein d'un même domaine. Ainsi, la reconnaissance des lettres est fortement corrélée à la connaissance du nom des lettres (.81) ainsi qu'à leur son (.59). De même, les compétences de langage oral sont corrélées plus fortement entre elles qu'avec les autres compétences. Concernant les épreuves de conscience phonologique, celles-ci sont corrélées entre elles et apparaissent également corrélées aux compétences alphabétiques et langagières. Plusieurs auteurs suggèrent alors que les compétences de conscience phonologique s'appuieraient sur certaines compétences préalables comme la connaissance du

nom et du son des lettres, la compréhension orale ou le vocabulaire de l'enfant (Biot-Chevrier et al., 2008; Cooper et al., 2002; Foulin, 2005; Hipfner-Boucher et al., 2014; Huang et al., 2014).

A propos des compétences en numératie émergente, celles-ci apparaissent également corrélées les unes aux autres (Beltrán-Navarro et al., 2018; Hornburg et al., 2018; Purpura & Lonigan, 2015). Les corrélations entre les différentes compétences en numératie émergente sont plus importantes que celles entre les compétences en littératie émergente. La reconnaissance et la dénomination des chiffres sont les deux compétences en numératie émergente les plus corrélées (.76). Le dénombrement et le principe cardinal sont également fortement corrélés (.71) et renvoient tous deux à la même activité (Aunio & Niemivirta, 2010; Purpura & Lonigan, 2015). Le subitizing apparaît également comme l'épreuve la plus fortement corrélée avec les autres. L'importance du subitizing dans le développement numérique des enfants de trois à cinq ans a également été démontré par Fischer et Bocerean (2004). Ces résultats, semblables à ceux de Beltrán-Navarro et al. (2018), montrent que le subitizing soutiendrait le développement des diverses compétences en numératie émergente. Enfin, dans notre étude, l'épreuve des problèmes à histoire est la moins corrélée avec les autres épreuves. Cette épreuve implique davantage les compétences langagières et la mémoire de travail de l'enfant (*e.g.* Dehaene et al., 2003). Cependant, les corrélations que nous avons observées entre les problèmes à histoire et les autres épreuves en numératie émergente sont semblables à celles obtenues par Purpura et al. (2013)

Sur la base de ces constats, nous nous sommes interrogés sur les liens synchroniques entretenus entre les compétences en littératie et en numératie émergente. L'aspect longitudinal de cette recherche nous a alors permis d'investiguer deux questions :

Q1 : Quels liens entretiennent les compétences en littératie et en numératie émergentes au début de la moyenne section de maternelle ?

Q2 : Quels liens entretiennent les compétences en littératie et en numératie émergentes à la fin de la moyenne section de maternelle ?

Pour répondre à ces deux questions, nous avons testé des modèles en pistes afin d'explorer les liens existants entre les compétences en littératie et en numératie émergentes au début et à la fin de la moyenne section. Nous avons ainsi testé différents modèles montrant, tout d'abord, l'influence de la littératie sur la numératie émergente puis réciproquement l'influence de la numératie sur la littératie émergente. Les modèles présentant l'influence de la littératie sur la

numératie émergente étaient satisfaisants. En revanche, ceux testant l'influence de la numératie sur la littératie présentaient de moins bons indicateurs.

Les modèles montrent que l'âge et le statut socio-économique influencent le développement des compétences en littératie émergente des enfants de moyenne section de maternelle. Nos modèles indiquent que le statut socio-économique influence fortement les compétences en littératie émergente des enfants et principalement le langage oral. Plus particulièrement, les enfants provenant d'un milieu socio-économique plus défavorisé montrent de plus faibles niveaux de langage oral et un vocabulaire moins développé (Hart & Risley, 1995; Hoff, 2013; Huttenlocher et al., 2010). De même, le niveau de conscience phonologique des enfants provenant de milieux socio-économiques plus défavorisés est plus faible que celui des enfants issus de la classe moyenne (Bowey, 1995; McDowell et al., 2007). De nombreuses recherches se sont également intéressées aux différences de compétences en littératie émergente liées au sexe de l'enfant (*e.g.* Below et al., 2010; Deasley et al., 2018). Plusieurs études ont ainsi montré que les filles obtenaient de meilleurs scores que les garçons pour diverses compétences en littératie émergentes telles que le vocabulaire, la connaissance du nom et du son des lettres ou encore la conscience phonologique (Below et al., 2010; Deasley et al., 2018). D'autres études n'ont, quant à elles, observé aucune différence liée au sexe de l'élève (*e.g.* Raag et al., 2011). Dans notre étude, nous n'avons observé qu'un effet du sexe sur les compétences de langage oral en fin de moyenne section. Par conséquent, à la fin de la moyenne section, les filles ont de meilleures compétences langagières que les garçons. Cette constatation est cohérente avec les recherches existantes (Below et al., 2010; Deasley et al., 2018). Les résultats que nous avons obtenus concernant l'influence du sexe de l'enfant sur ses compétences de littératie nous questionnent. Cet effet pourrait être lié à l'évaluation : certaines périodes de la scolarité de l'enfant seraient plus propices à l'observation de différences liées au sexe de celui-ci. Nous pouvons également supposer que les pratiques enseignantes à l'école maternelle minimiseraient ces différences.

Concernant plus spécifiquement l'influence des compétences en littératie émergente sur les compétences en numératie émergente, nous constatons très peu de différences entre le début et la fin d'année de moyenne section. Ainsi, durant l'année de moyenne section, les trois facteurs de littératie émergente influencent nos trois facteurs de numératie émergente. Nous pouvons noter que le facteur « connaissance des lettres » influence plus spécifiquement les facteurs « nombres » et « relations ». Les liens importants entre la connaissance des lettres et celle des chiffres ont déjà été observés dans de nombreuses études (*e.g.* Neumann et al., 2013;

Piasta et al., 2010). De plus, la connaissance de lettres serait aussi fortement corrélée aux compétences de comptage et de concept de nombre (Koponen et al., 2007), ce qui est cohérent avec nos données. Comme pour les compétences en littératie émergente, de nombreux aspects de la numératie reposent sur des symboles écrits et principalement notre facteur « relations ». Dans nos modèles, nous avons remarqué un lien plus important entre la connaissance des lettres et les relations entre le chiffre écrit et les quantités. Enfin, nous observons un lien plus faible entre le facteur de connaissance des lettres et celui des opérations. Dans certaines études, des corrélations plus importantes ont été observées entre ces deux facteurs (*e.g.* Matthews et al., 2009).

Ensuite, le facteur « langage oral » influence plus particulièrement le facteur « nombres ». En effet, celui-ci implique l'utilisation du langage oral et plus particulièrement l'emploi des noms de nombres (*e.g.* LeFevre et al., 2010; Purpura & Ganley, 2014). Les compétences langagières du jeune enfant seraient nécessaires au développement du langage mathématique (Kleemans et al., 2011). Dans notre étude, d'autres liens ont été observés entre le langage oral et les compétences en numératie émergente : le langage oral est lié aux problèmes à histoire et aux relations entre nombres et quantités. En effet, Hornburg et al. (2018) ont montré que le vocabulaire expressif chez l'enfant d'âge préscolaire est corrélé modérément avec toutes les compétences en numératie émergente. Plus particulièrement, le vocabulaire réceptif impacterait plus fortement les compétences en numératie émergente comme le dénombrement ou les calculs simples (Harvey & Miller, 2017). Comme nous avons pu le voir, dans notre étude, le langage oral est impliqué dans l'évaluation des différentes compétences en numératie émergente. Effectivement, les compétences en numératie émergente nécessitent la plupart du temps l'emploi verbal des noms de nombre.

Enfin, dans notre étude la conscience phonologique est le facteur le moins lié aux compétences en numératie émergente. Ces résultats sont plutôt contraires à ceux observés dans la littérature internationale (*e.g.* Hecht et al., 2001; Krajewski & Schneider, 2009; Simmons & Singleton, 2008). En effet, ces auteurs ont montré que des difficultés en conscience phonologique entraîneraient des difficultés dans la manipulation des noms de nombre et dans la segmentation de la chaîne numérique verbale. Dans notre étude, seuls des élèves de moyenne section ont été évalués, ce qui peut expliquer ces résultats. En effet, dans les programmes de l'école maternelle française (MEN, 2015), les activités de conscience phonologique les plus simples commencent en moyenne section et celles plus complexes, comme la suppression ou l'inversion de syllabes, sont réalisées en grande section. D'autres études ont observé des liens

plus modérés entre la conscience phonologique et les différentes épreuves en numératie émergente. Ainsi, l'étude de Koponen et al. (2007) a montré que la conscience phonologique était corrélée avec le concept de nombre. De même, la conscience phonologique serait également corrélée avec les compétences de comptage (*e.g.* Krajewski & Schneider, 2009; Zhang et al., 2017). Ces résultats sont donc en accord avec ceux observés dans notre étude. En effet, certaines compétences en numératie émergente, comme le dénombrement ou la récitation de la chaîne numérique verbale, utilisent le code verbal commun aux compétences de conscience phonologique (Dehaene et al., 2003; Simmons & Singleton, 2008).

Comme nous l'avons constaté, dès l'école maternelle, les compétences en littératie et en numératie émergentes sont liées. Elles se développent dès le plus jeune âge par l'intermédiaire des interactions et des stimulations proposées dans l'environnement immédiat de l'enfant. Ainsi, avant même d'entrer à l'école maternelle, les enfants diffèrent en termes de compétences. Ces compétences en littératie et en numératie émergentes impliquent des activités cognitives similaires comme les capacités attentionnelles, la mémoire ou encore le fonctionnement exécutif qui peuvent être développées à l'école maternelle. De futures recherches pourraient tenter de déterminer comment et quand ces facteurs impactent l'acquisition des compétences en littératie et en numératie émergentes, et si cet impact est spécifique à certaines dimensions de la littératie et de la numératie émergentes. Ainsi, mieux comprendre les liens et les activités cognitives impliquées dans ces compétences permettra à l'enseignant de construire des situations d'apprentissage adaptées aux trajectoires d'apprentissages des enfants (Clements & Sarama, 2004; Julie Sarama & Clements, 2009).

5.6.2. Les liens diachroniques entre les compétences en littératie et en numératie émergentes

Nous nous sommes intéressés à l'influence des compétences initiales en littératie et en numératie émergentes sur le développement ultérieur de ces mêmes compétences. Cette étude, initialement prévue sur deux années, devait nous permettre d'explorer ces influences durant la moyenne et la grande section de maternelle. Cependant, la situation sanitaire exceptionnelle de l'année 2020 ne nous a pas permis d'évaluer les élèves en fin de grande section de maternelle. Durant l'année scolaire 2020-2021, nous allons récupérer les livrets d'évaluation des compétences des élèves, scolarisés en CP : cela nous permettra donc d'observer les liens entre les compétences des élèves en moyenne section et leurs compétences en CP. De nombreuses

études s'intéressent aux aspects prédictifs des compétences en littératie et en numératie émergentes plusieurs années plus tard (*e.g.* Duncan et al., 2007; Manfra et al., 2017; Pagani et al., 2010; Zhang et al., 2020). Cependant, peu d'études se sont intéressées aux liens entre ces compétences durant la période préscolaire. Nous avons souhaité évaluer l'aspect prédictif des compétences émergentes sur les compétences ultérieures. Ainsi, nous avons tenté de répondre à deux premières questions :

Q1 : Comment les compétences initiales en littératie émergente influencent-elles le développement ultérieur de ces mêmes compétences ?

Q2 : Comment les compétences initiales en numératie émergente influencent-elles le développement ultérieur de ces mêmes compétences ?

En nous intéressant tout d'abord à l'influence des compétences en littératie émergente en début de moyenne section sur ces mêmes compétences en fin de grande section (voir Figure 20), nous constatons que les plus forts liens sont observés entre une même compétence. Ainsi, les compétences de connaissance des lettres en T1 influencent principalement les compétences de connaissance des lettres en T2 ; les compétences de conscience phonologique en T1 influencent principalement les compétences de conscience phonologique en T2 ; et les compétences de langage oral en T1 influencent principalement les compétences de langage oral en T2. Le facteur « langage oral » est celui ayant la plus grande influence sur les compétences ultérieures de littératie. Les compétences langagières au début de la moyenne section influencent fortement le développement langagier durant la moyenne section. En effet, les compétences langagières incluent le vocabulaire et la compréhension (Kendeou et al., 2009). Ces compétences se développent par l'intermédiaire des interactions de l'enfant avec son environnement immédiat et impliquent diverses composantes cognitives, comme par exemple la mémoire de travail (Cain et al., 2004; van den Broek et al., 2011). Ces compétences langagières sont utilisées dans la plupart des activités réalisées par l'enfant. Ces compétences langagières influencent également le développement des compétences phonologiques et de façon moins importante la connaissance des lettres. La connaissance des lettres en début de moyenne section influence le développement des trois facteurs de littératie émergente durant l'année. Cependant, la connaissance des lettres a une faible incidence sur le langage oral et un effet modéré sur les compétences de traitement phonologique. Enfin, dans notre étude, les compétences phonologiques n'ont de l'influence que sur les compétences phonologiques

ultérieures. Ce résultat semble contraire à certaines études dans lesquelles la conscience phonologique participerait activement au développement de la compréhension orale (e.g. Bianco et al., 2010). Cependant, les liens observés dans notre étude ont été réalisés sur une courte période de seulement quelques mois. Des observations sur une période plus longue permettraient d'étudier si ces liens varient au cours de la période préscolaire. De plus, comme mentionné précédemment, de nombreux facteurs influencent le développement des compétences en littératie émergente comme les compétences attentionnelles ou l'intérêt porté par l'enfant aux apprentissages de littératie (e.g. Hume et al., 2016).

Ensuite, nous nous sommes intéressés à l'influence des compétences en numératie émergente en début de moyenne section sur ces mêmes compétences en fin de grande section (voir Figure 21). Pour rappel, le facteur « nombres » correspond aux activités utilisant le nombre sous sa forme verbale, le facteur « relations » renvoie aux correspondances entre un nombre écrit et une quantité et enfin le facteur « opérations » fait référence aux problèmes à histoire. Le facteur « nombres » est celui influençant le plus le développement des compétences en numératie émergente. En effet, ce facteur renvoie à la capacité de dénombrer ou d'estimer une collection, ces compétences sont nécessaires pour permettre à l'enfant de représenter une quantité à l'aide du mot de nombres correspondant et sont donc impliquées dans toutes les autres compétences évaluées. Les modèles de Krajewski et Schneider (2009) et de Purpura et al. (2013) montrent tous deux un premier apprentissage verbal du nombre puis son association progressive avec le chiffre écrit correspondant. En effet, les jeunes enfants apprennent les mots de nombre avant de reconnaître les chiffres écrits (Hurst et al., 2017). Ainsi, les liens entre quantités et mots de nombres se développent bien avant ceux entre quantités et chiffres écrits (Benoit et al., 2013). Ensuite, le facteur « relations » influence son développement ultérieur ainsi que le développement du facteur « nombres ». En effet, Garon-Carrier et al. (2018) ont montré que des déficits précoces en connaissance des chiffres entravaient le développement mathématique ultérieur. Les associations entre chiffres écrits et quantités se développent progressivement et permettent à l'enfant de développer une meilleure compréhension du concept de nombre (Purpura & Napoli, 2015). Enfin, le facteur « opérations » représente l'une des compétences en numératie les plus difficiles à développer par l'enfant. Notre modèle montre que le facteur « nombres » influence fortement le développement des compétences de problèmes à histoires. Effectivement, les problèmes à histoire impliquent l'utilisation verbale des mots de nombres par l'enfant et de la chaîne numérique. Dès la période préscolaire, l'enfant est capable de résoudre des problèmes à histoire mais il doit au préalable comprendre et

apprendre les mots de nombres (Levine et al., 1992; Litkowski et al., 2020). Comme pour les liens observés entre les compétences en littératie émergente, notre étude ne cible qu'une courte période de seulement quelques mois. Des observations sur une période plus longue permettraient d'étudier si ces liens varient au cours de la période préscolaire. Plusieurs facteurs influencent également le développement des compétences en numératie émergente comme le vocabulaire et la compréhension orale, la mémoire de travail ou les fonctions exécutives (*e.g.* Fayol, 1991; Purpura et al., 2017; Schmitt et al., 2019).

En s'appuyant sur ces premières observations, nous avons souhaité examiner l'aspect prédictif d'un domaine sur le second. Comme nous l'avons remarqué, le modèle le plus courant consiste à observer l'impact des compétences en littératie émergente sur les compétences en numératie émergente. Un second modèle, qui est rarement utilisé, vise à tester l'influence des compétences en numératie émergente sur les compétences en littératie émergente. Dans notre étude, nous avons testé et comparé les deux premiers modèles. Ainsi, nous essayons de répondre aux deux questions suivantes :

Q3 : Comment les compétences initiales en littératie émergente influencent-elles le développement ultérieur des compétences en numératie émergente ?

Q4 : Comment les compétences initiales en numératie émergente influencent-elles le développement ultérieur des compétences en littératie émergente ?

La figure 22 montre l'influence des compétences en littératie émergente en début d'année sur les compétences en numératie émergente en fin d'année de moyenne section tandis que la figure 23 montre l'influence des compétences en numératie émergente en début d'année sur les compétences en littératie émergente en fin d'année de moyenne section. En comparant les différents indicateurs statistiques, nous pouvons constater que le modèle révélant l'influence des compétences en littératie émergente sur les compétences en numératie émergente est préférable au modèle indiquant l'influence de la numératie émergente sur la littératie émergente.

Dans le modèle montrant l'impact de la littératie émergente sur les compétences en numératie émergente, les facteurs « connaissance des lettres » et « langage oral » influencent l'ensemble des facteurs de numératie émergente en fin de moyenne section. Effectivement, de nombreux auteurs ont déjà remarqué que la connaissance des lettres évaluée en maternelle était fortement corrélée avec les compétences mathématiques chez des enfants plus âgés (*e.g.* Koponen et al., 2007; Rabiner et al., 2016; Zhang et al., 2020). De même, des liens entre le langage oral de

l'enfant en maternelle (vocabulaire et compréhension) et les compétences mathématiques ont également été constatés (*e.g.* Koponen et al., 2007; Manfra et al., 2017; Zhang et al., 2020). Dans notre modèle, la conscience phonologique influence uniquement les problèmes à histoire. Ainsi, meilleures sont les compétences phonologiques et meilleures seront ses performances dans la résolution des problèmes à histoire. Dans certaines études longitudinales, des auteurs ont également constaté l'aspect prédictif de la conscience phonologique vis-à-vis des compétences mathématiques futures (*e.g.* Koponen et al., 2007; Korpipää et al., 2017; ten Braak et al., 2018). Cependant, toutes ces études se sont intéressées à l'aspect prédictif des compétences en littératie émergente sur les compétences mathématiques plusieurs années plus tard. Notre étude est donc l'une des premières à questionner l'aspect prédictif de la littératie émergente sur une période de quelques mois. L'apport de notre étude consiste à montrer que cet aspect prédictif est déjà observé en maternelle sur un laps de temps assez court. Nos observations confortent donc l'aspect primordial de l'école maternelle dans le développement des compétences émergentes des élèves. Ainsi, en mobilisant et en développant, dès le plus jeune âge, les compétences en littératie et en numératie émergente, l'école maternelle offre aux enfants un socle de connaissances et de compétences nécessaires au développement de leurs compétences futures comme la lecture, l'écriture ou les compétences mathématiques plus avancées. Plus ces acquisitions sont solides à la fin de l'école maternelle, plus les enfants se retrouveront dans de meilleures dispositions pour leurs apprentissages formels.

Conclusion

De nombreuses études ont ainsi démontré l'aspect prédictif des compétences émergentes des élèves de maternelle (Duncan et al., 2007; Koponen et al., 2007; Korpipää et al., 2017; Pagani et al., 2010; Rabiner et al., 2016). Des liens significatifs existent entre les dimensions de la littératie et de la numératie émergentes et le développement des compétences ultérieures des élèves. La littératie émergente est donc hautement prédictive de la réussite de lecture ultérieure, tandis que la numératie émergente est prédictive des résultats ultérieurs en lecture et en mathématiques (Duncan et al., 2007). Toutes les études mentionnées ci-dessus ont prouvé l'importance des connaissances mathématiques émergentes et de l'apprentissage précoce des mathématiques pour la réussite scolaire ultérieure.

Une multitude d'études se sont intéressées à l'influence de la littératie émergente sur le développement mathématique ultérieur (Fyfe et al., 2019; Koponen et al., 2007; Korpipää et al., 2017; Manfra et al., 2017; Rabiner et al., 2016; ten Braak et al., 2018; Zhang et al., 2020).

De même, de nombreuses études ont montré l'influence de la numératie émergente sur le développement des compétences ultérieures de littératie (Claessens et al., 2009; Duncan et al., 2007; Koponen et al., 2007; Korpipää et al., 2017; Manfra et al., 2017). Cependant, peu d'études ont démontré plus finement l'importance de ces liens. D'un point de vue longitudinal, il serait donc pertinent d'observer les liens et les interactions entre les différentes dimensions de la littératie et de la numératie émergentes et les compétences académiques ultérieures des élèves.

Discussion générale

Cette thèse avait un double objectif. Le premier consistait à évaluer les effets de l'utilisation d'une application éducative développant les compétences en littératie et en numératie émergentes dans le contexte de la classe. Le second visait à étudier les liens entre les différentes compétences en littératie et en numératie émergentes chez l'enfant de quatre à six ans.

6.1. Construction et validation d'outils de mesure des compétences en littératie et en numératie émergentes

La première partie de cette thèse s'est intéressée au développement des compétences en littératie et en numératie émergentes. Les concepts de littératie et de numératie émergentes, bien documentés au sein de la littérature internationale, englobent une multitude de compétences nécessaires au développement académique (*e.g.* lecture et mathématiques) de l'enfant. Lors de la conception de l'outil d'évaluation, nous avons donc fait le choix de mesurer la plupart de ces compétences dans un outil unique avec des échelles indépendantes. Cet instrument de mesure se présente sous la forme d'une application sur tablette tactile. La présentation de l'outil sur tablette semble être un choix pertinent de par ces avantages : (1) cet outil permet la standardisation de la passation des épreuves et du recueil de données, (2) les actions réalisées pour répondre aux items sont adaptées aux compétences de motricité fine des enfants d'âge préscolaire et, (3) l'outil permet de maintenir l'attention des enfants sur la tâche et réduit le temps de passation (Neumann, 2018). L'application *LINUMEN Evaluation* mesure ainsi les compétences de connaissance des lettres, de conscience phonologique, de langage oral, de connaissance des chiffres, de dénombrement, de sériation, de subitizing et de correspondance entre quantités et chiffres écrits. Cet outil a montré de bonnes qualités psychométriques et a été utilisé afin de quantifier les compétences des élèves en début et en fin de moyenne section.

La structuration des compétences en littératie et en numératie émergentes

Dans le cadre de cette thèse, nous nous sommes tout d'abord intéressés à la structure factorielle des compétences en littératie et en numératie émergentes. Comme Townsend et Konold (2010) l'ont noté, très peu d'études ont examiné la structure factorielle des compétences

en littératie émergente. Les épreuves en littératie émergente que nous avons élaborées montrent une structure factorielle à trois facteurs : connaissance des lettres, conscience phonologique et langage oral. L'originalité de notre travail réside dans le fait de tester et valider une structure hiérarchique où un facteur de second ordre sature ceux du premier ordre. Un modèle hiérarchique à quatre facteurs, distinguant vocabulaire et compréhension, a également été testé, cependant, les analyses factorielles confirmatoires ont montré un meilleur ajustement du modèle à trois facteurs. De même, peu d'études ont examiné la dimensionnalité des connaissances en numératie émergente des enfants d'âge préscolaire. Concernant nos épreuves en numératie émergente, les analyses factorielles confirmatoires ont montré un meilleur ajustement du modèle unifactoriel. Plusieurs études ont adopté une approche multifactorielle des compétences en numératie émergente. La plupart s'accordent sur un modèle en trois facteurs basé sur les compétences en comptage, les compétences relationnelles numériques et les compétences arithmétiques de base (Aunio & Räsänen, 2016; Lopez-Pedersen et al., 2020; Milburn et al., 2019; Purpura & Lonigan, 2013). Néanmoins, nous constatons que les compétences en numératie émergente évaluées dans la présente étude sont fortement corrélées. Ainsi, le modèle unifactoriel est théoriquement mieux adapté aux données et a donc été choisi.

Dans cette thèse, l'outil d'évaluation développé en format numérique a montré de bonnes qualités psychométriques. Ce dernier permet d'évaluer la plupart des compétences de base qui soutiennent le développement de la littératie et de la numératie émergentes chez des enfants de quatre à six ans. De plus, comme souvent observé chez les jeunes enfants, les compétences en littératie et en numératie émergentes sont fortement liées (Betts et al., 2011; Welsh et al., 2010). Dans notre étude, nous avons constaté que celles-ci étaient significativement corrélées à .76 en début et en fin de moyenne section de maternelle. Ainsi, les compétences en littératie et en numératie émergentes partagent une part importante de variance qui pourrait être attribuée à certaines compétences cognitives de haut niveau tels que la mémoire, les compétences attentionnelles ou encore les fonctions exécutives (Blair & Razza, 2007; Schmitt et al., 2019; Welsh et al., 2010).

6.2. L'utilisation de l'application AppLINOU dans les classes

6.2.1. Les effets de l'intervention

L'une des principales réalisations de ce travail de thèse réside dans la co-conception et l'évaluation d'une application éducative pour des élèves de maternelle. Cette application a fait

l'objet d'une triple collaboration entre des chercheurs, des acteurs éducatifs et une startup, pour le développement informatique de l'outil. L'application *AppLINO* se compose ainsi de 20 activités ayant pour objectif de développer un ensemble de compétences en littératie et en numératie émergentes chez le jeune enfant. Afin d'évaluer les effets de l'utilisation de l'application sur les compétences de l'enfant, un plan quasi-expérimental comparant deux groupes a été mis en place. Dans le groupe expérimental, les enseignants étaient formés à l'utilisation de l'application et les élèves devaient suivre un protocole programmé sur deux années, tandis que dans le groupe contrôle, aucune indication spécifique n'était donnée aux enseignants.

Avec nos hypothèses de recherche, nous nous attendions à ce qu'en fin de moyenne section, les élèves du groupe expérimental aient de meilleures performances en littératie et en numératie émergentes que les élèves du groupe contrôle. Nous nous attendions également, que les élèves en REP du groupe expérimental aient de meilleures performances en littératie et en numératie émergentes que les élèves en REP du groupe contrôle.

Afin de répondre à ces hypothèses, nous avons réalisé des analyses de régression multiniveaux (voir article 3). Peu d'études évaluant l'efficacité d'un dispositif utilisent ces analyses qui sont devenues incontournables (e.g. Bressoux, 2020). Ces analyses ont montré que l'intervention n'a pas eu d'impact sur la progression des élèves en fin d'année concernant le score global en littératie et en numératie émergentes. En revanche, en s'intéressant aux sous-dimensions de littératie émergente, un effet de l'intervention est observé uniquement sur la progression en conscience phonologique. Par ailleurs, les analyses de régression multiniveaux ont montré également que les élèves REP du groupe expérimental ont moins progressé que les élèves REP du groupe contrôle.

6.2.2. Interaction entre le groupe et le type d'école

Nous avons introduit dans les différents modèles de régression un terme d'interaction entre le groupe et le type d'école. Cette interaction nous permet d'observer si les élèves du groupe expérimental scolarisés hors réseau d'éducation prioritaire ont de meilleures performances en fin de grande section que les autres élèves de l'échantillon. Cette nouvelle variable s'avère significative pour tous les scores de littératie et de numératie considérés en post-test. Autrement dit, le fait d'être élève dans le groupe expérimental et dans une école en dehors d'un réseau d'éducation prioritaire permet de progresser plus que les autres.

6.2.3. *Éléments d'interprétation*

Différentes pistes explicatives des résultats observés peuvent être proposées.

1) Tout d'abord, cette évaluation a été réalisée seulement quatre mois après le début de l'expérimentation. Le matériel était donc nouveau pour les élèves ainsi que pour les enseignants. L'utilisation en classe des tablettes et de l'application a été ponctuée de soucis techniques comme par exemple des difficultés de connexion internet. Malgré la réactivité de la part des développeurs et de notre équipe, cela a causé des contraintes et du stress supplémentaire aux enseignants du groupe expérimental. De même, le protocole expérimental était assez lourd pour les enseignants, car ceux-ci étaient contraints de réaliser les séances sur une courte période temporelle.

2) Nous avons également questionné l'acceptance de l'application *AppLINOU* par les enseignants. Le score d'acceptance des enseignants de REP est significativement moindre en comparaison aux autres enseignants (Hoareau et al., Soumis). Cette variable a donc peut-être une influence sur le déploiement de l'intervention auprès des élèves.

3) L'utilisation de l'application *AppLINOU* en classe était prévue sur deux ans et a été conduite à son terme. Durant l'année scolaire 2019-2020, les élèves de grande section de maternelle ont utilisé l'application *AppLINOU* durant quinze semaines. Cependant, seules les évaluations de mi-parcours (fin de moyenne section) ont pu être réalisées. Les évaluations terminales de cette expérimentation devaient être réalisées entre avril et juin 2020. Toutefois, celles-ci n'ont pas été effectuées à cause de l'épidémie de COVID-19. Ainsi, seuls les effets à court terme ont été observés pour le moment. Néanmoins, cette année, nous avons obtenu les autorisations pour récupérer les livrets d'évaluation de début CP. En effet, tous les élèves scolarisés au CP, en 2020-2021, ont été évalués par leurs enseignants. Ces évaluations nationales se sont tenues du lundi 14 septembre au vendredi 25 septembre 2020. Ces évaluations nous permettront d'observer les effets à plus long terme du dispositif.

4) L'application *AppLINOU* proposait des activités diverses et variées. Pour chaque période, l'enfant n'utilisait que 10 minutes chaque activité. Plusieurs méta-analyses ont démontré que les gains d'apprentissages n'apparaissent qu'après plusieurs sessions d'utilisation d'un même outil (Leroux et al., 2017). De même, la durée du programme peut également avoir un impact sur le gain d'apprentissage. Ainsi, une utilisation supérieure à 30 minutes par semaine aurait un effet plus important sur les gains d'apprentissages (Cheung &

Slavin, 2012, 2013). De plus, les activités présentées ciblaient de nombreuses compétences et les enfants devaient constamment s'adapter aux différentes activités. Les activités conçues avaient pour particularité d'offrir une progressivité au sein des items présentés à l'enfant et nécessitaient de mobiliser des ressources cognitives. Cependant, celles-ci n'étaient pas adaptatives dans le sens où les difficultés de l'enfant n'étaient pas prises en compte. L'enfant devait alors suivre un programme prédéfini qui ne correspondait pas forcément à ses besoins et difficultés réels.

6.3. Limites de l'étude

Concernant les limites générales de cette étude, nous pouvons en identifier plusieurs. Tout d'abord, nous pouvons nous intéresser au contenu même de l'application et des différentes activités présentées aux élèves. Bien que le contenu des items soit basé sur des données probantes et qu'il ait été conçu par une équipe pluridisciplinaire, celui-ci suit une progression unique. En effet, le même contenu est présenté dans le même ordre à l'ensemble des élèves : l'intervention telle qu'elle est proposée ne s'adapte donc pas aux besoins actuels des élèves. Les élèves les plus en difficultés ne progressent pas au même rythme que les autres, ce qui peut engendrer des difficultés supplémentaires lors de la réalisation des activités.

Ensuite, bien que nous nous soyons appuyés sur différents modèles théoriques lors de la co-conception de cette application (Hirsh-Pasek et al., 2015; Kucirkova, 2017), l'outil tel qu'il a été conçu peut également entraîner des difficultés d'utilisation. Effectivement, un travail réflexif autour des qualités pédagogiques de l'application a été engagé et a conduit à l'intégration de consignes verbales et de feedbacks. Cependant, lors de la conception technique de l'outil, certaines fonctionnalités initialement envisagées n'ont pas pu être intégrées. Ainsi, certains feedbacks apportant des compléments d'informations ont été supprimés ou leur structure a été modifiée.

Enfin, certaines limites sont également attribuables à l'implémentation du dispositif au sein des classes. Tout d'abord, certains bugs et difficultés techniques ont été rencontrés dans les écoles. Ceux-ci pouvaient provenir d'une connexion internet trop faible ou instable, de l'utilisation même des tablettes ou de l'application *AppLINOU*. Ces difficultés techniques ont ainsi perturbé l'organisation des enseignants du groupe expérimental et causé un stress supplémentaire. De plus, les enseignants étaient également invités à effectuer régulièrement des manipulations techniques des tablettes afin de faire parvenir les résultats des élèves jusqu'aux

serveurs de stockage. Ce transfert important de données nécessitait une implication supplémentaire de la part des enseignants car celui-ci était généralement réalisés en dehors des horaires d'enseignement.

Le protocole initial contenait une évaluation des compétences en littératie et en numératie des élèves de grande section. Cependant, ces données n'ont pas pu être récoltées, ce qui constitue une limite importante de notre travail. En effet, cette évaluation nous aurait permis d'une part d'évaluer l'efficacité du dispositif sur une période plus importante et d'autre part, nous aurions également pu observer les liens à long terme entre littératie et numératie émergente. De plus, des observations des pratiques enseignantes à l'aide de l'outil CLASS-PREK (Pianta et al., 2008) avaient débutées avant le confinement. Cependant, celles-ci n'ont pas été réalisées dans l'ensemble des classes de notre échantillon et principalement dans les classes de notre groupe contrôle. Avec ces données, nous aurions eu la possibilité de comparer les pratiques enseignantes entre le groupe expérimental et le groupe contrôle.

Conclusion et perspectives

7.1. Les outils d'évaluation

Sur le plan scientifique

D'un point de vue scientifique, le développement de cet outil d'évaluation permet de combler un manque constaté au sein du contexte français et plus largement du contexte francophone. En effet, certaines mesures existent en français (*e.g.* Khomsi, 2001; Lecocq, 1998; Van Nieuwenhoven et al., 2001), cependant aucune d'entre elles ne permet d'obtenir une mesure globale de l'ensemble des compétences en littératie et en numératie émergentes. Notre outil d'évaluation contient deux tests, l'un mesurant la littératie émergente et l'autre la numératie émergente, qui peuvent être utilisés séparément ou conjointement. De plus, cet outil permet également de confronter les résultats des recherches françaises aux résultats internationaux. En effet, de nombreuses études s'intéressent au développement de ces compétences chez des enfants d'âge préscolaire (*e.g.* Hume et al., 2016; Iyer et al., 2019; Litkowski et al., 2020; Mendive et al., 2020; Purpura et al., 2013). Ainsi, cet outil nous permettra de comparer les similitudes et les différences développementales entre la France et les autres pays. Assurément, la langue française présente quelques singularités : le français est une langue inconsistante avec de multiples correspondances grapho-phonémiques (*e.g.* Ziegler, 2018). De plus, les mots de nombres en français présentent de nombreuses irrégularités dans leur structure (*e.g.* LeFevre et al., 2018). Enfin, cet outil permettra également de pouvoir examiner les liens entre la littératie et la numératie émergentes et les caractéristiques de l'enfant (*e.g.* SES, sexe, âge).

Plusieurs perspectives s'offrent à nous concernant cet outil d'évaluation. Tout d'abord, nous allons continuer de développer l'application *LINUMEN Evaluation* en intégrant des dimensions non évaluées comme la conscience morphologique, l'écriture ou la sériation. Dans un second temps, l'outil sera transformé afin d'obtenir un test standardisé et un étalonnage des scores. Enfin, à terme l'application d'évaluation intégrera un calcul automatique des scores et produira des profils d'élèves avec des recommandations adaptées aux besoins de ceux-ci.

Sur le plan pratique

Cet outil d'évaluation présente également un certain nombre d'applications pratiques dans le cadre de l'enseignement. Tout d'abord, il pourra être utilisé comme un outil d'évaluation normative permettant de situer les compétences d'un enfant par rapport à son groupe d'âge.

Étant donné la rapidité avec laquelle les compétences des enfants d'âge préscolaire se développent, *LINUMEN Evaluation* pourra également être utilisé pour suivre les progrès des élèves dans une ou plusieurs compétences. Comme dans le cadre du projet LINUMEN, cet outil d'évaluation pourra être utilisé pour évaluer l'efficacité d'une intervention. De plus, cela pourrait permettre de guider le rythme et le contenu d'un programme d'enseignement et de s'assurer que l'enseignement est dispensé en fonction des besoins de chaque élève (*e.g.* Lonigan et al., 2013). Enfin, comme nous l'avons souligné, les compétences émergentes de l'enfant sont prédictives de ses compétences futures. Ainsi, cet outil pourra être utilisé pour identifier et répondre aux difficultés rencontrées par les élèves.

7.2. L'intervention

Notre étude constitue l'une des premières recherches en France visant à tester l'efficacité d'une intervention éducative sur les apprentissages des enfants âgés de 4 à 5 ans par l'intermédiaire d'une application éducative. Peu d'études ont développé des interventions portant sur les deux domaines. Pour cela, nous avons donc adopté un protocole quasi-expérimental comparant un groupe expérimental utilisant l'application à un groupe contrôle. Afin de tester l'efficacité du dispositif, nous avons été attentifs aux qualités psychométriques des mesures effectuées et à la fidélité de l'implémentation de l'intervention. Par ailleurs, nous avons eu recours à des analyses de régression multiniveaux indispensables dans ce type de recherche. Ces analyses seront prochainement complétées par l'intermédiaire des évaluations nationales de CP. En effet, celles-ci nous permettront d'observer l'effet à plus long terme de l'intervention sur les compétences émergentes des élèves.

Cette première version de l'application *AppLINOU*, nous a permis de recueillir une multitude de données au moyen des traces (*Learnings Analytics*). Ces données nous permettront de faire émerger les difficultés rencontrées par les élèves lors de l'utilisation de l'application. Ainsi, le travail réflexif du groupe de co-conception se poursuit pour élaborer une seconde version d'*AppLINOU* à la lumière de ces résultats. Afin d'améliorer cette intervention, la personnalisation du contenu selon les résultats obtenus par l'élève à l'évaluation serait pertinente pour une utilisation optimale en classe. De même, les traces recueillies renvoient plus spécifiquement au temps passé par l'élève sur l'application ainsi qu'aux réponses sélectionnées. Ces éléments nous permettront d'observer si les qualités pédagogiques présentes dans l'application et si l'utilisation de celle-ci par l'enfant ont permis aux élèves de progresser

davantage durant l'année de grande section. Cependant, les conditions sanitaires de l'année 2020 restreindront nos analyses. Nous devons donc rester prudents vis-à-vis de ces résultats.

Enfin, nous pourrions également concevoir un dispositif expérimental même si cela semble très compliqué dans la recherche en éducation. En effet, les programmes ou dispositifs éducatifs, implémentés en contexte écologique, subissent les contraintes de la classe. De plus, de nombreux facteurs peuvent moduler l'efficacité de ces usages numériques éducatifs, comme l'outil utilisé ou encore le domaine travaillé (*e.g.* Higgins et al., 2012; Sung et al., 2016).

Dans les prochains mois, nous tenterons également de répondre à la question suivante : l'utilisation à long terme de l'application a-t-elle été bénéfique pour les élèves du groupe expérimental ? Grâce aux évaluations nationales de CP et aux traces laissées par les élèves sur l'application *AppLINOU*, nous espérons obtenir des éléments de réponse à cette interrogation. En effet, les évaluations nationales nous permettront d'obtenir un score des compétences en littératie et en numératie de l'élève en début de CP et donc de comparer leurs progrès selon le groupe dans lequel ils se trouvaient.

7.3. Liens entre littératie et numératie émergentes

Nous nous sommes également intéressés aux liens entre la numératie et la littératie émergentes. De nombreuses études ont montré que les compétences en littératie et en numératie émergentes étaient liées et prédictives des compétences ultérieures de l'enfant (*e.g.* Purpura & Napoli, 2015). Cependant, il ne suffit pas de montrer l'importance des compétences émergentes pour expliquer les trajectoires développementales des enfants (*e.g.* Sarama & Clements, 2009). Sarama et Clements (2009) ont, plus précisément, développé la notion de trajectoires développementales d'apprentissages. Celles-ci suivent un parcours organisé en un ensemble de tâches pédagogiques conçues pour développer les processus mentaux ou les actions supposées faire progresser les enfants par la réalisation d'objectifs spécifiques (Clements et al., 2011; Clements & Sarama, 2004). Les trajectoires d'apprentissages peuvent être destinées à développer les connaissances des enseignants concernant les progressions des élèves dans les différentes compétences (Clements et al., 2011). Dans des recherches futures, il serait également intéressant de voir l'effet de différentes variables sur le développement des compétences en littératie et en numératie émergentes.

Les recherches réalisées dans le contexte écologique de la classe sont moins nombreuses que celles menées en laboratoire. En effet, la classe est un environnement riche et soumis à de nombreuses contraintes physiques, temporelles et humaines. De ce fait, les résultats des études de type écologique sont beaucoup plus mitigés. Afin de développer des outils numériques utiles et utilisables en classe, il est nécessaire de s'appuyer sur des données probantes. Pour cela, l'implémentation de ces outils numériques au sein des classes doit être analysée. De nombreux travaux se sont intéressés aux réussites et aux échecs d'implémentations de dispositifs numériques au sein des classes (*e.g.* Fixsen et al., 2005; Nilsen, 2015). Ryan Jackson et al. (2018) soulignent également l'importance des cycles d'amélioration de ces outils. En effet, lors de l'implémentation de nouveaux outils au sein de la classe, certaines difficultés apparaissent. Celles-ci entraînent des améliorations et devraient être incluses dans le cycle itératif de développement de l'outil numérique. Dans le cadre du projet LINUMEN, les résultats de notre étude sont encourageants et fournissent des pistes d'amélioration. En s'appuyant sur ces premiers résultats, le développement itératif de l'application *AppLIOU* devrait donc se prolonger dans les prochains mois.

Bibliographie

- Adams, M. (1990). *Beginning to Read: Thinking and learning about print*. MIT press.
https://books.google.com/books/about/Beginning_to_Read.html?id=P_Hk7-n8i1AC
- Aladé, F., Lauricella, A. R., Beaudoin-Ryan, L., & Wartella, E. (2016). Measuring with Murray: Touchscreen technology and preschoolers' STEM learning. *Computers in Human Behavior*, *62*, 433-441. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2016.03.080>
- Anders, Y., Rossbach, H.-G., Weinert, S., Ebert, S., Kuger, S., Lehl, S., & von Maurice, J. (2012). Home and preschool learning environments and their relations to the development of early numeracy skills. *Early Childhood Research Quarterly*, *27*(2), 231-244. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2011.08.003>
- Anobile, G., Arrighi, R., Castaldi, E., Grassi, E., Pedonese, L., Moscoso, P. A. M., & Burr, D. C. (2018). Spatial but not temporal numerosity thresholds correlate with formal math skills in children. *Developmental Psychology*, *54*(3), 458-473. <https://doi.org/10.1037/dev0000448>
- Antell, S. E., & Keating, D. P. (2020). *Perception of Numerical Invariance in Neonates*. 8.
- Anthony, J. L., & Lonigan, C. J. (2004). The Nature of Phonological Awareness: Converging Evidence From Four Studies of Preschool and Early Grade School Children. *Journal of Educational Psychology*, *96*(1), 43-55. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.96.1.43>
- Anthony, J. L., Lonigan, C. J., Driscoll, K., & Phillips, B. M. (2003). Phonological sensitivity: A quasi-parallel progression of word structure unit... *Reading Research Quarterly*, *38*(4), 470-487.
- Anthony, J. L., Williams, J. M., McDonald, R., & Francis, D. J. (2007a). Phonological processing and emergent literacy in younger and older preschool children. *Annals of Dyslexia*, *57*(2), 113-137. <https://doi.org/10.1007/s11881-007-0008-8>
- Anthony, J. L., Williams, J. M., McDonald, R., & Francis, D. J. (2007b). Phonological processing and emergent literacy in younger and older preschool children. *Annals of Dyslexia*, *57*(2), 113-137. <https://doi.org/10.1007/s11881-007-0008-8>
- Aragón, E., Navarro, J. I., Aguilar, M., Cerda, G., & García-Sedeño, M. (2016). Predictive model for early math skills based on structural equations. *Scandinavian Journal of Psychology*, *57*(6), 489-494. <https://doi.org/10.1111/sjop.12317>
- Aslin, R. N., Saffran, J. R., & Newport, E. L. (1998). Computation of Conditional Probability Statistics by 8-Month-Old Infants. *Psychological Science*, *9*(4), 321-324. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00063>

- Aubrey, C., Godfrey, R., & Dahl, S. (2006). Early mathematics development and later achievement: Further evidence. *Mathematics Education Research Journal*, 18(1), 27-46. <https://doi.org/10.1007/BF03217428>
- Aunio, P., Aubrey, C., Godfrey, R., Pan, Y., & Liu, Y. (2008). Children's early numeracy in England, Finland and People's Republic of China. *International Journal of Early Years Education*, 16(3), 203-221. <https://doi.org/10.1080/09669760802343881>
- Aunio, P., & Niemivirta, M. (2010). Predicting children's mathematical performance in grade one by early numeracy. *Learning and Individual Differences*, 20(5), 427-435. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2010.06.003>
- Aunio, P., & Räsänen, P. (2016). Core numerical skills for learning mathematics in children aged five to eight years – a working model for educators. *European Early Childhood Education Research Journal*, 24(5), 684-704. <https://doi.org/10.1080/1350293X.2014.996424>
- Aunola, K., Leskinen, E., Lerkkanen, M.-K., & Nurmi, J.-E. (2004). Developmental Dynamics of Math Performance From Preschool to Grade 2. *Journal of Educational Psychology*, 96(4), 699-713. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.96.4.699>
- Baddeley, A., & Salame, P. (1986). The Unattended Speech Effect: Perception or Memory? *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory and Cognition*, 12(4), 525-529.
- Bara, F., Gentaz, É., & Colé, P. (2008). Littératie précoce et apprentissage de la lecture : Comparaison entre des enfants à risque, scolarisés en France dans des réseaux d'éducation prioritaire, et des enfants de classes régulières. *Revue des sciences de l'éducation*, 34(1), 27. <https://doi.org/10.7202/018988ar>
- Bassano, D. (2005). Production naturelle précoce et acquisition du langage : L'exemple du développement des noms. *Lidil*, 31, 61-84. <https://doi.org/10.4000/lidil.136>
- Bassano, D. (2007). Emergence et développement du langage : Enjeux et apports des nouvelles approches fonctionnalistes. In *L'acquisition du langage et ses troubles* (p. 13-46). Solal.
- Bassano, D., Labrell, F., & Bonnet, P. (2020). Le Développement du langage de production en français (DLPF) entre 18 et 42 mois : Une synthèse. *Enfance*, 2(2), 151. <https://doi.org/10.3917/enf2.202.0151>
- Beck, I. L., McKeown, M. G., & Kucan, L. (2005). Choosing words to teach. In *Teaching and learning vocabulary: Bringing research to practice*. (p. 209-222).

- Below, J. L., Skinner, C. H., Fearing, J. Y., & Sorrell, C. A. (2010). Gender Differences in Early Literacy: Analysis of Kindergarten through Fifth-Grade Dynamic Indicators of Basic Early Literacy Skills Probes. *School Psychology Review, 39*(2), 240-257.
- Beltrán-Navarro, B., Abreu-Mendoza, R. A., Matute, E., & Rosselli, M. (2018). Development of early numerical abilities of Spanish-speaking Mexican preschoolers: A new assessment tool. *Applied Neuropsychology: Child, 7*(2), 117-128. <https://doi.org/10.1080/21622965.2016.1266940>
- Benoit, L., Lehalle, H., & Jouen, F. (2004). Do young children acquire number words through subitizing or counting? *Cognitive Development, 19*(3), 291-307. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2004.03.005>
- Benoit, L., Lehalle, H., Molina, M., Tijus, C., & Jouen, F. (2013). Young children's mapping between arrays, number words, and digits. *Cognition, 129*(1), 95-101. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.06.005>
- Berger, M. (2005). Vygotsky's Theory of Concept Formation and Mathematics Education. In H. L. Chick & J. L. Vincent (Éds.), *Proceedings of the 29th Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education* (Vol. 2, p. 153-160). PME.
- Betts, J., Pickart, M., & Heistad, D. (2009). Construct and Predictive Validity Evidence for Curriculum-Based Measures of Early Literacy and Numeracy Skills in Kindergarten. *Journal of Psychoeducational Assessment, 27*(2), 83-95. <https://doi.org/10.1177/0734282908323398>
- Betts, J., Pickart, M., & Heistad, D. (2011). Investigating early literacy and numeracy: Exploring the utility of the bifactor model. *School Psychology Quarterly, 26*(2), 97-107. <https://doi.org/10.1037/a0022987>
- Bianco, M., Bressoux, P., Doyen, A.-L., Lambert, E., Lima, L., Pellenq, C., & Zorman, M. (2010). Early Training in Oral Comprehension and Phonological Skills: Results of a Three-Year Longitudinal Study. *Scientific Studies of Reading, 14*(3), 211-246. <https://doi.org/10.1080/10888430903117518>
- Biot-Chevrier, C., Ecalle, J., & Magnan, A. (2008). Pourquoi la connaissance du nom des lettres est-elle si importante dans l'apprentissage de la langue écrite ? *Revue française de pédagogie, 162*, 15-27. <https://doi.org/10.4000/rfp.741>
- Blair, C., & Razza, R. P. (2007). Relating Effortful Control, Executive Function, and False Belief Understanding to Emerging Math and Literacy Ability in Kindergarten. *Child Development, 78*(2), 647-663. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.01019.x>

- Blair, R., & Savage, R. (2006). Name writing but not environmental print recognition is related to letter-sound knowledge and phonological awareness in pre-readers. *Reading and Writing, 19*(9), 991-1016. <https://doi.org/10.1007/s11145-006-9027-9>
- Bleses, D., Makransky, G., Dale, P. S., Højen, A., & Ari, B. A. (2016). Early productive vocabulary predicts academic achievement 10 years later. *Applied Psycholinguistics, 37*(6), 1461-1476. <https://doi.org/10.1017/S0142716416000060>
- Boehm, A. E. (2009). *Boehm 3 maternelle : Test des concepts de base de Boehm*.
- Bonny, J. W., & Lourenco, S. F. (2013). The approximate number system and its relation to early math achievement: Evidence from the preschool years. *Journal of Experimental Child Psychology, 114*(3), 375-388. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2012.09.015>
- Bornstein, M. H., Hahn, C.-S., Putnick, D. L., & Suwalsky, J. T. D. (2014). Stability of Core Language Skill from Early Childhood to Adolescence: A Latent Variable Approach. *Child Development, 85*(4), 1346-1356. <https://doi.org/10.1111/cdev.12192>
- Bosse, M.-L., & Zagar, D. (2015). La conscience phonémique en maternelle : Etat des connaissances et Proposition d'évolution des pratiques pédagogiques actuelles. *Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'enfant, 139*, 573-582.
- Bowey, J. A. (1995). Socioeconomic Status Differences in Preschool Phonological Sensitivity and First-Grade Reading Achievement. *Journal of Educational Psychology, 87*(3), 476-487. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.87.3.476>
- Brannon, E. M., Lutz, D., & Cordes, S. (2006). The development of area discrimination and its implications for number representation in infancy. *Developmental Science, 9*(6), F59-F64. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2006.00530.x>
- Bremner, J. G., Slater, A. M., Hayes, R. A., Mason, U. C., Murphy, C., Spring, J., Draper, L., Gaskell, D., & Johnson, S. P. (2017). Young infants' visual fixation patterns in addition and subtraction tasks support an object tracking account. *Journal of Experimental Child Psychology, 162*, 199-208. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.05.007>
- Bressoux, P. (2020). Using multilevel models is not just a matter of statistical adjustment. Illustrations in the educational field. *L'Année Psychologique, 120*(1), 5. <https://doi.org/10.3917/anpsy1.201.0005>
- Briars, D., & Siegler, R. S. (1984). A featural analysis of preschoolers' counting knowledge. *Developmental Psychology, 20*(4), 607-618. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.20.4.607>

- Briquet-Duhazé, S., & Rezrazi, A. (2014). Résultat d'un entraînement en conscience phonologique chez des élèves en difficultés de lecture au cycle 3. *Enfance*, 2014(02), 119-134. <https://doi.org/10.4074/S0013754514002018>
- Brissiaud, R. (2011). *Comment les enfants apprennent à calculer*. Retz.
- Bruner, J. (2015). *Le développement de l'enfant : Savoir-faire, savoir dire*. Presses universitaires de France.
- Burgess, S. R., Hecht, S. A., & Lonigan, C. J. (2002). Relations of the home literacy environment (HLE) to the development of reading-related abilities: A one-year longitudinal study. *Reading Research Quarterly*, 37(4), 408-426. <https://doi.org/10.1598/RRQ.37.4.4>
- Burr, D. C., Turi, M., & Anobile, G. (2010). Subitizing but not estimation of numerosity requires attentional resources. *Journal of Vision*, 10(6), 20-20. <https://doi.org/10.1167/10.6.20>
- Cain, K., Oakhill, J., & Bryant, P. (2004). Children's Reading Comprehension Ability: Concurrent Prediction by Working Memory, Verbal Ability, and Component Skills. *Journal of Educational Psychology*, 96(1), 31-42. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.96.1.31>
- California Department of Education (Éd.). (2008). *California preschool learning foundations: I. California Department of Education*. <https://www.cde.ca.gov/sp/cd/re/documents/preschoollf.pdf>
- Caravolas, M., Lervåg, A., Mousikou, P., Efrim, C., Litavský, M., Onochie-Quintanilla, E., Salas, N., Schöffelová, M., Defior, S., Mikulajová, M., Seidlová-Málková, G., & Hulme, C. (2012). Common Patterns of Prediction of Literacy Development in Different Alphabetic Orthographies. *Psychological Science*, 23(6), 678-686. <https://doi.org/10.1177/0956797611434536>
- Caravolas, M., Volín, J., & Hulme, C. (2005). Phoneme awareness is a key component of alphabetic literacy skills in consistent and inconsistent orthographies: Evidence from Czech and English children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 92(2), 107-139. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2005.04.003>
- Cardoso-Martins, C., Mesquita, T. C. L., & Ehri, L. (2011). Letter names and phonological awareness help children to learn letter-sound relations. *Journal of Experimental Child Psychology*, 109(1), 25-38. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.12.006>
- Carlisle, J. F. (1995). Morphological awareness and early reading achievement. In L. B. Feldman (Éd.), *Morphological aspects of language processing* (p. 185-210).

- Carr, R. C., Bratsch-Hines, M., Varghese, C., & Vernon-Feagans, L. (2020). Latent class growth trajectories of letter name knowledge during pre-kindergarten and kindergarten. *Journal of Applied Developmental Psychology, 69*, 101141. <https://doi.org/10.1016/j.appdev.2020.101141>
- Carroll, J. M., Holliman, A. J., Weir, F., & Baroody, A. E. (2019). Literacy interest, home literacy environment and emergent literacy skills in preschoolers: Preschool Literacy Interest and Emergent Literacy. *Journal of Research in Reading, 42*(1), 150-161. <https://doi.org/10.1111/1467-9817.12255>
- Carroll, J. M., Snowling, M. J., Stevenson, J., & Hulme, C. (2003). The development of phonological awareness in preschool children. *Developmental Psychology, 39*(5), 913-923. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.39.5.913>
- Carson, K., Boustead, T., & Gillon, G. (2015). Content validity to support the use of a computer-based phonological awareness screening and monitoring assessment (COMPASMA) in the classroom. *International Journal of Speech-Language Pathology, 17*(5), 500-510. <https://doi.org/10.3109/17549507.2015.1016107>
- Carson, K., Gillon, G., & Boustead, T. (2011). Computer-Administrated Versus Paper-Based Assessment of School-Entry Phonological Awareness Ability. *Asia Pacific Journal of Speech, Language and Hearing, 14*(2), 85-101. <https://doi.org/10.1179/136132811805334876>
- Carson, K. L. (2017). Reliability and Predictive Validity of Preschool Web-Based Phonological Awareness Assessment for Identifying School-Aged Reading Difficulty. *Communication Disorders Quarterly, 39*(1), 259-269. <https://doi.org/10.1177/1525740116686166>
- Castles, A., & Coltheart, M. (2004). Is there a causal link from phonological awareness to success in learning to read? *Cognition, 91*(1), 77-111. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(03\)00164-1](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(03)00164-1)
- Catts, H. W., Fey, M. E., Zhang, X., & Tomblin, J. B. (2001). Estimating the Risk of Future Reading Difficulties in Kindergarten Children: A Research-Based Model and Its Clinical Implementation. *Language, Speech, and Hearing Services in Schools, 32*(1), 38-50. [https://doi.org/10.1044/0161-1461\(2001/004\)](https://doi.org/10.1044/0161-1461(2001/004))
- Catts, H. W., Herrera, S., Nielsen, D. C., & Bridges, M. S. (2015). Early prediction of reading comprehension within the simple view framework. *Reading and Writing, 28*(9), 1407-1425. <https://doi.org/10.1007/s11145-015-9576-x>

- Chan, W. W. L. (2014). Understanding and processing numbers among Chinese children. *Psychology & Neuroscience*, 7(4), 583-591. <https://doi.org/10.3922/j.psns.2014.4.18>
- Chard, D. J., Clarke, B., Baker, S., Otterstedt, J., Braun, D., & Katz, R. (2005). Using Measures of Number Sense to Screen for Difficulties in Mathematics: Preliminary Findings. *Assessment for Effective Intervention*, 30(2), 3-14. <https://doi.org/10.1177/073724770503000202>
- Cheung, A. C. K., & Slavin, R. E. (2012). How features of educational technology applications affect student reading outcomes: A meta-analysis. *Educational Research Review*, 7(3), 198-215. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2012.05.002>
- Cheung, A. C. K., & Slavin, R. E. (2013). The effectiveness of educational technology applications for enhancing mathematics achievement in K-12 classrooms: A meta-analysis. *Educational Research Review*, 9, 88-113. <https://doi.org/10.1016/j.edurev.2013.01.001>
- Chevalier, N. (2010). Les fonctions exécutives chez l'enfant : Concepts et développement. *Canadian Psychology/Psychologie canadienne*, 51(3), 149-163. <https://doi.org/10.1037/a0020031>
- Chomsky, N. (1979). *The logical structure of linguistic theory*.
- Christodoulou, J., Lac, A., & Moore, D. S. (2017). Babies and math: A meta-analysis of infants' simple arithmetic competence. *Developmental Psychology*, 53(8), 1405-1417. <https://doi.org/10.1037/dev0000330>
- Chu, F. W., vanMarle, K., & Geary, D. C. (2015). Early numerical foundations of young children's mathematical development. *Journal of Experimental Child Psychology*, 132, 205-212. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.01.006>
- Chu, F. W., vanMarle, K., & Geary, D. C. (2016). Predicting Children's Reading and Mathematics Achievement from Early Quantitative Knowledge and Domain-General Cognitive Abilities. *Frontiers in Psychology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00775>
- Cirino, P. T. (2011). The interrelationships of mathematical precursors in kindergarten. *Journal of Experimental Child Psychology*, 108(4), 713-733. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2010.11.004>
- Claessens, A., Duncan, G., & Engel, M. (2009). Kindergarten skills and fifth-grade achievement: Evidence from the ECLS-K. *Economics of Education Review*, 28(4), 415-427. <https://doi.org/10.1016/j.econedurev.2008.09.003>

- Claessens, A., & Engel, M. (2013). How Important Is Where You Start? Early Mathematics Knowledge and Later School Success. *Teachers College Record*, 29.
- Claessens, A., Engel, M., & Curran, F. C. (2014). Academic Content, Student Learning, and the Persistence of Preschool Effects. *American Educational Research Journal*, 51(2), 403-434. <https://doi.org/10.3102/0002831213513634>
- Clarke, B., & Shinn, M. R. (2004). A Preliminary Investigation Into the Identification and Development of Early Mathematics Curriculum-. *School Psychology Review*, 33(2), 234-248. <https://doi.org/10.1080/02796015.2004.12086245>
- Clay, M. (1966). *Emergent reading behaviour*. University of Auckland.
- Clements, D. H., & Sarama, J. (2004). Learning Trajectories in Mathematics Education. *Mathematical Thinking and Learning*, 6(2), 81-89. https://doi.org/10.1207/s15327833mtl0602_1
- Clements, D. H., & Sarama, J. (2007). Effects of a Preschool Mathematics Curriculum: Summative Research on the Building Blocks Project. *Journal for Research in Mathematics Education*, 38(2), 136-163.
- Clements, D. H., & Sarama, J. (2014). *Learning and teaching early math: The learning trajectories approach*. Routledge.
- Clements, D. H., Sarama, J., Spitler, M. E., Lange, A. A., & Wolfe, C. B. (2011). Mathematics Learned by Young Children in an Intervention Based on Learning Trajectories: A Large-Scale Cluster Randomized Trial. *Journal for Research in Mathematics Education*, 42(2), 127-166. <https://doi.org/10.5951/jresmetheduc.42.2.0127>
- Condry, K. F., & Spelke, E. S. (2008). The development of language and abstract concepts: The case of natural number. *Journal of Experimental Psychology: General*, 137(1), 22-38. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.137.1.22>
- Cooper, D. H., Roth, F. P., Speece, D. L., & Schatschneider, C. (2002). The contribution of oral language skills to the development of phonological awareness. *Applied Psycholinguistics*, 23(3), 399-416. <https://doi.org/10.1017/S0142716402003053>
- Cormier, P. (2006). Connaissance du nom des lettres chez des enfants francophones de 4, 5 et 6 ans au Nouveau-Brunswick. *Education et francophonie*, 34(2), 5-27.
- Coyle, T. (2012). *Pro-PA Manual: Profil of phonological Awareness*. Smarty Ears. <http://www.smartyearsapps.com/pro-pa.pdf>
- Currie, N. K., & Cain, K. (2015). Children's inference generation: The role of vocabulary and working memory. *Journal of Experimental Child Psychology*, 137, 57-75. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.03.005>

- Davidse, N. J., De Jong, M. T., & Bus, A. G. (2014). Explaining common variance shared by early numeracy and literacy. *Reading and Writing*, 27(4), 631-648. <https://doi.org/10.1007/s11145-013-9465-0>
- Davidse, Neeltje J., de Jong, M. T., Bus, A. G., Huijbregts, S. C. J., & Swaab, H. (2011). Cognitive and environmental predictors of early literacy skills. *Reading and Writing*, 24(4), 395-412. <https://doi.org/10.1007/s11145-010-9233-3>
- De Jong, P. F., & van der Leij, A. (1999). Specific Contributions of Phonological Abilities to Early Reading Acquisition: Results From a Dutch Latent Variable Longitudinal Study. *Journal of Educational Psychology*, 91(3), 450-476.
- Deasley, S., Evans, M. A., Nowak, S., & Willoughby, D. (2018). Sex Differences in Emergent Literacy and Reading Behaviour in Junior Kindergarten. *Canadian Journal of School Psychology*, 33(1), 26-43. <https://doi.org/10.1177/0829573516645773>
- DeFlorio, L., & Beliakoff, A. (2015). Socioeconomic Status and Preschoolers' Mathematical Knowledge: The Contribution of Home Activities and Parent Beliefs. *Early Education and Development*, 26(3), 319-341. <https://doi.org/10.1080/10409289.2015.968239>
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44, 1-42.
- Dehaene S. (2007). *Les neurones de la lecture*. Paris : Odile Jacob.
- Dehaene, S. (2010). *La bosse des maths : Quinze ans après*. Odile Jacob.
- Dehaene, S. (2011). *The number sense: How the mind creates mathematics*. OUP USA.
- Dehaene, S., & Changeux, J.-P. (1993). Development of elementary numerical abilities: A neuronal model. *Journal of cognitive neuroscience*, 5(4), 390-407.
- Dehaene, S., & Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1(1), 83-120.
- Dehaene, S., Cohen, L., Morais, J., & Kolinsky, R. (2015). Illiterate to literate: Behavioural and cerebral changes induced by reading acquisition. *Nature Reviews Neuroscience*, 16(4), 234-244. <https://doi.org/10.1038/nrn3924>
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20(3-6), 487-506. <https://doi.org/10.1080/02643290244000239>
- Dehaene-Lambertz, G. (2004). Bases cérébrales de l'acquisition du langage : Apport de la neuro-imagerie. *Neuropsychiatrie de l'Enfance et de l'Adolescence*, 52(7), 452-459. <https://doi.org/10.1016/j.neurenf.2004.09.003>

- Desrochers, A., Kirby, J. R., Thompson, G. L., & Fréchette, S. (2009). Le rôle de la conscience phonologique dans l'apprentissage de la lecture. *Revue du Nouvel-Ontario*, 34, 59. <https://doi.org/10.7202/038720ar>
- Desrochers, A., Manolitsis, G., Gaudreau, P., & Georgiou, G. (2018). Early contribution of morphological awareness to literacy skills across languages varying in orthographic consistency. *Reading and Writing*, 31(8), 1695-1719. <https://doi.org/10.1007/s11145-017-9772-y>
- Dickinson, D. K., McCabe, A., Anastasopoulos, L., Peisner-Feinberg, E. S., & Poe, M. D. (2003). The comprehensive language approach to early literacy: The interrelationships among vocabulary, phonological sensitivity, and print knowledge among preschool-aged children. *Journal of Educational Psychology*, 95(3), 465-481. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.95.3.465>
- Dollaghan, C. A., Campbell, T. F., Paradise, J. L., Feldman, H. M., Janosky, J. E., Pitcairn, D. N., & Kurs-Lasky, M. (1999). Maternal Education and Measures of Early Speech and Language. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 42(6), 1432-1443. <https://doi.org/10.1044/jslhr.4206.1432>
- Downer, J. T., & Pianta, R. C. (2006). Academic and Cognitive Functioning in First Grade: Associations with Earlier Home and Child Care Predictors and with Concurrent Home and Classroom Experiences. *School Psychology Review*, 35(1), 21.
- Duff, F. J., Reen, G., Plunkett, K., & Nation, K. (2015). Do infant vocabulary skills predict school-age language and literacy outcomes? *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 56(8), 848-856. <https://doi.org/10.1111/jcpp.12378>
- Dulay, K. M., Cheung, S. K., & McBride, C. (2018). Environmental correlates of early language and literacy in low- to middle-income Filipino families. *Contemporary Educational Psychology*, 53, 45-56. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2018.02.002>
- Duncan, G. J., Dowsett, C. J., Claessens, A., Magnuson, K., Huston, A. C., Klebanov, P., Pagani, L. S., Feinstein, L., Engel, M., Brooks-Gunn, J., Sexton, H., & Duckworth, K. (2007). School Readiness and Later Achievement. *Developmental Psychology*, 43(6), 1428-1446.
- Dunn, L. M., & Dunn, D. M. (2007). Peabody picture vocabulary test 4th edition. *Bloomington: NCS Pearson*.
- Durand, M., Hulme, C., Larkin, R., & Snowling, M. (2005). The cognitive foundations of reading and arithmetic skills in 7- to 10-year-olds. *Journal of Experimental Child Psychology*, 91(2), 113-136. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2005.01.003>

- Ecalte, J. (2004). Les connaissances des lettres et l'écriture du prénom chez l'enfant français avant l'enseignement formel de la lecture-écriture. *Canadian psychology*, 45(1), 111-119.
- Ecalte, J., Biot-Chevrier, C., & Magnan, A. (2008). Alphabet knowledge and early literacy skills in French beginning readers. *European Journal of Developmental Psychology*, 5(3), 303-325. <https://doi.org/10.1080/17405620600901714>
- Edwards, S., Letts, C., & Sinka, I. (2011). *The new Reynell developmental language scales*.
- Elliott, L., & Bachman, H. J. (2018). How Do Parents Foster Young Children's Math Skills? *Child Development Perspectives*, 12(1), 16-21. <https://doi.org/10.1111/cdep.12249>
- Epstein, A. S., Schweinhart, L. J., DeBruin-Parecki, A., & Robin, K. B. (2004). *A Guide to Developing a Balanced Approach*. 12.
- Evans, M. A., Bell, M., Shaw, D., Moretti, S., & Page, J. (2006). Letter names, letter sounds and phonological awareness: An examination of kindergarten children across letters and of letters across children. *Reading and Writing*, 19(9), 959-989. <https://doi.org/10.1007/s11145-006-9026-x>
- Evans, M. A., Moretti, S., Shaw, D., & Fox, M. (2003). Parent Scaffolding in Children's Oral Reading. *Early Education & Development*, 14(3), 363-388. https://doi.org/10.1207/s15566935eed1403_5
- Evans, M. A., & Shaw, D. (2008). Home grown for reading: Parental contributions to young children's emergent literacy and word recognition. *Canadian Psychology/Psychologie Canadienne*, 49(2), 89-95. <https://doi.org/10.1037/0708-5591.49.2.89>
- Fayol, M. (1991). Du nombre à son utilisation : La résolution de problèmes additifs. In J. Bideaud, C. Meljac, & J. C. Fischer (Éds.), *Les chemins du nombre* (Presses universitaires de Lille).
- Fayol, M. (2018). *L'acquisition du nombre: «Que sais-je?» n° 3941*. Que sais-je.
- Feigenson, L., Dehaene, S., & Spelke, E. (2004). Core systems of number. *Trends in Cognitive Sciences*, 8(7), 307-314. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2004.05.002>
- Feigenson, L., Libertus, M. E., & Halberda, J. (2013). Links Between the Intuitive Sense of Number and Formal Mathematics Ability. *Child Development Perspectives*, 7(2), 74-79. <https://doi.org/10.1111/cdep.12019>
- Fenson, L., Dale, P., Reznik, J. S., Thal, D., Bates, E., Hartung, J. P., Pethick, S. J., & Reilly, J. (1993). *MacArthur Communicative Development Inventories: User's guide and technical manual*. Singular Publishing Group.

- Fernald, A., Marchman, V. A., & Weisleder, A. (2013). SES differences in language processing skill and vocabulary are evident at 18 months. *Developmental Science*, *16*(2), 234-248. <https://doi.org/10.1111/desc.12019>
- Fischer, J.-P., & Bocerean, C. (2004). Les modèles du développement numérique à l'épreuve de l'observation. *Bulletin de psychologie*, *57*(470), 191-202.
- Fischer J.-P. & Luxembourger C. (2020). The battle between the correct and mirror writings of a digit in children's recognition memory. *Education Sciences*, *10*, 183. <https://doi.org/10.3390/educsci10070183>
- Fischer J.-P. & Tazouti Y. (2012). Unraveling the mystery of mirror writing in typically developing children. *Journal of Educational Psychology*, *104*(1), 193-205. <https://doi.org/10.1037/a0025735>
- Fischer J.-P. & Thierry X. (2020). Are differences between social classes reduced by non-symbolic numerical tasks? Evidence from the ELFE cohort. *British Journal of Educational Psychology*, e12363. <https://doi.org/10.1111/BJEP.12363>.
- Fischer, J.-P. (1981). Développement et fonctions du comptage chez l'enfant de 3 à 6 ans. *Recherches en Didactique des Mathématiques*, *2*(3), 277-302.
- Fixsen, D. L., Naoom, S. F., Blase, K. A., Friedman, R. M., Wallace, F., Burns, B., Carter, W., Paulson, R., Schoenwald, S., & Barwick, M. (2005). *Implementation research: A synthesis of the literature*. University of South Florida.
- Florin, A. (2016). *Le développement du langage*. Dunod.
- Florit, E., Roch, M., & Levorato, M. C. (2011). Listening Text Comprehension of Explicit and Implicit Information in Preschoolers : The Role of Verbal and Inferential Skills. *Discourse Processes*, *48*(2), 119-138. <https://doi.org/10.1080/0163853X.2010.494244>
- Foulin, J.-N. (2005). Why is letter-name knowledge such a good predictor of learning to read? *Reading and Writing*, *18*(2), 129-155. <https://doi.org/10.1007/s11145-004-5892-2>
- Foulin, J.-N. (2007). La connaissance des lettres chez les prélecteurs : Aspects pronostiques, fonctionnels et diagnostiques. *Psychologie Française*, *52*(4), 431-444. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2006.12.004>
- Foy, J. G., & Mann, V. (2006). Changes in letter sound knowledge are associated with development of phonological awareness in pre-school children. *Journal of Research in Reading*, *29*(2), 143-161. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9817.2006.00279.x>
- Frith, U. (1985). Beneath the surface of developmental dyslexia. In K. Patterson, J. Marschall, & M. Coltheart, *Surface dyslexia: Neuropsychological and cognitive studies of phonological reading* (p. 301-330). London: Lawrence Erlbaum.

- Furnes, B., & Samuelsson, S. (2011). Phonological awareness and rapid automatized naming predicting early development in reading and spelling: Results from a cross-linguistic longitudinal study. *Learning and Individual Differences, 21*(1), 85-95. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2010.10.005>
- Fuson, K. C., Richards, J., & Briars, D. J. (1982). The Acquisition and Elaboration of the Number Word Sequence. In C. J. Brainerd (Éd.), *Children's Logical and Mathematical Cognition* (p. 33-92). Springer New York. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9466-2_2
- Fyfe, E. R., Rittle-Johnson, B., & Farran, D. C. (2019). Predicting success on high-stakes math tests from preschool math measures among children from low-income homes. *Journal of Educational Psychology, 111*(3), 402-413. <https://doi.org/10.1037/edu0000298>
- Gabriel, A., & Poncelet, M. (2009). Validation d'une batterie de tests évaluant le niveau de conscience phonologique d'enfants d'âge préscolaire. *Glossa, 107*, 17-38.
- Gallistel, C. R., & Gelman, R. (1992). Preverbal and verbal counting and computation. *Cognition, 44*(1-2), 43-74.
- Garon-Carrier, G., Boivin, M., Lemelin, J.-P., Kovas, Y., Parent, S., Séguin, J. R., Vitaro, F., Tremblay, R. E., & Dionne, G. (2018). Early developmental trajectories of number knowledge and math achievement from 4 to 10 years: Low-persistent profile and early-life predictors. *Journal of School Psychology, 68*, 84-98. <https://doi.org/10.1016/j.jsp.2018.02.004>
- Gathercole, S. E., Service, E., Hitch, G. J., Adams, A.-M., & Martin, A. J. (1999). Phonological short-term memory and vocabulary development: Further evidence on the nature of the relationship. *Applied Cognitive Psychology, 13*(1), 65-77. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0720\(199902\)13:1<65::AID-ACP548>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0720(199902)13:1<65::AID-ACP548>3.0.CO;2-O)
- Geary, D. C. (2000). From infancy to adulthood: The development of numerical abilities. *European Child & Adolescent Psychiatry, 9*(S2), S11-S16. <https://doi.org/10.1007/s007870070004>
- Geary, D. C. (2011). Cognitive predictors of achievement growth in mathematics: A 5-year longitudinal study. *Developmental Psychology, 47*(6), 1539-1552. <https://doi.org/10.1037/a0025510>
- Geary, D. C., & vanMarle, K. (2016). Young children's core symbolic and nonsymbolic quantitative knowledge in the prediction of later mathematics achievement. *Developmental Psychology, 52*(12), 2130-2144. <https://doi.org/10.1037/dev0000214>

- Geary, D. C., & vanMarle, K. (2018). Growth of symbolic number knowledge accelerates after children understand cardinality. *Cognition*, *177*, 69-78. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2018.04.002>
- Geary, D. C., vanMarle, K., Chu, F. W., Rouder, J., Hoard, M. K., & Nugent, L. (2018). Early Conceptual Understanding of Cardinality Predicts Superior School-Entry Number-System Knowledge. *Psychological Science*, *29*(2), 191-205. <https://doi.org/10.1177/0956797617729817>
- Gelman, R., & Gallistel, C. (1978). *The Childs Understanding of Number*. Harvard University Press.
- Gelman, R., & Meck, E. (1983). Preschoolers' counting: Principles before skill. *Cognition*, *13*(3), 347-359.
- Gest, S. D., Freeman, N. R., Domitrovich, C. E., & Welsh, J. A. (2004). Shared book reading and children's language comprehension skills: The moderating role of parental discipline practices. *Early Childhood Research Quarterly*, *19*(2), 319-336. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2004.04.007>
- Ginsburg, H. (1975). Young children's informal knowledge of mathematics. *Journal of Children's Mathematical Behavior*, *1*(3), 63-156.
- Ginsburg, H. P., & Baroody, A. J. (2003). *TEMA-3: Test of Early Mathematics Ability—Third Edition*.
- Göbel, S. M., Watson, S. E., Lervåg, A., & Hulme, C. (2014). Children's Arithmetic Development: It Is Number Knowledge, Not the Approximate Number Sense, That Counts. *Psychological Science*, *25*(3), 789-798. <https://doi.org/10.1177/0956797613516471>
- Good, R., & Kaminski, R. (2002). *Dynamic Indicators of Basic Early Literacy Skills 6th Edition (DIBELS)*. Institute for the Development of Educational Achievement.
- Goodrich, J. M., & Lonigan, C. J. (2015). Lexical characteristics of words and phonological awareness skills of preschool children. *Applied Psycholinguistics*, *36*(6), 1509-1531. <https://doi.org/10.1017/S0142716414000526>
- Goos, M. (2004). Learning Mathematics in a Classroom Community of Inquiry. *Journal for Research in Mathematics Education*, *35*(4), 258. <https://doi.org/10.2307/30034810>
- Grøver, V., Rydland, V., Gustafsson, J.-E., & Snow, C. E. (2020). Shared Book Reading in Preschool Supports Bilingual Children's Second-Language Learning: A Cluster-Randomized Trial. *Child Development*, *n/a*(*n/a*). <https://doi.org/10.1111/cdev.13348>

- Halberda, J., & Feigenson, L. (2008). Developmental change in the acuity of the 'number sense': The approximate number system in 3-, 4-, 5-, and 6-year-olds and adults. *Developmental Psychology, 44*(5), 1457-1465. <https://doi.org/10.1037/a0012682>
- Hannagan, T., Amedi, A., Cohen, L., Dehaene-Lambertz, G., & Dehaene, S. (2015). Origins of the specialization for letters and numbers in ventral occipitotemporal cortex. *Trends in Cognitive Sciences, 19*(7), 374-382. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2015.05.006>
- Hart, B., & Risley, T. R. (1995). *Meaningful differences in the everyday experience of young American children*. Paul H Brookes Publishing.
- Hart, S. A., Petrill, S. A., Thompson, L. A., & Plomin, R. (2009). The ABCs of math: A genetic analysis of mathematics and its links with reading ability and general cognitive ability. *Journal of Educational Psychology, 101*(2), 388-402. <https://doi.org/10.1037/a0015115>
- Harvey, H. A., & Miller, G. E. (2017). Executive Function Skills, Early Mathematics, and Vocabulary in Head Start Preschool Children. *Early Education and Development, 28*(3), 290-307. <https://doi.org/10.1080/10409289.2016.1218728>
- Hecht, S. A., Torgesen, J. K., Wagner, R. K., & Rashotte, C. A. (2001). The Relations between Phonological Processing Abilities and Emerging Individual Differences in Mathematical Computation Skills: A Longitudinal Study from Second to Fifth Grades. *Journal of Experimental Child Psychology, 79*(2), 192-227. <https://doi.org/10.1006/jecp.2000.2586>
- Hespos, S. J., Dora, B., Rips, L. J., & Christie, S. (2012). Infants Make Quantity Discriminations for Substances: Quantity Discrimination for Substances. *Child Development, 83*(2), 554-567. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2011.01703.x>
- Higgins, S., Xiao, Z., & Katsipataki, M. (2012). *The impact of digital technology on learning: A summary for the education endowment foundation* (Education Endowment Foundation.).
- Hillairet de Boisferon, A., Colé, P., & Gentaz, E. (2010). Connaissance du nom et du son des lettres, habiletés métaphonémiques et capacités de décodage en grande section de maternelle. *Psychologie Française, 55*(2), 91-111. <https://doi.org/10.1016/j.psfr.2010.05.005>
- Hipfner-Boucher, K., Milburn, T., Weitzman, E., Greenberg, J., Pelletier, J., & Girolametto, L. (2014). Relationships between preschoolers' oral language and phonological awareness. *First Language, 34*(2), 178-197. <https://doi.org/10.1177/0142723714525945>
- Hirsh-Pasek, K., Zosh, J. M., Golinkoff, R. M., Gray, J. H., Robb, M. B., & Kaufman, J. (2015). Putting Education in "Educational" Apps: Lessons From the Science of Learning.

- Psychological Science in the Public Interest*, 16(1), 3-34.
<https://doi.org/10.1177/1529100615569721>
- Hjetland, H. N., Brinchmann, E. I., Scherer, R., Hulme, C., & Melby-Lervåg, M. (2020). Preschool pathways to reading comprehension: A systematic meta-analytic review. *Educational Research Review*, 30, 100323.
<https://doi.org/10.1016/j.edurev.2020.100323>
- Hoareau, L., Tazouti, Y., Dinet, J., Thomas, A., Luxembourger, C., Hubert, B., Fischer, J.-P., & Jarlégan, A. (2020). Co-Designing a New Educational Tablet App for Preschoolers. *Computers in the Schools*, 0(0), 1-19. <https://doi.org/10.1080/07380569.2020.1830253>
- Hoareau, L., Thomas, A., Tazouti, Y., Dinet, J., Luxembourger, C., & Jarlégan, A. (Soumis). Beliefs about Digital Technologies and Teachers' Acceptance of an Educational App for Preschoolers. *Computers and Education*.
- Hoff, E. (2003). The Specificity of Environmental Influence: Socioeconomic Status Affects Early Vocabulary Development Via Maternal Speech. *Child Development*, 74(5), 1368-1378. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00612>
- Hoff, E. (2006). How social contexts support and shape language development☆. *Developmental Review*, 26(1), 55-88. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2005.11.002>
- Hoff, E. (2013). Interpreting the early language trajectories of children from low-SES and language minority homes: Implications for closing achievement gaps. *Developmental Psychology*, 49(1), 4-14. <https://doi.org/10.1037/a0027238>
- Hoff, E., & Naigles, L. (2002). How Children Use Input to Acquire a Lexicon. *Child Development*, 73(2), 418-433. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00415>
- Hoff-Ginsberg, E. (1998). The relation of birth order and socioeconomic status to children's language experience and language development. *Applied Psycholinguistics*, 19(4), 603-629. <https://doi.org/10.1017/S0142716400010389>
- Hooper, S. R., Roberts, J., Sideris, J., Burchinal, M., & Zeisel, S. (2010). Longitudinal predictors of reading and math trajectories through middle school for African American versus Caucasian students across two samples. *Developmental Psychology*, 46(5), 1018-1029. <https://doi.org/10.1037/a0018877>
- Hornburg, C. B., Schmitt, S. A., & Purpura, D. J. (2018). Relations between preschoolers' mathematical language understanding and specific numeracy skills. *Journal of Experimental Child Psychology*, 176, 84-100.
<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2018.07.005>

- Hresko, W. P., Reid, D. K., & Hammill, D. D. (1999). *TELD-3: Test of early language development*. Pro-ed.
- Huang, F. L., & Invernizzi, M. A. (2012). The Association of Kindergarten Entry Age with Early Literacy Outcomes. *The Journal of Educational Research*, *105*(6), 431-441. <https://doi.org/10.1080/00220671.2012.658456>
- Huang, F. L., & Invernizzi, M. A. (2014). Factors associated with lowercase alphabet naming in kindergarteners. *Applied Psycholinguistics*, *35*(6), 943-968. <https://doi.org/10.1017/S0142716412000604>
- Huang, F. L., Tortorelli, L. S., & Invernizzi, M. A. (2014). An investigation of factors associated with letter-sound knowledge at kindergarten entry. *Early Childhood Research Quarterly*, *29*(2), 182-192. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2014.02.001>
- Hulme, C., Nash, H. M., Gooch, D., Lervåg, A., & Snowling, M. J. (2015). The Foundations of Literacy Development in Children at Familial Risk of Dyslexia. *Psychological Science*, *26*(12), 1877-1886. <https://doi.org/10.1177/0956797615603702>
- Hulme, C., Thomson, N., Muir, C., & Lawrence, A. (1984). Speech rate and the development of short-term memory span. *Journal of Experimental Child Psychology*, *38*(2), 241-253. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(84\)90124-3](https://doi.org/10.1016/0022-0965(84)90124-3)
- Hume, L. E., Allan, D. M., & Lonigan, C. J. (2016). Links between preschoolers' literacy interest, inattention, and emergent literacy skills. *Learning and Individual Differences*, *47*, 88-95. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2015.12.006>
- Hung, M. (2015). Talking Circles Promote Equitable Discourse. *The Mathematics Teacher*, *109*(4), 256. <https://doi.org/10.5951/mathteacher.109.4.0256>
- Hurst, M., Anderson, U., & Cordes, S. (2017). Mapping Among Number Words, Numerals, and Nonsymbolic Quantities in Preschoolers. *Journal of Cognition and Development*, *18*(1), 41-62. <https://doi.org/10.1080/15248372.2016.1228653>
- Huttenlocher, J., Waterfall, H., Vasilyeva, M., Vevea, J., & Hedges, L. V. (2010). Sources of variability in children's language growth. *Cognitive Psychology*, *61*(4), 343-365. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2010.08.002>
- Invernizzi, M., Sullivan, A., Meier, J., & Swank, L. (2004). Phonological awareness literacy screening—PreK. *Charlottesville, VA: University of Virginia*.
- Iyer, S., Do, D., Akshoomoff, N., Malcarne, V. L., Hattrup, K., Berger, S. P., Gahagan, S., & Needlman, R. (2019). Development of a Brief Screening Tool for Early Literacy Skills in Preschool Children. *Academic Pediatrics*, *19*(4), 464-470. <https://doi.org/10.1016/j.acap.2018.11.008>

- Izard, V., Sann, C., Spelke, E. S., & Streri, A. (2009). Newborn infants perceive abstract numbers. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *106*(25), 10382-10385. <https://doi.org/10.1073/pnas.0812142106>
- Jacquier-Roux, M., Lequette, C., Pouget, G., Valdois, S., & Zorman, M. (2010). *BALE: batterie analytique du langage écrit*. Groupe Cogni-Sciences, Laboratoire de Psychologie et NeuroCognition.
- Japel, C., Brodeur, M., Dion, É., Gosselin, C., Simmons, D., & Vuattoux, D. (2009). Comment faciliter le développement du vocabulaire chez les jeunes enfants à risque ? Une approche basée sur la recherche. In *Langage et littératie chez l'enfant en service de garde éducatif* (p. 37-53). Presses de l'université du Québec.
- Jiménez Lira, C., Carver, M., Douglas, H., & LeFevre, J.-A. (2017). The integration of symbolic and non-symbolic representations of exact quantity in preschool children. *Cognition*, *166*, 382-397. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2017.05.033>
- Jones, C. D., & Reutzel, D. R. (2012). Enhanced Alphabet Knowledge Instruction: Exploring a Change of Frequency, Focus, and Distributed Cycles of Review. *Reading Psychology*, *33*(5), 448-464. <https://doi.org/10.1080/02702711.2010.545260>
- Jordan, N. C., Glutting, J., Ramineni, C., & Watkins, M. W. (2010). Validating a Number Sense Screening Tool for Use in Kindergarten and First Grade: Prediction of Mathematics Proficiency in Third Grade. *School Psychology Review*, *39*(2), 16.
- Jordan, N. C., Kaplan, D., Locuniak, M. N., & Ramineni, C. (2007). Predicting First-Grade Math Achievement from Developmental Number Sense Trajectories. *Learning Disabilities Research & Practice*, *22*(1), 36-46. <https://doi.org/10.1111/j.1540-5826.2007.00229.x>
- Jordan, N. C., Kaplan, D., Nabors Olah, L., & Locuniak, M. N. (2006). Number Sense Growth in Kindergarten: A Longitudinal Investigation of Children at Risk for Mathematics Difficulties. *Child Development*, *77*(1), 153-175. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2006.00862.x>
- Jordan, N. C., Kaplan, D., Ramineni, C., & Locuniak, M. N. (2009). Early math matters: Kindergarten number competence and later mathematics outcomes. *Developmental Psychology*, *45*(3), 850-867. <https://doi.org/10.1037/a0014939>
- Justice, L. M., & Ezell, H. K. (2002). Use of Storybook Reading to Increase Print Awareness in At-Risk Children. *American Journal of Speech-Language Pathology*, *11*(1), 17-29. [https://doi.org/10.1044/1058-0360\(2002/003\)](https://doi.org/10.1044/1058-0360(2002/003))

- Justice, L. M., Invernizzi, M. A., & Meier, J. D. (2002). Designing and Implementing an Early Literacy Screening Protocol: Suggestions for the Speech-Language Pathologist. *Language, Speech, and Hearing Services in Schools, 33*, 84-101.
- Justice, L. M., Pence, K., Bowles, R. B., & Wiggins, A. (2006). An investigation of four hypotheses concerning the order by which 4-year-old children learn the alphabet letters. *Early Childhood Research Quarterly, 21*(3), 374-389. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2006.07.010>
- Kail, M. (2015). Des sons aux mots. In *L'acquisition du langage : Vol. 2e éd.* (p. 23-47). Presses Universitaires de France ; Cairn.info. <https://www.cairn.info/l-acquisition-du-langage-9782130635338-p-23.htm>
- Kaminski, R. A., Abbott, M., Bravo Aguayo, K., Latimer, R., & Good III, R. H. (2014). The preschool early literacy indicators: Validity and benchmark goals. *Topics in Early Childhood Special Education, 34*(2), 71-82.
- Karrass, J., & Braungart-Rieker, J. M. (2005). Effects of shared parent–infant book reading on early language acquisition. *Journal of Applied Developmental Psychology, 26*(2), 133-148. <https://doi.org/10.1016/j.appdev.2004.12.003>
- Kaufman, E. L., Lord, M. W., Reese, T. W., & Volkman, J. (1949). The Discrimination of Visual Number. *The American Journal of Psychology, 62*(4), 498. <https://doi.org/10.2307/1418556>
- Ke, F. (2008). A case study of computer gaming for math: Engaged learning from gameplay? *Computers & Education, 51*(4), 1609-1620. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2008.03.003>
- Kebritchi, M., Hirumi, A., & Bai, H. (2010). The effects of modern mathematics computer games on mathematics achievement and class motivation. *Computers & Education, 55*(2), 427-443. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2010.02.007>
- Kendeou, P., van den Broek, P., & White, M. J. (2007). Comprehension in Preschool and Early Elementary Children: Skill Development and Strategy Interventions. In D. S. McNamara (Éd.), *Reading comprehension strategies: Theories, interventions, and technologies* (p. 27-45). Lawrence Erlbaum Associates.
- Kendeou, P., van den Broek, P., White, M. J., & Lynch, J. S. (2009). Predicting reading comprehension in early elementary school: The independent contributions of oral language and decoding skills. *Journal of Educational Psychology, 101*(4), 765-778. <https://doi.org/10.1037/a0015956>

- Kern, S. (2007). Lexicon development in French-speaking infants. *First Language*, 27(3), 227-250. <https://doi.org/10.1177/0142723706075789>
- Kern, S., & Dos Santos, C. (2011). Input et Acquisition du lexique en français : Rôle de la fréquence et de la densité de voisinage. *Travaux de didactique du français langue étrangère*.
- Kersey, A. J., & Cantlon, J. F. (2017). Primitive Concepts of Number and the Developing Human Brain. *Language Learning and Development*, 13(2), 191-214. <https://doi.org/10.1080/15475441.2016.1264878>
- Khomsi, A. (2001). *ELO : évaluation du langage oral*. ECPA, les Éd. du Centre de psychologie appliquée.
- Kim, Y.-S., Otaiba, S. A., Puranik, C., Folsom, J. S., & Grulich, L. (2014). The contributions of vocabulary and letter writing automaticity to word reading and spelling for kindergartners. *Reading and Writing*, 27(2), 237-253. <https://doi.org/10.1007/s11145-013-9440-9>
- Kim, Y.-S., Petscher, Y., Foorman, B. R., & Zhou, C. (2010). The contributions of phonological awareness and letter-name knowledge to letter-sound acquisition—A cross-classified multilevel model approach. *Journal of Educational Psychology*, 102(2), 313-326. <https://doi.org/10.1037/a0018449>
- Kleemans, T., Peeters, M., Segers, E., & Verhoeven, L. (2012). Child and home predictors of early numeracy skills in kindergarten. *Early Childhood Research Quarterly*, 27(3), 471-477. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2011.12.004>
- Kleemans, T., Segers, E., & Verhoeven, L. (2011). Cognitive and linguistic precursors to numeracy in kindergarten: Evidence from first and second language learners. *Learning and Individual Differences*, 21(5), 555-561. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2011.07.008>
- Klein, A., & Starkey, P. (2006). Child math assessment. *Berkeley: University of California*.
- Kobayashi, T., Hiraki, K., & Hasegawa, T. (2005). Auditory–visual intermodal matching of small numerosities in 6-month-old infants. *Developmental Science*, 8(5), 409-419. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2005.00429.x>
- Koponen, T., Aunola, K., Ahonen, T., & Nurmi, J.-E. (2007). Cognitive predictors of single-digit and procedural calculation skills and their covariation with reading skill. *Journal of Experimental Child Psychology*, 97(3), 220-241. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2007.03.001>

- Koponen, T., Eklund, K., & Salmi, P. (2018). Cognitive predictors of counting skills. *Journal of Numerical Cognition*, 4(2), 410-428. <https://doi.org/10.5964/jnc.v4i2.116>
- Koponen, T., Salmi, P., Torppa, M., Eklund, K., Aro, T., Aro, M., Poikkeus, A.-M., Lerkkanen, M.-K., & Nurmi, J.-E. (2016). Counting and rapid naming predict the fluency of arithmetic and reading skills. *Contemporary Educational Psychology*, 44-45, 83-94. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2016.02.004>
- Korat, O. (2005). Contextual and non-contextual knowledge in emergent literacy development: A comparison between children from low SES and middle SES communities. *Early Childhood Research Quarterly*, 20(2), 220-238. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2005.04.009>
- Korpipää, H., Koponen, T., Aro, M., Tolvanen, A., Aunola, K., Poikkeus, A.-M., Lerkkanen, M.-K., & Nurmi, J.-E. (2017). Covariation between reading and arithmetic skills from Grade 1 to Grade 7. *Contemporary Educational Psychology*, 51, 131-140. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2017.06.005>
- Krajewski, K. (2008a). Prävention der Rechenschwäche. In W. Schneider & M. Hasselhorn (Éds.), *Handbuch der Pädagogischen Psychologie* (Vol. 10, p. 360-370). Hogrefe.
- Krajewski, K. (2008b). Vorschulische Förderung bei beeinträchtigter Entwicklung mathematischer Kompetenzen. *Frühe Förderung entwicklungsauffälliger Kinder und Jugendlicher*, 122-135.
- Krajewski, K., & Schneider, W. (2009a). Exploring the impact of phonological awareness, visual-spatial working memory, and preschool quantity-number competencies on mathematics achievement in elementary school: Findings from a 3-year longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(4), 516-531. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.03.009>
- Krajewski, K., & Schneider, W. (2009b). Early development of quantity to number-word linkage as a precursor of mathematical school achievement and mathematical difficulties: Findings from a four-year longitudinal study. *Learning and Instruction*, 19(6), 513-526. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2008.10.002>
- Kroesbergen, E. H., Van Luit, J. E. H., Van Lieshout, E. C. D. M., Van Loosbroek, E., & Van de Rijt, B. A. M. (2009). Individual Differences in Early Numeracy: The Role of Executive Functions and Subitizing. *Journal of Psychoeducational Assessment*, 27(3), 226-236. <https://doi.org/10.1177/0734282908330586>

- Kucirkova, N. (2017). IRPD—A framework for guiding design-based research for iPad apps. *British Journal of Educational Technology*, 48(2), 598-610. <https://doi.org/10.1111/bjet.12389>
- Lacroix, V., Pomerleau, A., Séguin, R., & Lamarre, G. (2001). Développement langagier et cognitif de l'enfant durant les trois premières années en relation avec la durée des vocalisations maternelles et les jouets présents dans l'environnement: Étude longitudinale auprès de populations à risque. *Revue canadienne des sciences du comportement*, 33(2), 65-76.
- Le Corre, M, Van de Walle, G., Brannon, E., & Carey, S. (2006). Re-visiting the competence/performance debate in the acquisition of the counting principles. *Cognitive Psychology*, 52(2), 130-169. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2005.07.002>
- Le Corre, M., & Carey, S. (2007). One, two, three, four, nothing more: An investigation of the conceptual sources of the verbal counting principles. *Cognition*, 105(2), 395-438. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2006.10.005>
- Le Corre, M., Li, P., Huang, B. H., Jia, G., & Carey, S. (2016). Numerical morphology supports early number word learning: Evidence from a comparison of young Mandarin and English learners. *Cognitive Psychology*, 88, 162-186. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2016.06.003>
- Lecocq, P. (1998). *L'É. co. S. Se une épreuve de compréhension syntaxico-sémantique (manuel et épreuve) : Deux volumes*. Presses Univ. Septentrion.
- LeFevre, J.-A., Cankaya, O., Xu, C., & Lira, C. J. (2018). Linguistic and Experiential Factors as Predictors of Young Children's Early Numeracy Skills. In *Language and Culture in Mathematical Cognition* (p. 49-72). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-812574-8.00003-1>
- Lefevre, J.-A., Clarke, T., & Stringer, A. P. (2002). Influences of Language and Parental Involvement on the Development of Counting Skills: Comparisons of French- and English-speaking Canadian Children. *Early Child Development and Care*, 172(3), 283-300. <https://doi.org/10.1080/03004430212127>
- LeFevre, J.-A., Fast, L., Skwarchuk, S.-L., Smith-Chant, B. L., Bisanz, J., Kamawar, D., & Penner-Wilger, M. (2010). Pathways to Mathematics: Longitudinal Predictors of Performance: Pathways to Mathematics. *Child Development*, 81(6), 1753-1767. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01508.x>
- LeFevre, J.-A., Polyzoi, E., Skwarchuk, S.-L., Fast, L., & Sowinski, C. (2010). Do home numeracy and literacy practices of Greek and Canadian parents predict the numeracy

- skills of kindergarten children? *International Journal of Early Years Education*, 18(1), 55-70. <https://doi.org/10.1080/09669761003693926>
- 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/Revue Canadienne Des Sciences Du Comportement*, 41(2), 55-66. <https://doi.org/10.1037/a0014532>
- Lehrl, S., Ebert, S., Blaurock, S., Rossbach, H.-G., & Weinert, S. (2020). Long-term and domain-specific relations between the early years home learning environment and students' academic outcomes in secondary school. *School Effectiveness and School Improvement*, 31(1), 102-124. <https://doi.org/10.1080/09243453.2019.1618346>
- Lehrl, S., Ebert, S., Rossbach, H.-G., Artelt, C., & Weinert, S. (2013). Facets of preschoolers' home literacy environments: What contributes to reading literacy in primary school? In M. Pfost (Éd.), *The Development of Reading Literacy from Early Childhood to Adolescence. Empirical Findings from the Bamberg BiKS Longitudinal Studies* (p. 35-62). University of Bamberg Press.
- Lei, P.-W., Wu, Q., DiPerna, J. C., & Morgan, P. L. (2009). Developing Short Forms of the EARLI Numeracy Measures: Comparison of Item Selection Methods. *Educational and Psychological Measurement*, 69(5), 825-842. <https://doi.org/10.1177/0013164409332215>
- Leibovich, T., & Ansari, D. (2016). The symbol-grounding problem in numerical cognition: A review of theory, evidence, and outstanding questions. *Canadian Journal of Experimental Psychology/Revue Canadienne de Psychologie Expérimentale*, 70(1), 12-23. <https://doi.org/10.1037/cep0000070>
- Lerner, M. D., & Lonigan, C. J. (2016). Bidirectional relations between phonological awareness and letter knowledge in preschool revisited: A growth curve analysis of the relation between two code-related skills. *Journal of Experimental Child Psychology*, 144, 166-183. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.09.023>
- Leroux, G., Monteil, J.-M., & Huguet, P. (2017). Apprentissages scolaires et technologies numériques : Une revue critique des meta-analyses. *Année psychologique*, 117, 433-465.
- Levine, S. C., Suriyakham, L. W., Rowe, M. L., Huttenlocher, J., & Gunderson, E. A. (2010). What counts in the development of young children's number knowledge? *Developmental Psychology*, 46(5), 1309-1319. <https://doi.org/10.1037/a0019671>

- Levine, S., Jordan, N. C., & Huttenlocher, J. (1992). Development of calculation abilities in young children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *53*(1), 72-103. [https://doi.org/10.1016/S0022-0965\(05\)80005-0](https://doi.org/10.1016/S0022-0965(05)80005-0)
- Levy, B. A., Gong, Z., Hessels, S., Evans, M. A., & Jared, D. (2006). Understanding print: Early reading development and the contributions of home literacy experiences. *Journal of Experimental Child Psychology*, *93*(1), 63-93. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2005.07.003>
- Lieberman, I. Y. (1973). Segmentation of the spoken word and reading acquisition. *Bulletin of the Orton Society*, *23*(1), 64-77. <https://doi.org/10.1007/BF02653842>
- Lipton, J. S., & Spelke, E. S. (2003). Origins of Number Sense: Large-Number Discrimination in Human Infants. *Psychological Science*, *14*(5), 396-401. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.01453>
- Litkowski, E. C., Duncan, R. J., Logan, J. A. R., & Purpura, D. J. (2020). When do preschoolers learn specific mathematics skills? Mapping the development of early numeracy knowledge. *Journal of Experimental Child Psychology*, *195*, 104846. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2020.104846>
- Locuniak, M. N., & Jordan, N. C. (2008). Using Kindergarten Number Sense to Predict Calculation Fluency in Second Grade. *Journal of Learning Disabilities*, *41*(5), 451-459. <https://doi.org/10.1177/0022219408321126>
- Lombardino, L. J., Lieberman, R. J., Brown, J. J. C., & PsychCorp (Firm). (2005). *ALL : Assessment of Literacy and Language*. PsychCorp; /z-wcorg/.
- Lonigan, C. J., Burgess, S. R., & Anthony, J. L. (2000). *Development of Emergent Literacy and Early Reading Skills in Preschool Children: Evidence From a Latent-Variable Longitudinal Study*. *36*(5), 596-613.
- Lonigan, C. J., Purpura, D. J., Wilson, S. B., Walker, P. M., & Clancy-Menchetti, J. (2013). Evaluating the components of an emergent literacy intervention for preschool children at risk for reading difficulties. *Journal of Experimental Child Psychology*, *114*(1), 111-130. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2012.08.010>
- Lonigan, C. J., Schatschneider, C., & Westberg, L. (2008). Identification of children's skills and abilities linked to later outcomes in reading, writing, and spelling. In *Developing early literacy: Report of the National Early Literacy Panel* (p. 55-106). National Institute for Literacy.
- Lonigan, C. J., & Shanahan, T. (2009). *Executive Summary—Developing Early Literacy: Report of the National Early Literacy Panel*. National Institute for Literacy.

- Lonigan, C. J., Wagner, R. K., Torgesen, J. K., & Rashotte, C. A. (2007). *TOPEL: Test of preschool early literacy*. Pro-Ed Austin, TX.
- Lopez, E. M., Gallimore, R., Garnier, H., & Reese, L. (2007). Preschool Antecedents of Mathematics Achievement of Latinos: The Influence of Family Resources, Early Literacy Experiences, and Preschool Attendance. *Hispanic Journal of Behavioral Sciences*, 29(4), 456-471. <https://doi.org/10.1177/0739986307305910>
- Lopez-Pedersen, A., Mononen, R., Korhonen, J., Aunio, P., & Melby-Lervåg, M. (2020). Validation of an Early Numeracy Screener for First Graders. *Scandinavian Journal of Educational Research*, 1-21. <https://doi.org/10.1080/00313831.2019.1705901>
- Lyster, S.-A. H., Lervåg, A. O., & Hulme, C. (2016). Preschool morphological training produces long-term improvements in reading comprehension. *Reading and Writing*, 29(6), 1269-1288. <https://doi.org/10.1007/s11145-016-9636-x>
- MacDonald, A., & Carmichael, C. (2018). Early mathematical competencies and later achievement: Insights from the Longitudinal Study of Australian Children. *Mathematics Education Research Journal*, 30(4), 429-444. <https://doi.org/10.1007/s13394-017-0230-6>
- Manfra, L., Squires, C., Dinehart, L. H. B., Bleiker, C., Hartman, S. C., & Winsler, A. (2017). Preschool writing and premathematics predict Grade 3 achievement for low-income, ethnically diverse children. *The Journal of Educational Research*, 110(5), 528-537. <https://doi.org/10.1080/00220671.2016.1145095>
- Manolitsis, G., Georgiou, G. K., & Tziraki, N. (2013). Examining the effects of home literacy and numeracy environment on early reading and math acquisition. *Early Childhood Research Quarterly*, 28(4), 692-703. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2013.05.004>
- Maria, K. (2000). Conceptual change instruction: a social constructivist perspective. *Reading & Writing Quarterly*, 16(1), 5-22. <https://doi.org/10.1080/105735600278042>
- Massonnié, J., Bianco, M., Lima, L., & Bressoux, P. (2019). Longitudinal predictors of reading comprehension in French at first grade: Unpacking the oral comprehension component of the simple view. *Learning and Instruction*, 60, 166-179. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2018.01.005>
- Matthews, J. S., Ponitz, C. C., & Morrison, F. J. (2009). Early gender differences in self-regulation and academic achievement. *Journal of Educational Psychology*, 101(3), 689-704. <https://doi.org/10.1037/a0014240>

- Mazzocco, M. M. M., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Preschoolers' Precision of the Approximate Number System Predicts Later School Mathematics Performance. *PLoS ONE*, *6*(9), e23749. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0023749>
- McBride-Chang, C. (1999). *The ABCs of the ABCs: The Development of Letter-Name and Letter-Sound Knowledge*. *45*(2), 25.
- McClelland, M. M., Cameron, C. E., Duncan, R., Bowles, R. P., Acock, A. C., Miao, A., & Pratt, M. E. (2014). Predictors of early growth in academic achievement: The head-toes-knees-shoulders task. *Frontiers in Psychology*, *5*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2014.00599>
- McCrink, K., & Wynn, K. (2004). Large-Number Addition and Subtraction by 9-Month-Old Infants. *Psychological Science*, *15*(11), 776-781. <https://doi.org/10.1111/j.0956-7976.2004.00755.x>
- McDowell, K. D., Lonigan, C. J., & Goldstein, H. (2007). Relations Among Socioeconomic Status, Age, and Predictors of Phonological Awareness. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, *50*(4), 1079-1092. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2007/075\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2007/075))
- Melhuish, E. C., Phan, M. B., Sylva, K., Sammons, P., Siraj-Blatchford, I., & Taggart, B. (2008). Effects of the Home Learning Environment and Preschool Center Experience upon Literacy and Numeracy Development in Early Primary School. *Journal of Social Issues*, *64*(1), 95-114. <https://doi.org/10.1111/j.1540-4560.2008.00550.x>
- Mendive, S., Mascareño Lara, M., Aldoney, D., Pérez, J. C., & Pezoa, J. P. (2020). Home Language and Literacy Environments and Early Literacy Trajectories of Low-Socioeconomic Status Chilean Children. *Child Development*. <https://doi.org/10.1111/cdev.13382>
- Merkley, R., & Ansari, D. (2016). Why numerical symbols count in the development of mathematical skills: Evidence from brain and behavior. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, *10*, 14-20. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2016.04.006>
- Milburn, T. F., Lonigan, C. J., DeFlorio, L., & Klein, A. (2019). Dimensionality of preschoolers' informal mathematical abilities. *Early Childhood Research Quarterly*, *47*, 487-495. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2018.07.006>
- Miller, K. F., Smith, C. M., Zhu, J., & Zhang, H. (1995). Preschool Origins of Cross-National Differences in Mathematical Competence: The Role of Number-Naming Systems. *Psychological Science*, *6*(1), 56-60. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1995.tb00305.x>

- Ministère de l'Éducation nationale. (2015). *Programme de l'école maternelle*.
<https://www.education.gouv.fr/programmes-et-horaires-l-ecole-maternelle-4193>
- Miser, T. M., & Hupp, J. M. (2012). The Influence of Socioeconomic Status, Home Environment, and Childcare on Child Language Abilities. *Current Psychology*, *31*(2), 144-159. <https://doi.org/10.1007/s12144-012-9139-0>
- Mix, K. S. (2008). Surface similarity and label knowledge impact early numerical comparisons. *British Journal of Developmental Psychology*, *26*(1), 13-32. <https://doi.org/10.1348/026151007X189109>
- Miyake, A., Friedman, N. P., Emerson, M. J., Witzki, A. H., Howerter, A., & Wager, T. D. (2000). The Unity and Diversity of Executive Functions and Their Contributions to Complex “Frontal Lobe” Tasks: A Latent Variable Analysis. *Cognitive Psychology*, *41*(1), 49-100. <https://doi.org/10.1006/cogp.1999.0734>
- Mol, S. E., & Bus, A. G. (2011). To read or not to read: A meta-analysis of print exposure from infancy to early adulthood. *Psychological Bulletin*, *137*(2), 267-296. <https://doi.org/10.1037/a0021890>
- Mol, S. E., Bus, A. G., de Jong, M. T., & Smeets, D. J. H. (2008). Added Value of Dialogic Parent–Child Book Readings: A Meta-Analysis. *Early Education and Development*, *19*(1), 7-26. <https://doi.org/10.1080/10409280701838603>
- Morgan, P. L., Farkas, G., & Qiong Wu. (2009). Five-Year Growth Trajectories of Kindergarten Children With Learning Difficulties in Mathematics. *Journal of Learning Disabilities*, *42*(4), 306-321. <https://doi.org/10.1177/0022219408331037>
- Mulder, H., Verhagen, J., Van der Ven, S. H. G., Slot, P. L., & Leseman, P. P. M. (2017). Early Executive Function at Age Two Predicts Emergent Mathematics and Literacy at Age Five. *Frontiers in Psychology*, *8*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01706>
- Muroya, N., Inoue, T., Hosokawa, M., Georgiou, G. K., Maekawa, H., & Parrila, R. (2017). The Role of Morphological Awareness in Word Reading Skills in Japanese: A Within-Language Cross-Orthographic Perspective. *Scientific Studies of Reading*, *21*(6), 449-462. <https://doi.org/10.1080/10888438.2017.1323906>
- Mussolin, C., Nys, J., Leybaert, J., & Content, A. (2012). Relationships between approximate number system acuity and early symbolic number abilities. *Trends in Neuroscience and Education*, *1*(1), 21-31. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2012.09.003>
- Muter, V., Hulme, C., Snowling, M. J., & Stevenson, J. (2004). Phonemes, Rimes, Vocabulary, and Grammatical Skills as Foundations of Early Reading Development: Evidence From

- a Longitudinal Study. *Developmental Psychology*, 40(5), 665-681. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.40.5.665>
- Naigles, L. R. (2002). Form is easy, meaning is hard: Resolving a paradox in early child language. *Cognition*, 86(2), 157-199. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(02\)00177-4](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(02)00177-4)
- National Early Literacy Panel (NELP). (2008). *Developing Early Literacy: Report of the National Early Literacy Panel*. Jessup, MD.
- National Research Council (NRC.) (Éd.). (2009). *Mathematics learning in early childhood: Paths toward excellence and equity*. National Academies Press.
- Negen, J., & Sarnecka, B. W. (2012). Number-Concept Acquisition and General Vocabulary Development. *Child Development*, 83(6), 2019-2027. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2012.01815.x>
- Negro, I., & Genelot, S. (2009). Les prédicteurs en grande section maternelle de la réussite en lecture en fin de première année d'école élémentaire : L'impact du nom des lettres. *Bulletin de psychologie*, 501, 291. <https://doi.org/10.3917/bupsy.501.0291>
- Neumann, M. M. (2014). An examination of touch screen tablets and emergent literacy in Australian pre-school children. *Australian Journal of Education*, 58(2), 109-122. <https://doi.org/10.1177/0004944114523368>
- Neumann, M. M. (2018). Using tablets and apps to enhance emergent literacy skills in young children. *Early Childhood Research Quarterly*, 42, 239-246. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2017.10.006>
- Neumann, M. M., Hood, M., Ford, R. M., & Neumann, D. L. (2013). Letter and numeral identification: Their relationship with early literacy and numeracy skills. *European Early Childhood Education Research Journal*, 21(4), 489-501. <https://doi.org/10.1080/1350293X.2013.845438>
- Neumann, M. M., & Neumann, D. L. (2014). Touch Screen Tablets and Emergent Literacy. *Early Childhood Education Journal*, 42(4), 231-239. <https://doi.org/10.1007/s10643-013-0608-3>
- Neumann, M. M., & Neumann, D. L. (2017). The use of touch-screen tablets at home and pre-school to foster emergent literacy. *Journal of Early Childhood Literacy*, 17(2), 203-220. <https://doi.org/10.1177/1468798415619773>
- Neumann, M. M., & Neumann, D. L. (2019). Validation of a touch screen tablet assessment of early literacy skills and a comparison with a traditional paper-based assessment. *International Journal of Research & Method in Education*, 42(4), 385-398. <https://doi.org/10.1080/1743727X.2018.1498078>

- Nguyen, T., Watts, T. W., Duncan, G. J., Clements, D. H., Sarama, J. S., Wolfe, C., & Spitler, M. E. (2016a). Which preschool mathematics competencies are most predictive of fifth grade achievement? *Early Childhood Research Quarterly, 36*, 550-560. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2016.02.003>
- Nguyen, T., Watts, T. W., Duncan, G. J., Clements, D. H., Sarama, J. S., Wolfe, C., & Spitler, M. E. (2016b). Which preschool mathematics competencies are most predictive of fifth grade achievement? *Early Childhood Research Quarterly, 36*, 550-560. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2016.02.003>
- Niklas, F., Cohrssen, C., & Tayler, C. (2016). Parents supporting learning: A non-intensive intervention supporting literacy and numeracy in the home learning environment. *International Journal of Early Years Education, 24*(2), 121-142. <https://doi.org/10.1080/09669760.2016.1155147>
- Nilsen, P. (2015). Making sense of implementation theories, models and frameworks. *Implementation Science, 10*(1). <https://doi.org/10.1186/s13012-015-0242-0>
- Ninaus, M., Kiili, K., McMullen, J., & Moeller, K. (2017). Assessing fraction knowledge by a digital game. *Computers in Human Behavior, 70*, 197-206. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2017.01.004>
- Noble, K. G., McCandliss, B. D., & Farah, M. J. (2007). Socioeconomic gradients predict individual differences in neurocognitive abilities. *Developmental Science, 10*(4), 464-480. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2007.00600.x>
- Northrop, L., & Killeen, E. (2013). A Framework for Using iPads to Build Early Literacy Skills. *The Reading Teacher, 66*(7), 531-537. <https://doi.org/10.1002/TRTR.1155>
- Oakhill, J. V., & Cain, K. (2012). The Precursors of Reading Ability in Young Readers: Evidence From a Four-Year Longitudinal Study. *Scientific Studies of Reading, 16*(2), 91-121. <https://doi.org/10.1080/10888438.2010.529219>
- Oakhill, J. V., Cain, K., & Bryant, P. E. (2003). The dissociation of word reading and text comprehension: Evidence from component skills. *Language and Cognitive Processes, 18*(4), 443-468. <https://doi.org/10.1080/01690960344000008>
- Okamoto, Y., & Case, R. (1996). II. Exploring the microstructure of children's central conceptual structures in the domain of number. In *Monographs of the Society for research in Child Development* (Vol. 61, p. 27-58). Wiley Online Library.
- Oliemat, E., Ihmeideh, F., & Alkhawaldeh, M. (2018). The use of touch-screen tablets in early childhood: Children's knowledge, skills, and attitudes towards tablet technology.

- Children and Youth Services Review*, 88, 591-597.
<https://doi.org/10.1016/j.childyouth.2018.03.028>
- Pace, A., Luo, R., Hirsh-Pasek, K., & Golinkoff, R. M. (2017). Identifying Pathways Between Socioeconomic Status and Language Development. *Annual Review of Linguistics*, 3(1), 285-308. <https://doi.org/10.1146/annurev-linguistics-011516-034226>
- Pagani, L. S., Fitzpatrick, C., Archambault, I., & Janosz, M. (2010). School readiness and later achievement: A French Canadian replication and extension. *Developmental Psychology*, 46(5), 984-994. <https://doi.org/10.1037/a0018881>
- Parisse, C. (2009). La morphosyntaxe : Qu'est-ce qu'est ? - Application au cas de la langue française ? *Rééducation orthophonique*, 47(238), 7-20.
- Pears, K. C., Kim, H. K., Fisher, P. A., & Yoerger, K. (2016). Increasing pre-kindergarten early literacy skills in children with developmental disabilities and delays. *Journal of School Psychology*, 57, 15-27. <https://doi.org/10.1016/j.jsp.2016.05.004>
- Peisner-Feinberg, E. S., Burchinal, M. R., Clifford, R. M., Culkin, M. L., Howes, C., Kagan, S. L., & Yazejian, N. (2001). The Relation of Preschool Child-Care Quality to Children's Cognitive and Social Developmental Trajectories through Second Grade. *Child Development*, 72(5), 1534-1553. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00364>
- Phillips, B. M., Piasta, S. B., Anthony, J. L., Lonigan, C. J., & Francis, D. J. (2012). IRTs of the ABCs: Children's letter name acquisition. *Journal of School Psychology*, 50(4), 461-481. <https://doi.org/10.1016/j.jsp.2012.05.002>
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1941). *Le développement des quantités chez l'enfant*. Delachaux & Niestle.
- Piaget, J., & Szeminska, A. (1941). *La genèse du nombre chez l'enfant*. Delachaux, Niestle.
- Pianta, R. C., La Paro, K. M., & Hamre, B. K. (2008). *The Classroom Assessment Scoring System. Manual Pre-K*. Brookes.
- Piasta, S. B. (2014). Moving to Assessment-Guided Differentiated Instruction to Support Young Children's Alphabet Knowledge. *The Reading Teacher*, 68(3), 202-211. <https://doi.org/10.1002/trtr.1316>
- Piasta, S. B., Purpura, D. J., & Wagner, R. K. (2010). Fostering alphabet knowledge development: A comparison of two instructional approaches. *Reading and Writing*, 23(6), 607-626. <https://doi.org/10.1007/s11145-009-9174-x>
- Piasta, S. B., & Wagner, R. K. (2010). Learning letter names and sounds: Effects of instruction, letter type, and phonological processing skill. *Journal of Experimental Child Psychology*, 105(4), 324-344. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.12.008>

- Pica, P., Lemer, C., Izard, V., & Dehaene, S. (2004). Exact and Approximate Arithmetic in an Amazonian Indigene Group. *Science*, 306(5695), 499-503. <https://doi.org/10.1126/science.1102085>
- Pinker, S., & Jackendoff, R. (2005). The faculty of language: What's special about it? *Cognition*, 95(2), 201-236. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2004.08.004>
- Pinto, G., Bigozzi, L., Accorti Gamannossi, B., & Vezzani, C. (2008). L'alfabetizzazione emergente: Validazione di un modello per la lingua italiana. *GP*, 961-978. <https://doi.org/10.1421/28425>
- Pinto, G., Bigozzi, L., Gamannossi, B. A., & Vezzani, C. (2009). Emergent literacy and learning to write: A predictive model for italian language. *European Journal of Psychology of Education*, 24(1), 61-78. <https://doi.org/10.1007/BF03173475>
- Piquard-Kipffer, A., & Sprenger-Charolles, L. (2013). Early predictors of future reading skills: A follow-up of French-speaking children from the beginning of kindergarten to the end of the second grade (age 5 to 8). *L'Année Psychologique*, 113(4), 491-521. <https://doi.org/10.4074/S0003503313014012>
- Plaza, M. (2014). Le développement du langage oral. *Contraste*, 39(1), 99. <https://doi.org/10.3917/cont.039.0099>
- Polignano, J. C., & Hojnoski, R. L. (2012). Preliminary evidence of the technical adequacy of additional curriculum-based measures for preschool mathematics. *Assessment for Effective Intervention*, 37(2), 70-83.
- Ponitz, C. C., McClelland, M. M., Matthews, J. S., & Morrison, F. J. (2009). A structured observation of behavioral self-regulation and its contribution to kindergarten outcomes. *Developmental Psychology*, 45(3), 605-619. <https://doi.org/10.1037/a0015365>
- Powell, D., & Atkinson, L. (2020). Unravelling the links between RAN, phonological awareness and reading. *Journal of Educational Psychology*. <https://doi.org/10.1037/edu0000625>
- Praet, M., Titeca, D., Ceulemans, A., & Desoete, A. (2013). Language in the prediction of arithmetics in kindergarten and grade 1. *Learning and Individual Differences*, 27, 90-96. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2013.07.003>
- Price, T. S., Eley, T. C., Dale, P. S., Stevenson, J., Sandino, K., & Plomin, R. (2000). Genetic and Environmental Covariation between Verbal and Nonverbal Cognitive Development in Infancy. *Child Development*, 71(4), 948-959. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00201>

- Pullen, P. C., & Justice, L. M. (2003). Enhancing Phonological Awareness, Print Awareness, and Oral Language Skills in Preschool Children. *Intervention in School and Clinic*, 39(2), 87-98. <https://doi.org/10.1177/10534512030390020401>
- Puranik, C. S., Lonigan, C. J., & Kim, Y.-S. (2011). Contributions of emergent literacy skills to name writing, letter writing, and spelling in preschool children. *Early Childhood Research Quarterly*, 26(4), 465-474. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2011.03.002>
- Puranik, C. S., Petscher, Y., & Lonigan, C. J. (2013). Dimensionality and reliability of letter writing in 3- to 5-year-old preschool children. *Learning and Individual Differences*, 28, 133-141. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2012.06.011>
- Purpura, D. J., Baroody, A. J., & Lonigan, C. J. (2013). The transition from informal to formal mathematical knowledge: Mediation by numeral knowledge. *Journal of Educational Psychology*, 105(2), 453-464. <https://doi.org/10.1037/a0031753>
- Purpura, D. J., & Ganley, C. M. (2014). Working memory and language: Skill-specific or domain-general relations to mathematics? *Journal of Experimental Child Psychology*, 122, 104-121. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.12.009>
- Purpura, D. J., Hume, L. E., Sims, D. M., & Lonigan, C. J. (2011). Early literacy and early numeracy: The value of including early literacy skills in the prediction of numeracy development. *Journal of Experimental Child Psychology*, 110(4), 647-658. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.07.004>
- Purpura, D. J., & Logan, J. A. R. (2015). The nonlinear relations of the approximate number system and mathematical language to early mathematics development. *Developmental Psychology*, 51(12), 1717-1724. <https://doi.org/10.1037/dev0000055>
- Purpura, D. J., Logan, J. A. R., Hassinger-Das, B., & Napoli, A. R. (2017). Why do early mathematics skills predict later reading? The role of mathematical language. *Developmental Psychology*, 53(9), 1633-1642. <https://doi.org/10.1037/dev0000375>
- Purpura, D. J., & Lonigan, C. J. (2013). Informal Numeracy Skills: The Structure and Relations Among Numbering, Relations, and Arithmetic Operations in Preschool. *American Educational Research Journal*, 50(1), 178-209. <https://doi.org/10.3102/0002831212465332>
- Purpura, D. J., & Lonigan, C. J. (2015). Early Numeracy Assessment: The Development of the Preschool Early Numeracy Scales. *Early Education and Development*, 26(2), 286-313. <https://doi.org/10.1080/10409289.2015.991084>

- Purpura, D. J., & Napoli, A. R. (2015). Early Numeracy and Literacy: Untangling the Relation Between Specific Components. *Mathematical Thinking and Learning*, 17(2-3), 197-218. <https://doi.org/10.1080/10986065.2015.1016817>
- Purpura, D. J., & Reid, E. E. (2016). Mathematics and language: Individual and group differences in mathematical language skills in young children. *Early Childhood Research Quarterly*, 36, 259-268. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2015.12.020>
- Purpura, D. J., Reid, E. E., Eiland, M. D., & Baroody, A. J. (2015). Using a Brief Preschool Early Numeracy Skills Screener to Identify Young Children With Mathematics Difficulties. *School Psychology Review*, 44(1), 41-59. <https://doi.org/10.17105/SPR44-1.41-59>
- Purpura, D. J., Schmitt, S. A., & Ganley, C. M. (2017). Foundations of mathematics and literacy: The role of executive functioning components. *Journal of Experimental Child Psychology*, 153, 15-34. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2016.08.010>
- Raag, T., Kusiak, K., Tumilty, M., Kelemen, A., Bernheimer, H., & Bond, J. (2011). Reconsidering SES and gender divides in literacy achievement: Are the gaps across social class and gender necessary? *Educational Psychology*, 31(6), 691-705. <https://doi.org/10.1080/01443410.2011.599835>
- Rabiner, D. L., Godwin, J., & Dodge, K. A. (2016). Predicting Academic Achievement and Attainment: The Contribution of Early Academic Skills, Attention Difficulties, and Social Competence. *School Psychology Review*, 45(2), 250-267. <https://doi.org/10.17105/SPR45-2.250-267>
- Raghubar, K. P., & Barnes, M. A. (2017). Early numeracy skills in preschool-aged children: A review of neurocognitive findings and implications for assessment and intervention. *The Clinical Neuropsychologist*, 31(2), 329-351. <https://doi.org/10.1080/13854046.2016.1259387>
- Ramey, C. T., & Ramey, S. L. (2004). Early Learning and School Readiness: Can Early Intervention Make a Difference? *Merrill-Palmer Quarterly*, 50(4), 471-491. <https://doi.org/10.1353/mpq.2004.0034>
- Räsänen, P., Salminen, J., Wilson, A. J., Aunio, P., & Dehaene, S. (2009). Computer-assisted intervention for children with low numeracy skills. *Cognitive Development*, 24(4), 450-472. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2009.09.003>
- Rausch, A., & Pásztor, A. (2017). Exploring the possibilities of online assessment of early numeracy in kindergarten. In *Proceedings of the 41st Conference of the International Group for the Psychology of Mathematics Education* (Vol. 4, p. 89-96).

- Reid, D. K., Hresko, W. P., & Hammill, D. D. (2001). *Test of early reading ability: Examiner's manual*. Pro-Ed.
- Reid, E. E., Morgan, P. L., DiPerna, J. C., & Lei, P. W. (2006). Development of measures to assess young children's early academic skills: Preliminary findings from a Head Start-university partnership. *Insights on Learning Disabilities*, 3(2), 25-38.
- Rieunaud, J. (1989). Piaget : Genèse du nombre et refus du décompte. In *L'Approche du nombre par le jeune enfant* (p. 7-32). Presses Universitaires de France ; Cairn.info. <https://www.cairn.info/l-approche-du-nombre-par-le-jeune-enfant--9782130418313-p-7.htm>
- Robbins, C., & Ehri, L. C. (1994). Reading Storybooks to Kindergartners Helps Them Learn New Vocabulary Words. *Journal of Educational Psychology*, 86(1), 54-64. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.86.1.54>
- Rodriguez, E. T., Tamis-LeMonda, C. S., Spellmann, M. E., Pan, B. A., Raikes, H., Lugo-Gil, J., & Luze, G. (2009). The formative role of home literacy experiences across the first three years of life in children from low-income families. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 30(6), 677-694. <https://doi.org/10.1016/j.appdev.2009.01.003>
- Rohde, L. (2015). The Comprehensive Emergent Literacy Model: Early Literacy in Context. *SAGE Open*, 5(1), 215824401557766. <https://doi.org/10.1177/2158244015577664>
- Rowe, M. L., Pan, B. A., & Ayoub, C. (2005). Predictors of Variation in Maternal Talk to Children: A Longitudinal Study of Low-Income Families. *Parenting*, 5(3), 259-283. https://doi.org/10.1207/s15327922par0503_3
- Rowe, M. L., Raudenbush, S. W., & Goldin-Meadow, S. (2012). The Pace of Vocabulary Growth Helps Predict Later Vocabulary Skill: Pace of Vocabulary Growth. *Child Development*, 83(2), 508-525. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2011.01710.x>
- Ryan Jackson, K., Fixsen, D., & Ward, C. (2018). Four Domains for Rapid School Improvement: An Implementation Framework. *Center on School Turnaround at WestEd*.
- Saint-Georges, C., Chetouani, M., Cassel, R., Apicella, F., Mahdhaoui, A., Muratori, F., Laznik, M.-C., & Cohen, D. (2013). Motherese in Interaction: At the Cross-Road of Emotion and Cognition? (A Systematic Review). *PLoS ONE*, 8(10), e78103. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0078103>

- Salminen, J. B., Koponen, T. K., & Tolvanen, A. J. (2018). Individuality in the Early Number Skill Components Underlying Basic Arithmetic Skills. *Frontiers in Psychology, 9*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01056>
- Saracho, O. N. (2017). Parents' shared storybook reading – learning to read. *Early Child Development and Care, 187*(3-4), 554-567. <https://doi.org/10.1080/03004430.2016.1261514>
- Sarama, J., Clements, D. H., & Wolfe, C. B. (2011). *TEAM—Tools for early assessment in mathematics*. Columbus, OH: McGraw-Hill Education.
- Sarama, J., & Clements, D. H. (2009). *Early Childhood Mathematics Education Research: Learning Trajectories for Young Children*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203883785>
- Sarnecka, B., Kamenskaya, V., Yamana, Y., Ogura, T., & Yudovina, Y. (2007). From grammatical number to exact numbers: Early meanings of 'one', 'two', and 'three' in English, Russian, and Japanese. *Cognitive Psychology, 55*(2), 136-168. <https://doi.org/10.1016/j.cogpsych.2006.09.001>
- Sarnecka, B. W., & Carey, S. (2008). How counting represents number: What children must learn and when they learn it. *Cognition, 108*(3), 662-674. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2008.05.007>
- Sarnecka, B. W., & Lee, M. D. (2009). Levels of number knowledge during early childhood. *Journal of Experimental Child Psychology, 103*(3), 325-337. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.02.007>
- Saxe, G. B., Guberman, S. R., & Gearhart, M. (1987). *Social Processes in Early Number Development* (University of Chicago Press, Vol. 52). <https://www.jstor.org/stable/1166071?origin=crossref>
- Scarborough, H. S. (1990). Very Early Language Deficits in Dyslexic Children. *Child Development, 61*(6), 1728-1743.
- Scarborough, H. S. (1998). Predicting the future achievement of second graders with reading disabilities: Contributions of phonemic awareness, verbal memory, rapid naming, and IQ. *Annals of Dyslexia, 48*(1), 115-136. <https://doi.org/10.1007/s11881-998-0006-5>
- Schacter, J., & Jo, B. (2016). Improving low-income preschoolers mathematics achievement with Math Shelf, a preschool tablet computer curriculum. *Computers in Human Behavior, 55*, 223-229. <https://doi.org/10.1016/j.chb.2015.09.013>

- Schacter, J., & Jo, B. (2017). Improving preschoolers' mathematics achievement with tablets: A randomized controlled trial. *Mathematics Education Research Journal*, 29(3), 313-327. <https://doi.org/10.1007/s13394-017-0203-9>
- Schatschneider, C., Fletcher, J. M., Francis, D. J., Carlson, C. D., & Foorman, B. R. (2004). Kindergarten Prediction of Reading Skills: A Longitudinal Comparative Analysis. *Journal of Educational Psychology*, 96(2), 265-282. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.96.2.265>
- Schatschneider, C., Francis, D. J., Foorman, B. R., Fletcher, J. M., & Mehta, P. (1999). The Dimensionality of Phonological Awareness: An Application of Item Response Theory. *Journal of Educational Psychology*, 91(3), 439-449.
- Schenke, K., Rutherford, T., & Farkas, G. (2014). Alignment of game design features and state mathematics standards: Do results reflect intentions? *Computers & Education*, 76, 215-224. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2014.03.019>
- Schmitt, S. A., Purpura, D. J., & Elicker, J. G. (2019). Predictive links among vocabulary, mathematical language, and executive functioning in preschoolers. *Journal of Experimental Child Psychology*, 180, 55-68. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2018.12.005>
- Schneider, M., Beeres, K., Coban, L., Merz, S., Susan Schmidt, S., Stricker, J., & De Smedt, B. (2017). Associations of non-symbolic and symbolic numerical magnitude processing with mathematical competence: A meta-analysis. *Developmental Science*, 20(3), e12372. <https://doi.org/10.1111/desc.12372>
- Senechal, M. (2006). Testing the Home Literacy Model: Parent Involvement in Kindergarten Is Differentially Related to Grade 4 Reading Comprehension, Fluency, Spelling, and Reading for Pleasure. *Scientific Studies of Reading*, 10(1), 59-87. https://doi.org/10.1207/s1532799xssr1001_4
- Senechal, M., & LeFevre, J.-A. (2002). Parental Involvement in the Development of Children's Reading Skill: A Five-Year Longitudinal Study. *Child Development*, 73(2), 445-460. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00417>
- Sénéchal, M., & LeFevre, J.-A. (2014). Continuity and Change in the Home Literacy Environment as Predictors of Growth in Vocabulary and Reading. *Child Development*, 85(4), 1552-1568. <https://doi.org/10.1111/cdev.12222>
- Sénéchal, M., LeFevre, J.-A., Smith-Chant, B. L., & Colton, K. V. (2001). On Refining Theoretical Models of Emergent Literacy The Role of Empirical Evidence. *Journal of School Psychology*, 39(5), 439-460. [https://doi.org/10.1016/S0022-4405\(01\)00081-4](https://doi.org/10.1016/S0022-4405(01)00081-4)

- Sénéchal, M., & Whissell, J. (2016). Des livres et des mots : L'entrée dans l'univers de l'écrit de 4 à 9 ans. *Actes du Symposium international sur la littéracie à l'école = International Symposium for Educational Literacy (SILE/ISEL)*, 13-30. <https://doi.org/10.17118/11143/9728>
- Shanahan, T., & Lonigan, C. J. (2010). The National Early Literacy Panel: A Summary of the Process and the Report. *Educational Researcher*, 39(4), 279-285. <https://doi.org/10.3102/0013189X10369172>
- Shankweiler, D., & Fowler, A. E. (2004). Questions people ask about the role of phonological processes in learning to read. *Reading and Writing*, 17(5), 483-515. <https://doi.org/10.1023/B:READ.0000044598.81628.e6>
- Share, D. L. (2004). Knowing letter names and learning letter sounds: A causal connection. *Journal of Experimental Child Psychology*, 88(3), 213-233. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2004.03.005>
- Sigmundsson, H., Eriksen, A. D., Ofteland, G. S., & Haga, M. (2017). Letter-Sound Knowledge: Exploring Gender Differences in Children When They Start School Regarding Knowledge of Large Letters, Small Letters, Sound Large Letters, and Sound Small Letters. *Frontiers in Psychology*, 8. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2017.01539>
- Simmons, F. R., & Singleton, C. (2008). Do weak phonological representations impact on arithmetic development? A review of research into arithmetic and dyslexia. *Dyslexia*, 14(2), 77-94. <https://doi.org/10.1002/dys.341>
- Skwarchuk, S.-L., Sowinski, C., & LeFevre, J.-A. (2014). Formal and informal home learning activities in relation to children's early numeracy and literacy skills: The development of a home numeracy model. *Journal of Experimental Child Psychology*, 121, 63-84. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.11.006>
- Slavin, R. E., & Lake, C. (2008). Effective Programs in Elementary Mathematics: A Best-Evidence Synthesis. *Review of Educational Research*, 78(3), 427-515. <https://doi.org/10.3102/0034654308317473>
- Slusser, E., Ditta, A., & Sarnecka, B. (2013). Connecting numbers to discrete quantification: A step in the child's construction of integer concepts. *Cognition*, 129(1), 31-41. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.05.011>
- Snow, C. E., Burns, S., & Griffin, P. (1998). Predictors of success and failure in reading. *Preventing reading difficulties in young children*, 137-171.
- Sprugevica, I., & Hoiem, T. (2004). Relations between enabling skills and reading comprehension: A follow-up study of Latvian students from first to second grade.

- Scandinavian Journal of Psychology*, 45(2), 115-122. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9450.2004.00386.x>
- Starkey, P., & Cooper, R. (1980). *Perception of numbers by human infants*. 210(4473), 1033-1035. <https://doi.org/10.1126/science.7434014>
- Starkey, P., & Cooper, R. G. (1995). The development of subitizing in young children. *British Journal of Developmental Psychology*, 13(4), 399-420. <https://doi.org/10.1111/j.2044-835X.1995.tb00688.x>
- Starkey, P., Klein, A., & Wakeley, A. (2004). Enhancing young children's mathematical knowledge through a pre-kindergarten mathematics intervention. *Early Childhood Research Quarterly*, 19(1), 99-120. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2004.01.002>
- Storch, S. A., & Whitehurst, G. J. (2002). Oral language and code-related precursors to reading: Evidence from a longitudinal structural model. *Developmental Psychology*, 38(6), 934-947. <https://doi.org/10.1037//0012-1649.38.6.934>
- Suggate, S. P. (2016). A Meta-Analysis of the Long-Term Effects of Phonemic Awareness, Phonics, Fluency, and Reading Comprehension Interventions. *Journal of Learning Disabilities*, 49(1), 77-96. <https://doi.org/10.1177/0022219414528540>
- Suggate, S., Reese, E., Lenhard, W., & Schneider, W. (2014). The relative contributions of vocabulary, decoding, and phonemic awareness to word reading in English versus German. *Reading and Writing*, 27(8), 1395-1412. <https://doi.org/10.1007/s11145-014-9498-z>
- Suggate, S., Schaughency, E., McAnally, H., & Reese, E. (2018). From infancy to adolescence: The longitudinal links between vocabulary, early literacy skills, oral narrative, and reading comprehension. *Cognitive Development*, 47, 82-95. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2018.04.005>
- Sulzby, E., & Teale, W. (1991). Emergent literacy. *Handbook of reading research*, 2, 727-757.
- Sung, Y.-T., Chang, K.-E., & Liu, T.-C. (2016). The effects of integrating mobile devices with teaching and learning on students' learning performance: A meta-analysis and research synthesis. *Computers & Education*, 94, 252-275. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2015.11.008>
- Tamis-LeMonda, C. S., Shannon, J. D., Cabrera, N. J., & Lamb, M. E. (2004). Fathers and Mothers at Play With Their 2- and 3-Year-Olds: Contributions to Language and Cognitive Development. *Child Development*, 75(6), 1806-1820. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2004.00818.x>

- Tazouti, Y. (2013). *Influence de l'appartenance sociale et de l'environnement familial de l'enfant sur les performances scolaires : Intérêts et limites de la modélisation par équations structurales en psychologie de l'éducation* [Habilitation à diriger des Recherches]. Université de Lorraine.
- Teale, W. H., & Sulzby, E. (1986). *Emergent Literacy: Writing and Reading. Writing Research: Multidisciplinary Inquiries into the Nature of Writing Series*. (Ablex Publishing Corporation).
- ten Braak, D., Kleemans, T., Størksen, I., Verhoeven, L., & Segers, E. (2018). Domain-specific effects of attentional and behavioral control in early literacy and numeracy development. *Learning and Individual Differences*, 68, 61-71. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2018.10.001>
- Thomas, A., Tazouti, Y., Hoareau, L., Luxembourger, C., Hubert, B., Fischer, J.P., & Jarlégan, A. (soumis a). Development of a French-language early literacy scale: Structural analysis and links between the dimensions of early literacy. *Journal of Research in Reading*.
- Thomas, A., Tazouti, Y., Hoareau, L., Luxembourger, C., Hubert, B., & Jarlégan, A. (soumis b). Early Numeracy Assessment in French Preschool: structural analysis and links with children's characteristics. *International Journal of Early Years Education*
- Toll, S. W. M., & Van Luit, J. E. H. (2014). Explaining numeracy development in weak performing kindergartners. *Journal of Experimental Child Psychology*, 124, 97-111. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2014.02.001>
- Tomopoulos, S., Dreyer, B. P., Tamis-LeMonda, C., Flynn, V., Rovira, I., Tineo, W., & Mendelsohn, A. L. (2006). Books, Toys, Parent-Child Interaction, and Development in Young Latino Children. *Ambulatory Pediatrics*, 6(2), 72-78. <https://doi.org/10.1016/j.ambp.2005.10.001>
- Tompkins, V., Guo, Y., & Justice, L. M. (2013). Inference generation, story comprehension, and language skills in the preschool years. *Reading and Writing*, 26(3), 403-429. <https://doi.org/10.1007/s11145-012-9374-7>
- Torppa, M., Lyytinen, P., Erskine, J., Eklund, K., & Lyytinen, H. (2010). Language Development, Literacy Skills, and Predictive Connections to Reading in Finnish Children With and Without Familial Risk for Dyslexia. *Journal of Learning Disabilities*, 43(4), 308-321. <https://doi.org/10.1177/0022219410369096>

- Treiman, R., & Broderick, V. (1998). What's in a Name : Children's Knowledge about the Letters in Their Own Names. *Journal of Experimental Child Psychology*, 70(2), 97-116. <https://doi.org/10.1006/jecp.1998.2448>
- Treiman, R., Tincoff, R., Rodriguez, K., Mouzaki, A., & Francis, D. J. (1998). The Foundations of Literacy : Learning the Sounds of Letters. *Child Development*, 69(6), 1524-1540.
- Umek, L. M., Kranjc, S., Fekonja, U., & Bajc, K. (2006). Quality of the preschool and home environment as a context of children's language development. *European Early Childhood Education Research Journal*, 14(1), 131-147. <https://doi.org/10.1080/13502930685209851>
- Vaessen, A., Bertrand, D., Tóth, D., Csépe, V., Faísca, L., Reis, A., & Blomert, L. (2010). Cognitive development of fluent word reading does not qualitatively differ between transparent and opaque orthographies. *Journal of Educational Psychology*, 102(4), 827-842. <https://doi.org/10.1037/a0019465>
- Vaknin-Nusbaum, V., Sarid, M., Raveh, M., & Nevo, E. (2016). The contribution of morphological awareness to reading comprehension in early stages of reading. *Reading and Writing*, 29(9), 1915-1934. <https://doi.org/10.1007/s11145-016-9658-4>
- van den Broek, P., Kendeou, P., Kremer, K., Lynch, J. S., Butler, J., White, M. J., & Lorch, E. P. (2005). Assessment of comprehension abilities in young children. In *Children's Reading Comprehension and Assessment* (Erlbaum, p. 107-130). S. Stahl & S. Paris. <https://pdfs.semanticscholar.org/e8f6/2bf85b2ee486be49f823dc6228a91ef29766.pdf>
- van den Broek, P., Kendeou, P., Lousberg, S., & Visser, G. (2011). Preparing for reading comprehension: Fostering text comprehension skills in preschool and early elementary school children. *International Electronic Journal of Elementary Education*, 4(1), 259-268.
- Van Marle, K. van, Chu, F. W., Li, Y., & Geary, D. C. (2014). Acuity of the approximate number system and preschoolers' quantitative development. *Developmental Science*, 17(4), 492-505. <https://doi.org/10.1111/desc.12143>
- Van Nieuwenhoven, C., Grégoire, J., & Noël, M. P. (2001). Tedi-Math. *Test diagnostique des compétences de base en mathématiques*. Paris, France : ECPA.
- van Viersen, S., de Bree, E. H., Zee, M., Maassen, B., van der Leij, A., & de Jong, P. F. (2018). Pathways Into Literacy: The Role of Early Oral Language Abilities and Family Risk for Dyslexia. *Psychological Science*, 29(3), 418-428. <https://doi.org/10.1177/0956797617736886>

- Vanderheyden, A. M., Broussard, C., Fabre, M., Stanley, J., Legendre, J., & Creppell, R. (2004). Development and Validation of Curriculum-Based Measures of Math Performance for Preschool Children. *Journal of Early Intervention, 27*(1), 27-41. <https://doi.org/10.1177/105381510402700103>
- vanMarle, K., Chu, F. W., Mou, Y., Seok, J. H., Rouder, J., & Geary, D. C. (2018). Attaching meaning to the number words: Contributions of the object tracking and approximate number systems. *Developmental Science, 21*(1), e12495. <https://doi.org/10.1111/desc.12495>
- Vygotsky, L. S. (1997). *Pensée et langage*. La Dispute.
- Vygotsky, L. S. (1962). *Thought and language* Cambridge, MA. MIT Press. (Original work published 1934).
- Wagner, R. K., & Torgesen, J. K. (1987). The Nature of Phonological Processing and Its Causal Role in the Acquisition of Reading Skills. *Psychological Bulletin, 101*(2), 192-212.
- Wagner, R. K., Torgesen, J. K., & Rashotte, C. A. (1994). Development of Reading-Related Phonological Processing Abilities: New Evidence of Bidirectional Causality From a Latent Variable Longitudinal Study. *Developmental Psychology, 30*(1), 73-87.
- Wang, J., Halberda, J., & Feigenson, L. (2017). Approximate number sense correlates with math performance in gifted adolescents. *Acta Psychologica, 176*, 78-84. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2017.03.014>
- Watts, T. W., Duncan, G. J., Siegler, R. S., & Davis-Kean, P. E. (2014). What's Past Is Prologue: Relations Between Early Mathematics Knowledge and High School Achievement. *Educational Researcher, 43*(7), 352-360. <https://doi.org/10.3102/0013189X14553660>
- Welsh, J. A., Nix, R. L., Blair, C., Bierman, K. L., & Nelson, K. E. (2010). The development of cognitive skills and gains in academic school readiness for children from low-income families. *Journal of Educational Psychology, 102*(1), 43-53. <https://doi.org/10.1037/a0016738>
- Whitehurst, G. J., & Lonigan, C. J. (1998). Child Development and Emergent Literacy. *Child Development, 69*(3), 848. <https://doi.org/10.2307/1132208>
- Whitehurst, G. J., & Lonigan, C. J. (2001). Emergent literacy: Development from prereaders to readers. In *Handbook of early literacy research* (Vol. 1, p. 11-29).
- Wiig, E. H., Secord, W. A., & Semel, E. (2004). *Clinical evaluation of language fundamentals-preschool-2 (CELF-Preschool-2)*. Psychological Corp.: San Antonio, TX, USA.

- Wolf, S., & McCoy, D. C. (2019). The role of executive function and social-emotional skills in the development of literacy and numeracy during preschool: A cross-lagged longitudinal study. *Developmental Science*, 22(4), e12800. <https://doi.org/10.1111/desc.12800>
- Wong, T. T.-Y., Ho, C. S.-H., & Tang, J. (2016). The relation between ANS and symbolic arithmetic skills: The mediating role of number-numerosity mappings. *Contemporary Educational Psychology*, 46, 208-217. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2016.06.003>
- Wood, J. N., & Spelke, E. S. (2005). Infants' enumeration of actions: Numerical discrimination and its signature limits. *Developmental Science*, 8(2), 173-181. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2005.00404.x>
- Woodcock, R. W., McGrew, K. S., & Mather, N. (2001). *Woodcock-Johnson III tests of achievement*.
- Wouters, P., & van Oostendorp, H. (2013). A meta-analytic review of the role of instructional support in game-based learning. *Computers & Education*, 60(1), 412-425. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2012.07.018>
- Wynn, K. (1990). Children's understanding of counting. *Cognition*, 36(2), 155-193. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(90\)90003-3](https://doi.org/10.1016/0010-0277(90)90003-3)
- Wynn, K. (1992a). Children's acquisition of the number words and the counting system. *Cognitive Psychology*, 24(2), 220-251. [https://doi.org/10.1016/0010-0285\(92\)90008-P](https://doi.org/10.1016/0010-0285(92)90008-P)
- Wynn, K. (1992b). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, 358(6389), 749-750. <https://doi.org/10.1038/358749a0>
- Xenidou-Dervou, I., De Smedt, B., van der Schoot, M., & van Lieshout, E. C. D. M. (2013). Individual differences in kindergarten math achievement: The integrative roles of approximation skills and working memory. *Learning and Individual Differences*, 28, 119-129. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2013.09.012>
- Xu, F. (2003). Numerosity discrimination in infants: Evidence for two systems of representations. *Cognition*, 89(1), B15-B25. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(03\)00050-7](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(03)00050-7)
- Xu, F., & Spelke, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74(1), B1-B11. [https://doi.org/10.1016/S0010-0277\(99\)00066-9](https://doi.org/10.1016/S0010-0277(99)00066-9)
- Zhang, C., Diamond, K. E., & Powell, D. R. (2019). Do children learn letter writing from their names? Examining the relations between Head Start children's writing skills and name-specific letter knowledge. *Early Child Development and Care*, 189(5), 747-762. <https://doi.org/10.1080/03004430.2017.1343311>

- Zhang, X., Hu, B. Y., Ren, L., & Fan, X. (2017). Pathways to reading, mathematics, and science: Examining domain-general correlates in young Chinese children. *Contemporary Educational Psychology, 51*, 366-377. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2017.09.004>
- Zhang, X., Koponen, T., Räsänen, P., Aunola, K., Lerkkanen, M.-K., & Nurmi, J.-E. (2014). Linguistic and Spatial Skills Predict Early Arithmetic Development via Counting Sequence Knowledge. *Child Development, 85*(3), 1091-1107. <https://doi.org/10.1111/cdev.12173>
- Zhang, X., Räsänen, P., Koponen, T., Aunola, K., Lerkkanen, M.-K., & Nurmi, J.-E. (2020). Early Cognitive Precursors of Children's Mathematics Learning Disability and Persistent Low Achievement: A 5-Year Longitudinal Study. *Child Development, 91*(1), 7-27. <https://doi.org/10.1111/cdev.13123>
- Ziegler, J. C., Bertrand, D., Tóth, D., Csépe, V., Reis, A., Fáisca, L., Saine, N., Lyytinen, H., Vaessen, A., & Blomert, L. (2010). Orthographic Depth and Its Impact on Universal Predictors of Reading: A Cross-Language Investigation. *Psychological Science, 21*(4), 551-559. <https://doi.org/10.1177/0956797610363406>
- Ziegler, J. C. (2018). Différences inter-linguistiques dans l'apprentissage de la lecture. *Langue française, 3*(199), 35. <https://doi.org/10.3917/lf.199.0035>
- Zubrick, S. R., Taylor, C. L., Rice, M. L., & Slegers, D. W. (2007). Late Language Emergence at 24 Months: An Epidemiological Study of Prevalence, Predictors, and Covariates. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research, 50*(6), 1562-1592. [https://doi.org/10.1044/1092-4388\(2007/106\)](https://doi.org/10.1044/1092-4388(2007/106))

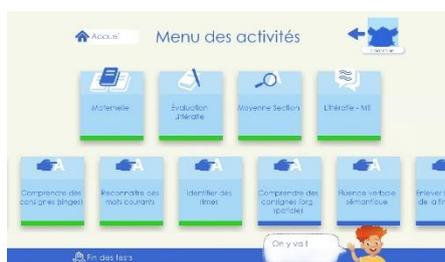
Annexe 1 : Le développement de l'outil d'évaluation LINUMEN Evaluation

Les épreuves de littératie et de numératie émergentes (LNE) ont été numérisées par l'entreprise LearnEnjoy. Les objectifs de cette version numérique de l'outil étaient d'une part, de faciliter et de standardiser la passation des tests et d'autre part, d'automatiser l'extraction des données. Chaque épreuve a fait l'objet de multiples allers-retours avec l'entreprise afin d'obtenir un produit qui corresponde à la fois à nos besoins en termes d'évaluation et aux contraintes techniques de l'entreprise. Pour cela, la conception de la version numérique de l'outil a duré plusieurs mois. La version définitive de l'application test a été livrée le 19 octobre 2018 pour la première phase d'évaluation. Les épreuves se déroulent en passation individuelle et nécessitent la présence d'un évaluateur. L'évaluateur instaure un climat favorable à la passation des épreuves, sélectionne les différentes épreuves dans l'ordre de passation et enregistre les réponses données par l'enfant.



L'application *LINUMEN Evaluation* nécessite une connexion internet pour se connecter à l'interface permettant de sélectionner la classe ou les enfants à évaluer. L'utilisateur doit alors rentrer son identifiant et son mot de passe pour avoir accès à la liste des élèves.

Pour choisir l'élève, il suffit alors de cliquer sur l'avatar correspondant. A ce niveau, l'évaluateur a la possibilité de télécharger le contenu des épreuves afin de faire l'évaluation sans avoir recours à une connexion internet. Pour cela, il suffit de cliquer sur le bouton « Avec/Sans wifi ».



Par la suite, grâce au menu déroulant, l'évaluateur peut sélectionner les différentes épreuves de littératie et de numératie émergentes ainsi que le niveau de l'élève. Toutes les épreuves sont présentées dans l'ordre de passation qui est recommandé.

L'application *LINUMEN Evaluation* contient de surcroît certaines fonctionnalités permettant à l'évaluateur de se repérer lors de la passation des différentes épreuves. Tout d'abord, lorsqu'un subtest a été réalisé avec l'enfant, une jauge de progression apparaît en dessous de l'icône du subtest permettant ainsi de savoir si l'épreuve a été réalisée ou non. En

sélectionnant une épreuve, l'évaluateur a accès à son contenu. Toutes les consignes et explications, nécessaires à la compréhension du subtest par l'élève, sont prononcées par une voix directement enregistrée dans l'application. Cependant, pour le déroulement de l'ensemble du test, un évaluateur doit être présent afin de sélectionner les épreuves dans l'ordre dans lequel elles doivent être réalisées. De plus, l'évaluateur doit également être présent pour valider les réponses de l'enfant. Pour certains subtests, la validation est automatique dès lors que l'enfant clique sur une des propositions présentées à l'écran. Certaines épreuves nécessitent des réponses verbales de la part de l'enfant. Le rôle de l'évaluateur est donc de définir si la réponse de l'enfant est correcte ou non. Pour cela, deux boutons ont été définis : l'évaluateur appuie sur le rond en cas de réussite et sur le triangle en cas d'échec. Une troisième modalité de réponse existe, lorsque l'enfant doit utiliser le glisser-déposer pour répondre à une question, l'évaluateur doit appuyer sur le bouton « valider » pour enregistrer la réponse de l'enfant. Enfin, si certaines informations notables sont à spécifier, un espace commentaire permet à l'évaluateur de mentionner des informations particulières liées à la passation des épreuves.

A. Les épreuves en littératie émergente

Le test en littératie émergente se décompose en quatre sous-parties, évaluant les principales dimensions de la littératie émergente : la connaissance des lettres, la conscience phonologique, le vocabulaire et la compréhension. Trois épreuves mesurent la connaissance des lettres : reconnaître une lettre isolée, dénommer oralement des lettres et prononcer oralement le son des lettres. Dans l'épreuve « *reconnaitre une lettre isolée* », des lettres en écriture majuscule, minuscule ou cursive sont présentées aux enfants sous forme d'une matrice avec six réponses possibles. Les enfants doivent pointer celle qui est nommée par l'évaluateur. Pour l'épreuve « *dénommer oralement des lettres* », des lettres majuscules sont présentées à l'enfant et celui-ci est invité à donner le nom de la lettre à voix haute. Enfin, la dernière épreuve « *prononcer oralement le son des lettres* » mesure la connaissance du son des lettres par l'enfant. Des lettres majuscules sont encore présentées à l'enfant et celui-ci doit donner leur son à voix haute.



Illustration des trois épreuves de connaissance des lettres

Trois autres épreuves mesurent le vocabulaire en réception et en production de l'enfant ainsi que la fluence verbale. Le subtest « *reconnaitre des mots courants* » permet d'évaluer le vocabulaire en réception de l'enfant. Pour cela, quatre images sont présentées à l'écran sans être nommées. L'enfant doit alors montrer l'image qui représente le mot-cible prononcé par l'évaluateur. La deuxième épreuve s'intitule « *dénommer des parties du corps* » et mesure le vocabulaire en production de l'enfant. Dans cette épreuve, les enfants doivent dénommer différentes parties du corps humain qui apparaissent à l'écran. Enfin, dans l'épreuve de « *fluence verbale sémantique* » l'enfant doit dire le plus vite possible durant 20 secondes tous les mots correspondant à la catégorie mentionnée (par exemple : animaux, fruit ...).



Illustration des épreuves de vocabulaire

Nb : pour ne pas distraire l'enfant dans sa tâche, l'épreuve de fluence verbale est représentée par un écran vide

La conscience phonologique est évaluée par cinq épreuves différentes. Tout d'abord, la première épreuve « *identifier des rimes* » est une tâche de détection de l'intrus. L'enfant doit cliquer sur l'illustration du mot qui ne rime pas avec les autres. La seconde épreuve « *reconnaitre et discriminer une syllabe dans un mot* » consiste à identifier la place d'une syllabe dans un mot. Les trois dernières épreuves concernent la manipulation de syllabes. La première consiste à enlever la syllabe finale des mots, la deuxième à supprimer la syllabe initiale des mots et la troisième consiste à inverser les syllabes d'un mot.

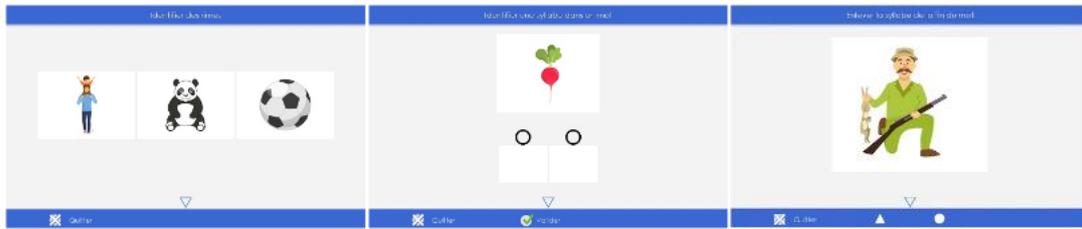


Illustration des épreuves de conscience phonologique

Nb : la dernière image correspond à la représentation visuelle des trois épreuves de manipulation de syllabes.

Enfin, quatre épreuves mesurent la compréhension de phrases, de textes et d'inférences. La première épreuve de *compréhension des consignes simples*, l'évaluateur demande aux enfants de montrer le singe cible (par exemple : montre-moi un singe qui est grand et bleu et content). La seconde épreuve évalue certains concepts fondamentaux de l'organisation spatiale des objets. Comme dans l'épreuve précédente, l'évaluateur demande aux enfants de montrer l'élément de l'image correspondant aux informations données dans la consigne (par exemple : "Montre-moi l'avion qui va vers le bas."). La troisième épreuve évalue la compréhension de textes courts. Pour cela, une courte histoire est racontée par la tablette puis des questions sont posées sur la compréhension des éléments explicites de l'histoire comme les personnages ou les événements. Enfin, la dernière épreuve concerne l'inférence à partir d'un texte lu. Dans cette épreuve, la compréhension des éléments implicites de l'histoire (inférence) est questionnée.

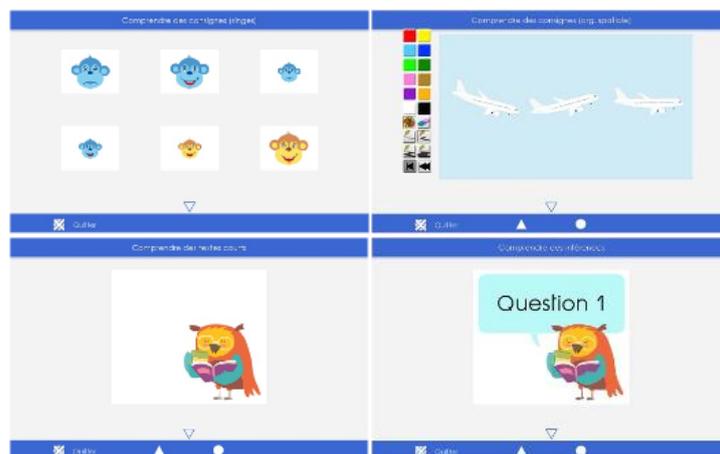


Illustration des quatre épreuves de compréhension

Nb : pour les épreuves de compréhension de textes ou d'inférences, aucun support visuel n'est fourni à l'enfant

B. Les épreuves en numératie émergente

Les épreuves en numératie émergentes ont été construites en s'appuyant principalement sur le cadre théorique et les épreuves développées par Purpura et collaborateurs (Purpura & Lonigan, 2015; Purpura & Napoli, 2015). Dans l'épreuve « *reconnaitre des chiffres* », des chiffres et des nombres sont présentés aux enfants sous forme d'une matrice avec six réponses possibles. Les enfants doivent pointer celle qui est nommée par l'évaluateur. Pour l'épreuve « *dénommer oralement des chiffres ou des nombres* », des chiffres sont présentés à l'enfant et celui-ci est invité à donner le nom du chiffre à voix haute.



Illustration des deux épreuves de connaissance des chiffres

Afin de mesurer l'acquisition de la chaîne numérique verbale chez l'enfant, l'évaluateur demande tout simplement à l'enfant de compter le plus loin possible. La tâche est arrêtée lorsque l'enfant commet une erreur ou s'il a correctement compté jusqu'à 50 sans erreur. Pour cette épreuve, la consigne est prononcée par la tablette mais l'évaluateur doit reporter sur une feuille réponse, le dernier chiffre ou nombre prononcé par l'enfant. Dans l'épreuve de dénombrement de collection, l'enfant doit compter des animaux présentés à l'écran. Les animaux sont disposés soit dans un ordre linéaire soit dans un ordre aléatoire. Cette épreuve évalue à la fois le principe de correspondance terme-à-terme lors du dénombrement mais aussi le principe cardinal. Ainsi, pour chaque item, l'enfant doit correctement dénombrer la collection et indiquer le nombre d'animaux comptés.



Illustration de l'épreuve de dénombrement

Nb : pour l'épreuve de récitation de la chaîne numérique verbale, aucun support visuel n'est fourni à l'enfant

Pour évaluer les compétences de subitizing de l'enfant, des constellations de points (de trois à six) sont présentés sur l'écran durant 50 ms. Les constellations de points prennent différentes formes (représentations de dés, alignées ou aléatoires) et l'enfant doit indiquer le nombre exact de points qu'il a perçus. Pour l'estimation de collections, l'enfant doit comparer deux collections de points de taille identique ou non. L'enfant doit alors sélectionner la carte avec le plus de points. Cette épreuve évalue ainsi la capacité de l'enfant à comparer approximativement des quantités sans avoir recours au comptage.

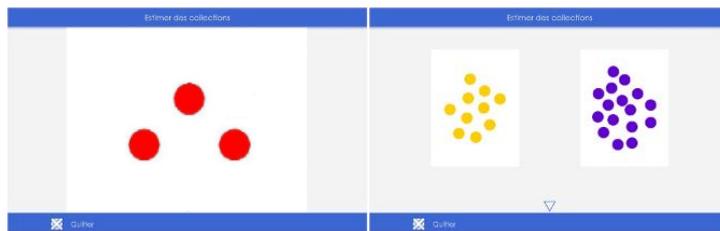
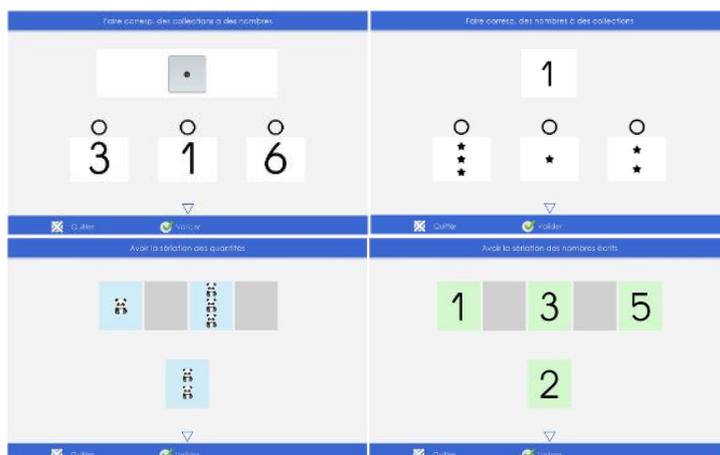


Illustration des épreuves de subitizing et d'estimation

Deux épreuves mesurent les correspondances entre quantités et nombres. Dans ces deux épreuves, l'enfant doit sélectionner, parmi trois réponses possibles, la quantité correspondant au chiffre présenté ou le chiffre correspondant à la quantité présentée. Pour les deux épreuves de sériation, l'enfant doit placer la carte présentée en bas de l'écran à l'endroit correspondant dans la chaîne numérique. Pour les items les plus difficiles, l'enfant doit placer correctement deux cartes dans la série présentée.



*Illustration des épreuves de correspondances entre quantités et nombres (en haut)
et de sériation (en bas)*

La dernière épreuve conçue est une épreuve verbale dans laquelle de courts problèmes mathématiques sont présentés à l'enfant. Ces problèmes à histoire correspondent à des problèmes additifs ou soustractifs simples auxquels l'enfant répond oralement. Pour cette épreuve, la tablette permet à l'évaluateur de reporter si la réponse donnée par l'enfant est correcte ou non.



Illustration de l'épreuve des problèmes à histoire

Nb : pour cette épreuve, aucun support visuel n'est fourni à l'enfant

Annexe 2 : A new educational tablet app for preschoolers: input from co-design

A new educational tablet app for preschoolers: input from co-design

Lara Hoareau¹, Youssef Tazouti¹, Jérôme Dinet¹, Aude Thomas¹, Christophe Luxembourger¹,
Blandine Hubert¹, Jean-Paul Fischer¹ and Annette Jarlégan²

¹ 2LPN (EA 7489) Université de Lorraine, Nancy, France

² LISEC (EA 2310) Université de Lorraine, Nancy, France



Computers in the Schools

Interdisciplinary Journal of Practice, Theory, and Applied Research

ISSN: (Print) (Online) Journal homepage: <https://www.tandfonline.com/loi/wcis20>

Co-Designing a New Educational Tablet App for Preschoolers

Lara Hoareau , Youssef Tazouti , Jérôme Dinet , Aude Thomas , Christophe Luxembourger , Blandine Hubert , Jean-Paul Fischer & Annette Jarlégan

To cite this article: Lara Hoareau , Youssef Tazouti , Jérôme Dinet , Aude Thomas , Christophe Luxembourger , Blandine Hubert , Jean-Paul Fischer & Annette Jarlégan (2020): Co-Designing a New Educational Tablet App for Preschoolers, Computers in the Schools

To link to this article: <https://doi.org/10.1080/07380569.2020.1830253>



Published online: 14 Oct 2020.



Submit your article to this journal [↗](#)



View related articles [↗](#)



View Crossmark data [↗](#)



Co-Designing a New Educational Tablet App for Preschoolers

Lara Hoareau, Youssef Tazouti, Jérôme Dinet, Aude Thomas, Christophe Luxembourger, Blandine Hubert, Jean-Paul Fischer, and Annette Jarlégan

Université de Lorraine, Nancy, France

ABSTRACT

This paper describes a French research project to co-design an early literacy/early numeracy tablet app for kindergarten students. In order to create an app that takes into account classroom/teaching constraints and the results of recent research, we adopted a theoretical co-design framework and followed a methodology involving researchers, education professionals and software engineers. We describe the design process and the app's educational content, together with the results of an initial trial of the app on a small sample of preschoolers, which showed that it is ready for larger scale testing. We conclude by discussing the specificities of our project and its contribution to the literature on the development of classroom apps for preschoolers.

KEYWORDS

Co-design; educational app; preschool; touchscreen tablet;

Digital devices in all their forms have become a common feature of the educational landscape in many countries, largely in response to reports highlighting the importance of digital technology in education, notably from the Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). In France, for example, most schools now have access to computer technologies, partly thanks to the government's "digital education plan," launched in May 2015, which has reduced regional and social differences in access to digital tools and helped ensure that teachers and students everywhere benefit from the opportunities provided by new technologies.

The widespread adoption of digital tools, including tablet computers, for classroom use has been accompanied by exponential growth in the number of educational apps on the market. Research into the way these apps are used in education and their impact on learning has found that young children often benefit more from learning situations centered around tablet computers than from control situations not involving digital tools (see Xie et al., 2018, for a meta-analysis and Griffith, Hagan, Heymann, Heflin, &

CONTACT Youssef Tazouti  youssef.tazouti@univ-lorraine.fr  Lorrain Laboratory of Psychology and Neurosciences (EA 7489), Université de Lorraine, INESPÉ de Lorraine, 5 rue Paul Richard, BP 90003-Maxéville, 54528 Nancy, France.

© 2020 Taylor & Francis Group, LLC

Bagner, 2020, for a review of the literature). However, studies in this field have employed widely differing methodologies, a fact that led both Xie et al. and Griffith et al. to call for further research into the features of apps that facilitate learning. Moreover, simply giving students an app and telling them to use it is not enough. As Archer et al. (2014) tertiary meta-analysis of three earlier meta-analyses showed, providing teachers and users with training and support can increase a digital tool's effectiveness. Archer et al. also highlighted the paucity of studies involving preschoolers and hence the need for more research in order to create well-grounded classroom tools for this age group and identify the factors that impact their effectiveness.

The current article describes the stages in and results of a French applied research project to design a classroom tablet app for use by preschoolers. Designed in collaboration with education professionals, the app's aim is to help children develop the early literacy and early numeracy skills needed for further learning. We conclude by discussing the use of educational apps in the classroom.

Co-design model for educational apps

A review of the literature revealed a substantial body of research on app design. According to Hirsh-Pasek et al. (2015), most currently available educational apps for children merely imitate what is already offered by other media, such as books, television, and video games. However, if apps are to fully exploit their educational potential, app development must creatively combine the possibilities provided by computer technologies with principles identified by research in the education sciences and psychology, as adapting educational apps to classroom situations requires a thorough understanding of teaching and learning processes. For example, the Preschoolers' Mobile Educational Games (Pre-MEGa) model (Shoukry, Sturm, & Galal-Edeen, 2012) provides a list of characteristics that can be used to apply research findings to developing and evaluating apps for preschoolers.

Although many research groups have developed classroom apps, they are not always widely adopted by teachers. This may be because the app is not suited to the classroom environment and/or because it is incompatible with the way teachers teach. One way to overcome this problem is for researchers to work in collaboration with practitioners.

Nevertheless, researchers are rarely involved in co-designing and co-developing educational apps and deploying them in classrooms. Kucirkova's (2017) Research, Practice, and Design (iRPD) framework addresses this issue by placing collaboration between researchers, practitioners, and app designers at the center of the app creation process. As

Kucirkova noted, apps that are developed and tested empirically in conjunction with university teams tend to be of high quality. What is more, such three-way collaborations provide opportunities for furthering educational research. The iRPD framework is built on five key principles.

1. ***Three-way collaboration between researchers, practitioners, and designers***

The first principle aims to improve the way an app is used in its target setting. This is achieved by employing an iterative development process involving discussions between stakeholders, often conducted during workshops.

2. ***A shared field of knowledge or epistemology***

The second principle stresses the fact that communication between the three types of stakeholder involved in designing apps will be effective only if they have a shared understanding of the learning environment and children's skills.

3. ***Awareness of social factors.***

The third principle highlights the need to take into account social factors when developing an app. Interactions between stakeholders' beliefs can affect the co-design process by impeding or facilitating collaboration.

4. ***Awareness of the possibilities provided by the environment (affordances)***

The fourth principle addresses the notion of affordances, which ecological theory conceptualizes as the offers the environment provides an individual and which can be perceived and realized through action (Gibson & Pick, 2000). Because determining an app's affordances requires team members to use the app and explore its potential, time and space must be set aside to do this.

5. ***Child-centered pedagogy***

The fifth principle describes the central and active role children must play in researching, designing, using, and developing apps: Children must be involved as co-researchers throughout the research and design process.

We applied this framework when developing our app.

Early literacy, early numeracy, and new technologies

Early literacy describes the knowledge, skills, and attitudes that form the developmental precursors of reading and writing (Whitehurst & Lonigan, 1998). Lonigan and Shanahan (2008) literature review revealed several early

literacy skills, including print knowledge, phonological awareness, and oral language.

Early numeracy describes a distinct set of skills that are later combined to build more advanced mathematical skills (Purpura, Baroody, & Lonigan, 2013). Research has tended to focus on certain components of early literacy and early numeracy, such as story problems, numeral identification, and quantification (counting, estimating, or subitizing), which have been found to be good predictors of future literacy skills (e.g., Duncan et al., 2007; National Early Literacy Panel [NELP], 2008) and future mathematics skills (National Mathematics Advisory Panel [NMAP], 2008). Consequently, it is important for children to develop these literacy and numeracy skills as early as possible and to practice them via a wide variety of activities.

New technologies (ebooks, tablet computers, etc.) can have a positive impact on the development of early literacy skills such as letter knowledge, vocabulary (e.g., Neumann, 2018), and phonological awareness (Chera & Wood, 2003; Wood, Pillinger, & Jackson, 2010). However, as Yelland (2018) noted following a study of how tablets can help children acquire early literacy skills, new technologies should be seen as “complimentary to other resources, rather than alternatives, or in competition with, traditional modalities” (pp. 847). Educational apps can also be effective aids for developing early mathematical skills (Outhwaite, Gulliford, & Pitchford, 2017), although they are most likely to have a positive impact when they are based on a solid and well-constructed teaching program suited to the child’s development stage (e.g., Pitchford, 2015, Schacter & Jo, 2016). Finally, both Xie et al.’s (2018) meta-analysis and Griffith et al.’s (2020) literature review showed that tablet apps are most effective as learning tools in the case of technological, scientific, and mathematical subjects. In fact, a major strength of apps is that they allow students to actively and repeatedly practice target skills.

Study objectives

The present study was part of the LINUMEN (Littératie et NUMératie Emergentes par le Numérique—Early Literacy and Numeracy through Digital Technologies) project, via an e-FRAN grant, whose aim was to create an educational tablet app for developing early literacy and numeracy skills. The resulting app had to be suited to the needs of preschoolers and for use in France’s *écoles maternelles* (kindergarten).

Our study addressed three questions:

1. Which models and concepts are most suited to designing an educational tablet app for use in the classroom?

2. What functionalities should the app contain in order to support learning by children of preschool age?
3. What are the advantages and disadvantages of co-designing the app through a collaboration between researchers, practitioners, and software designers?

We begin by describing the app development process and how we applied Kucirkova's (2017) iRPD co-design framework. We felt it was essential to include education professionals in the app design process, as they have first-hand knowledge of the situations in which it will be used. We then present the app's pedagogical content, which was designed at the end of the collaborative process, and provide feedback from a small group of students who tested the app in the classroom. Finally, we discuss how the approach we used fits into research on educational apps for schools.

Method

We followed a three-stage app development process comprising a research phase, a co-design phase, and a software development phase.

Research phase

The research team consisted of doctoral students and research professors in the fields of developmental psychology, education sciences, and computer sciences. We began by reviewing the literature on educational apps for preschoolers, which extends across several emerging fields of study, focusing on discussions of the principles of app development. At the same time, we looked at currently available educational apps for preschoolers. The huge selection of educational apps available on download platforms (App Store, Google Play, etc.) makes it very difficult for educators to know which are most appropriate. What is more, these apps vary greatly in terms of their pedagogical quality. Game-based apps tend to feature highly colorful worlds and favor play over learning. Their primary aim is to entertain, rather than to educate, so ergonomics and pedagogy are eclipsed by the needs of marketing, which promotes their entertainment value rather than clear educational objectives (Hirsh-Pasek et al., 2015). The worlds featured in academic and research-based educational apps tend to be simpler but still engaging to children. These apps can be used at home and are not necessarily designed specifically for classroom use.

In light of these observations, we decided to ensure our app met the following five criteria:

1. The app's content must be aligned with the *école maternelle* curriculum. *École maternelle* is a pillar of France's school system; it is free for all students and has been obligatory since the beginning of the 2019–2020 school year. Recent *école maternelle* curricula (MEN, 2015) have included entire modules focusing on early literacy and early numeracy. By designing our app's activities so they are aligned with the national curriculum, we could be confident that the activities' aims would be immediately familiar to teachers and easy to incorporate into their usual teaching practices. Hence, the new app would be both acceptable to and usable by teachers and provide them with a new tool for teaching early literacy and early numeracy skills.
2. Activities must follow a five-level progression from the start of *moyenne section* (age 4) to the end of *grande section* (age 5). All the activities follow a five-level progression, in step with France's school terms and the progression outlined in the national curriculum. The difficulty of the tasks within each activity increases as children progress from one level to the next.
3. The app's ergonomics must be suited to children and enable them to work independently. Children Computer Interaction (CCI) is an emerging field of research that Read and Bekker (2011) defined as the study of children's activities, behaviors, concerns, and abilities when they interact with digital tools. These interactions generally occur under the supervision of a third party, so children have only partial control over activities.

Most children are capable of interacting with a tablet from age 2 (Ahearne, Dilworth, Rollings, Livingstone, & Murray, 2016), even if 2-year-old and 3-year-old children cannot perform more difficult gestures, such as dragging and dropping and two-finger spreading (Abdul-Aziz, 2013). In addition, the ways children use tablets evolve between the ages of 5 and 40 months (Cristia & Seidl, 2015), and the new gestures they learn make it easier for them to use tablets in the classroom. Children from the age of 3¹/₂ are able to understand verbal and audiovisual instructions given by a tablet (Hiniker et al., 2015).

4. Activities must be fun and varied, and include a mascot to encourage children. The Entertainment Education Paradigm (EEP) was developed in another emerging field of research, entertainment education, which addresses new perspectives on children's learning. The EEP, defined as "the intentional placement of educational content in entertainment messages" (Singhal & Rogers, 2002, p. 117), is based on the principles of motivation, reinforcement, and blending (Lewis & Weber, 2009).

Motivation is achieved by making an app's activities entertaining enough to maintain a child's interest in learning. Reinforcement refers

to the fact that the interactions included in a game (feedback, rewards, progressive difficulty, etc.) encourage children to keep playing, thereby strengthening learning. Finally, blending is the need for a game's educational message to be perceived for learning to occur. Consequently, an app must be both entertaining and educational, but the entertainment aspect must not eclipse the learning goal.

Individuals can form indirect and unilateral relationships with fictional characters via a phenomenon called “parasocial interaction” (Giles, 2002). When parasocial interaction results in a child forming a positive relationship with a fictional character, and this relationship includes rich and suitable interactions, it can increase the child's involvement in a task and thereby promote deep learning (Gray, Reardon, & Kotler, 2017). Hence, we decided to enhance the entertainment aspect of our app by including a mascot.

5. The app must provide added value. Hirsh-Pasek et al. (2015) drew on work on the science of learning to develop a method for determining the potential educational impact of apps aimed at children between the ages of 0 and 8 years. They found that “four pillars of learning”—active learning, engagement in the learning process, meaningful learning, and socially interactive learning—have the greatest impact on children's learning. Associating these four pillars with an explanation of the learning goal should lead to high-quality learning.

Active learning describes a child's cognitive involvement in a task: When children are cognitively involved, their responses will be “considered,” rather than “mindless,” (i.e., mere reactions to a stimulus). An app must give children enough control so they can progress at their own speed without losing interest. Examples of active learning include handling “real” objects while working on a tablet, manipulating letters/words/sentences in order to communicate, and reordering musical notes to create a tune.

Engagement refers to a tablet's ability to maintain a child's sustained attention. Ways of achieving engagement include ensuring there are no distractions on the screen, maximizing responsiveness so the interface responds instantaneously to a user's actions, ensuring the app provides appropriate feedback, and designing sets of tasks so they form a coherent whole. Engagement impacts a child's motivation, both extrinsic (appropriate rewards, etc.) and intrinsic (awards based on children's desire to improve, learn new things, etc.).

For an app to promote *meaningful learning*, it must enable children to see how the things they are learning relate to their personal experience and help them extend their knowledge in order to develop new concepts. This can be done, for example, by asking children to recognize triangular shapes

Table 1. The early literacy and early numeracy skills targeted by our app.

Skills	Description
Numeracy skills	
Number knowledge	Child's ability to recognize a digit or a number
Counting	Child's ability to count the number of items in a set
Addition-subtraction	Child's ability to add and subtract, but without involving mathematical symbols
Seriation	Child's ability to complete an arithmetic series according to the rules of next after $n = n + 1$ and next before $n = n - 1$
Comparing sets	Child's ability to identify which of two representations of a numerical quantity is the larger
Literacy skills	
Letter knowledge	Child's ability to recognize a letter printed as a capital or written in cursive script
Vocabulary	Child's knowledge of everyday words (nouns, adjectives, adverbs, etc.)
Phonological awareness	Child's ability to detect and manipulate the sound units of oral language. It involves identifying the syllables in a word and manipulating them (inverting syllables, deleting syllables)
Comprehension	Child's ability to understand sentences or texts presented orally

in more complex scenes. *Socially interactive learning* occurs when an app encourages children to interact with their peers or other people (cooperation/collaboration) and with any characters included in the app, via para-social interaction.

Co-design phase

We formed our co-design team by inviting ten education professionals, including kindergarten teachers, educational advisors, and a school inspector, to join the university professors and doctoral students who had conducted the project's research phase. As well as providing a critical perspective based on their teaching experience, these education professionals drew on their involvement in teacher training to add another dimension to the app. In fact, we did not intend for our app to be just a learning tool for students, we also conceived it as a training tool for teachers, as its content can introduce teachers to other ways of teaching early literacy and numeracy skills. We also wanted to ensure that the app's content was aligned with the latest *école maternelle* curriculum.

The team designed the app's content so it met the five criteria described in the previous section. We divided the design process into a series of tasks, conducted over a six-month period, from January to July 2018.

The first task was to select the early literacy and early numeracy skills on which to focus. We chose the ten skills listed in [Table 1](#) because they are good predictors of future skills (e.g., Duncan et al., 2007; NMAP, 2008) and because they are described explicitly in France's *école maternelle* curriculum published by Ministère de l'Éducation nationale (MEN, 2015).

Completing this task as a team meant that all the team's members shared a common knowledge base.

Our second task was to draw up an outline for the activities, including the information needed to identify and describe each one (e.g., its title, the early learning domain, graphic design, skills targeted, tasks required, and the content of the items for each level). We then focused on pedagogical aspects, including priming, instructions, and feedback. The Results section presents two of the activities included in the app.

The third task involved converting this outline into a detailed specification that would provide the foundation for creating the app's activities. Although the *école maternelle* curriculum sets out specific goals, they can be achieved in a variety of ways. Furthermore, developing an activity involves much more than simply describing a setting and/or scenario (e.g., animals on a farm); it is necessary to draw up a detailed description of the activity's pedagogical content and to consider how this content can be adapted so that its difficulty increases to suit children's evolving abilities as they progress through *école maternelle*. The activity design process was carried out by a combination of subgroups and the whole co-design team. The subgroups produced preliminary designs for the activities in each of the early literacy and early numeracy domains addressed by the app, which they then presented to the whole team in order to obtain feedback. These discussion sessions highlighted the value of bringing together the different stakeholders' competencies. For example, the practitioners' pedagogical expertise and knowledge of classroom constraints were extremely valuable in choosing appropriate activities, whereas the researchers assured that the activities respected the five criteria described in the introduction. The researchers also kept the process on schedule and made sure the app was suited to the situations in which it would later be tested. The subgroups then modified their activity designs to incorporate the remarks made during the whole-team sessions. We continued this cycle of discussions until we had gone as far as we could in finalizing an activity.

The co-design group had to make numerous decisions about the content of the app's activities. Although some team members initially had differing opinions about a few of the activities, we eventually managed to achieve a consensus. Moreover, we did not take any decisions that went against the criteria we had established.

Software development phase

We engaged LearnEnjoy, a French startup with experience in collaborating with university teams and the world of education, to develop the software for the new app. After receiving detailed descriptions of the app's 20

activities, LearnEnjoy applied an agile software development method called Rapid Application Development (Martin, 1992), which is an iterative and incremental process aimed at finding the best compromise between technical limitations and the desired functionalities. Achieving this compromise involved a long series of face-to-face and videoconference meetings between LearnEnjoy and the co-design team. In addition, time and financial constraints meant we were unable to fully incorporate some of the criteria contained in the original design specification we gave to LearnEnjoy. Thus, the co-design team had to prioritize the aspects most essential to producing a high-quality educational app while assuring that the necessary compromises did not take away the essence of the activities. In addition, the team tested every new version of the app, on themselves and on children, until they arrived at the final version.

Results

The result of the co-design process was an app called AppLINOU (*Apprendre avec Linou en maternelle*—Learn with Linou in kindergarten), which allows preschoolers to work on a wide range of early literacy and early numeracy skills. AppLINOU is one of only a very small number of French apps for preschoolers to have been developed by a university team. As an initial test of the new app, we asked a teacher member of the co-design team to use it in the classroom with a group of students.

Description of the app

AppLINOU contains 20 activities that can be used in the classroom to help children develop a range of early literacy and early numeracy skills (see Table 1). All 20 activities were designed with reference to the five criteria drawn up by the co-design team. Each activity has five levels, which correspond to the progression through *école maternelle* from the beginning of *moyenne section* (age 4) to the end of *grande section* (age 6). As children progress from one level to the next, the activity remains the same, but the difficulty of the items increases. Each level includes, on average, 15 items of variable difficulty. An introductory video at the start of each level explains what the tasks involve and provides an example showing how to complete them.

These activities include features to enhance their educational impact, most of which are presented by the mascot, Linou, who introduces each activity, explains to children what they are going to learn, and provides feedback. When a child successfully completes an item, Linou gives positive and motivating feedback. If a response is incorrect, Linou encourages the

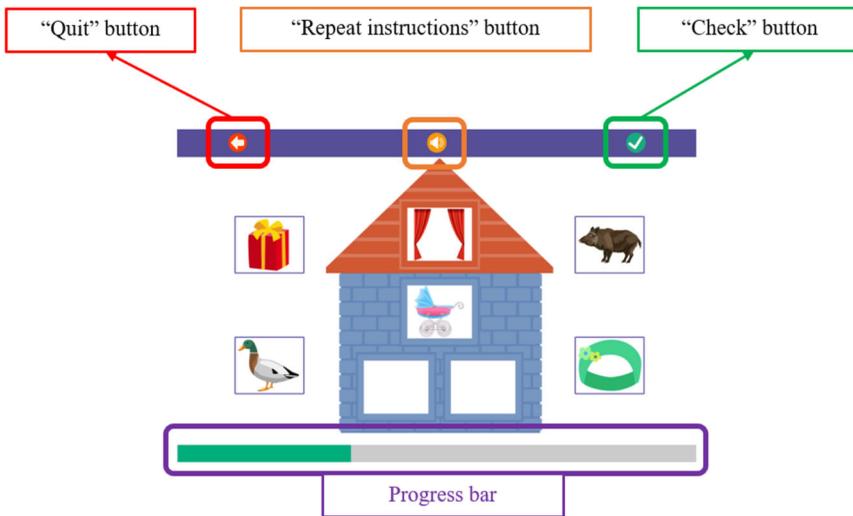


Figure 1. The app's functions shown in context.

child to try again by providing negative, but still motivating feedback. If the second attempt is also incorrect, Linou provides guidance on how to obtain the correct response. If the child still answers incorrectly, despite this guidance, Linou provides and explains the correct answer.

The app's activities have been designed so they can be completed using simple gestures (e.g., drag and drop, selecting icons) that are within the capabilities of young children. We also included a number of additional functions that reinforce the activities' pedagogical impact (see [Figure 1](#)). For example, to find out whether or not a response is correct, children have to tap the "check" button. Performing this action gives them time to think about their answers, which would not be the case if the app checked their answers automatically. Another button allows children to listen to the instructions again at any time during an activity, and a progress bar at the bottom of the screen shows how many items have been completed and how many items remain.

The following descriptions of a numeracy activity and a literacy activity illustrate the principles underlying all the apps' activities.

Example of a numeracy activity

Animal Enclosure is an activity set on a farm. On opening the activity, children see a priming video explaining the activity's goal, which is to count the number of animals in the enclosure and choose the right answer from a series of icons. The icons show pictures of fingers, pictures of constellations, or numbers. Children give their answers by dragging one of the icons

into the box provided. If an answer is correct, the mascot, Linou, congratulates the child and encourages him or her to continue the activity. If the answer is incorrect, Linou asks the child to try again. If the child's second attempt is also incorrect, Linou helps him or her by orally and visually counting the animals in the enclosure. If the child still answers incorrectly, Linou counts the animals and provides the right answer.

The animals in the enclosure are presented in four different ways in order to vary the difficulty of the items across the five levels. At first, the animals are shown as a geometric constellation (square or another pattern). Subsequent levels show the animals arranged either randomly or linearly but spaced the same distance apart. The final level shows the animals in groups (2 + 1, 3 + 1, 2 + 2, etc.). Finally, the types of animals shown also vary, and some pictures show animals of different sizes. [Table 2](#) illustrates this activity.

Example of an early literacy activity

In the *Harvesting Syllables* activity, children see pictures of objects above baskets corresponding to different numbers of syllables (see [Table 3](#)). The priming video explains that the aim is to place each word/picture in the corresponding basket. A crescent symbol on each basket shows the number of syllables a word must contain in order to be put into that basket (1 crescent = 1 syllable). On tapping a picture, a child hears it pronounced in a way that emphasizes the separate syllables. If the child chooses the correct number of syllables, Linou congratulates him or her and provides encouragement to continue the activity. If one or more answers are incorrect, all the pictures move back to their original positions, and Linou asks the child to try again. If the child's second answer is also incorrect, the pictures are put in the correct baskets, and Linou explains the answer.

The words included were chosen on the basis of the number of syllables they contain, from one to four, and on the frequency with which they are used in French, which had to be high. [Table 3](#) illustrates this activity.

Testing the app

In order to test the co-designed app, we asked an experienced teacher from within the co-design team to use it in the classroom. She carried out the test with a group of four children, boys and girls aged between 4 and 5 years with no known developmental disabilities (see [Figure 2](#)).

She began the session by introducing the app to the group of four children, explaining its functionalities, introducing the mascot, Linou, and explaining its role. She then asked the students to do a numeracy activity

Table 2. Presentation of the “animal enclosure” numeracy activity.

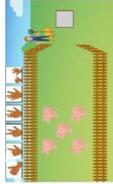
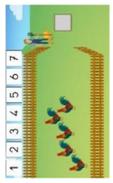
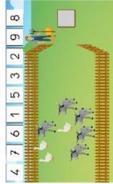
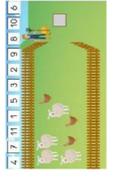
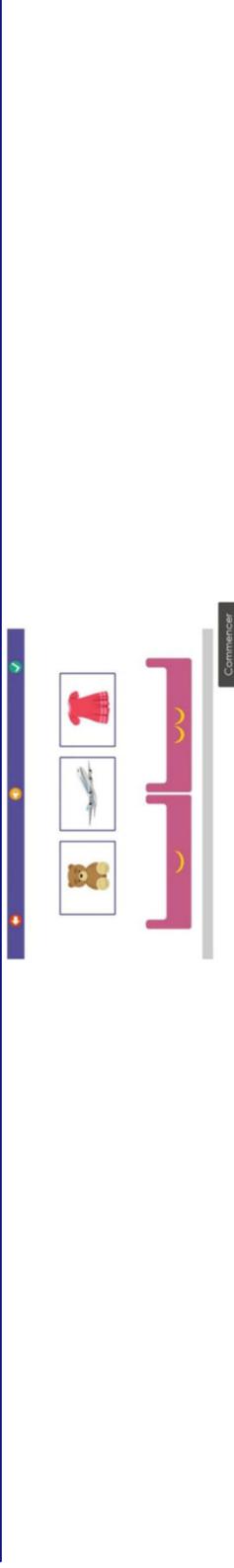
	<p>Start screen: Priming video</p> <p>Linou says: “Look, I’m going to help the farmer say how many animals there are in the enclosure.” The animals in the enclosure are highlighted one-by-one: “One and one, that makes two. I drag the right answer into the box. Then, when I’ve finished, I tap the “check” button. During the explanation, a virtual hand drags the correct answer into the answer box and then taps the “check button. “I’m right. There are two animals in the enclosure. Now, it’s your turn.”</p> <p>Increasing difficulty of the items according to level</p> <p>Level 1 </p> <p>Level 2 </p> <p>Level 3 </p> <p>Level 4 </p> <p>Level 5 </p> <p>Feedback from the mascot</p> <p>1st attempt Linou encourages the child to try again.</p> <p>2nd attempt Linou counts the animals in the enclosure out loud; the animals blink as they are counted.</p> <p>3rd attempt Linou counts the animals in the enclosure out loud and highlights the correct answer.</p>
--	---

Table 3. Presentation of the *Harvesting Syllables* literacy activity.

Start screen: Priming video



Linou says: "Count the syllables in each word and put the picture in the correct basket. I tap the picture of a BEAR and drag it into the correct basket." The virtual hand drags the BEAR picture into the basket for one-syllable words. "And again: AIRPLANE. DRESS." The virtual hand continues to drag the pictures into the correct baskets. "I have put all the pictures in the baskets; now I check my answer." The virtual hand taps the "check" button.

Increasing difficulty of the items according to level

Level 1



Level 2



Level 3



Level 4



Level 5



Feedback from the mascot

1st attempt

Linou encourages the child to try again.

2nd attempt

The pictures are placed automatically in the correct baskets and Linou explains the answer.



Figure 2. Testing the app with students.

and a literacy activity on their own while she supervised what they were doing. She was therefore able to determine how well the children grasped the app and whether it worked as intended—whether it is ergonomically suited to young children; whether the children understood the initiation and instructions, whether they found the app’s functionalities (ability to replay instructions, feedback, role of the mascot, etc.) useful, and the average time they took to complete an activity.

According to the teacher’s observations, the children understood the instructions and appeared to be comfortable using the app’s functionalities. However, the ability to use the app autonomously differed from child to child, which suggests that students with learning difficulties will need a lot more time to become familiar with its functionalities and to complete the tasks. The children really liked the mascot Linou, as it helped them during the activity and the feedback it provided, depending on their answers, encouraged them to continue. Moreover, because the activities dealt with concepts the children had already seen in class, the app helped reinforce what they had learned. These initial tests suggest that the app’s ergonomics, functionalities, and content are suitable for young children and that it can be considered operational. The next step will be to check these initial conclusions by conducting larger scale tests.

Discussion

The present paper describes a co-design approach for creating an educational app to help preschoolers develop their early literacy and early

numeracy skills. Our work provided answers to our three research questions.

Models and concepts applied to design our educational app

We created the app by applying a co-design methodology and following Kucirkova's (2017) iRPD framework, which was drawn up in response to calls to involve researchers more closely in co-designing educational apps. This research-based input helps ensure that apps are better suited to the needs of their intended users (e.g., Ebner, Kolbitsch, & Stickel, 2010). As Kucirkova (2017) noted, the iRPD framework's goal is to give researchers, designers, and practitioners thinking tools that they can use to progressively refine their practice and enrich traditional design-based research. We applied the iRPD's five guiding principles throughout the co-design process. Moreover, designing the app's content in collaboration with education professionals allowed us to create content that meets the needs of both preschoolers and kindergarten teachers. In the present study, we used Hirsh-Pasek et al.'s (2015) four pillars of learning to identify key criteria that had to be met when designing the app's pedagogical content.

Functionalities that support learning by preschoolers

As our app's primary goal is to support learning by preschoolers, we incorporated specific pedagogical features such as priming, feedback, and support. We also drew on research in the field of child-computer interaction (e.g., Read & Bekker, 2011) to adapt the app's ergonomics to young children's abilities by, for example, introducing 'check' and 'repeat instructions' buttons. Finally, in line with the Entertainment Education Paradigm (Lewis & Weber, 2009), we created a fun learning environment and included a mascot, which plays a central role in running the activities. Only by adopting a multidisciplinary approach to educational app development was it possible to take into account such a wide range of pedagogical, ergonomic, cognitive, and social factors.

Contributions and limits of the co-design approach

Rapid application development (Martin, 1992) proved to be an effective software development model for our app. Involving software engineers and the co-design team in an iterative, incremental, and adaptive development cycle enabled us to enrich the app and identify all of its affordances. Nevertheless, a number of limitations affected our collaborative process and prevented our including all of the co-design team's ideas into the app. For

example, we did not have the time or technical resources to include richer and more interactive feedback.

We feel that the type of collaboration envisaged by the iRPD framework is an excellent way of developing educational apps. Constructive discussions between members of a multidisciplinary co-design team are conducive to producing high-quality content that is likely to meet users' needs. In the case of AppLINOU, these discussions allowed us to ensure the app's activities were pedagogically sound and based on principles established in the literature. Designing the activities so they are aligned with the *école maternelle* curriculum, also means that AppLINOU is directly relevant to teachers. Hence, our co-design approach enabled us to optimize AppLINOU's ergonomic and pedagogical features and thereby produce an app that is very different from most other early learning apps on the market.

Conclusion

AppLINOU is one of only a few French apps for preschoolers to have been developed by a university team. As a continuation of the LINUMEN project, we began carrying out longitudinal tests of the app in around 40 *école maternelle* classes in March 2019. These large-scale tests will continue for two years and provide data on ways of improving future versions of the app. For example, we are currently envisaging modifying the role of the mascot, the feedback provided, and the priming videos in order to help children understand the activities more easily.

Acknowledgments

We would like to thank the Caisse des Dépôts, which funded this project via an e-FRAN (Espaces de Formation, de Recherche et d'Animation Numérique) grant, awarded under the PIA 2 (Programme d'Investissement d'Avenir 2) program. We would also like to thank the Lorraine Region's education authorities for supporting the project and our colleagues in the co-design group.

Conflicts of interest

There are no conflicts of interest in this work.

References

- Abdul-Aziz, N.A.B. (2013). Children's interaction with tablet applications: Gestures and interface design. *International Journal of Computer and Information Technology*, 2(3), 447–450.

- Ahearne, C., Dilworth, S., Rollings, R., Livingstone, V., & Murray, D. (2016). Touch-screen technology usage in toddlers. *Archives of Disease in Childhood*, *101*(2), 181–183. doi:10.1136/archdischild-2015-309278
- Archer, K., Savage, R., Sanghera-Sidhu, S., Wood, E., Gottardo, A., & Chen, V. (2014). Examining the effectiveness of technology use in classrooms: A tertiary meta-analysis. *Computers & Education*, *78*, 140–149. doi:10.1016/j.compedu.2014.06.001
- Chera, P., & Wood, C. (2003). Animated multimedia “talking books” can promote phonological awareness in children beginning to read. *Learning and Instruction*, *13*(1), 33–52. doi:10.1016/S0959-4752(01)00035-4
- Cristia, A., & Seidl, A. (2015). Parental reports on touch screen use in early childhood. *PLoS One*, *10*(6), e0128338. doi:10.1371/journal.pone.0128338
- Duncan, G. J., Dowsett, C. J., Claessens, A., Magnuson, K., Huston, A. C., Klebanov, P., ... Japel, C. (2007). School readiness and later achievement. *Developmental Psychology*, *43*(6), 1428–1446. doi:10.1037/0012-1649.43.6.1428
- Ebner, M., Kolbitsch, J., & Stickel, C. (2010). iPhone/iPad human interface design. In G. Leitner, M. Hitz & A. Holzinger (Eds), *Human-computer interaction in work & learning, life & leisure* (pp. 489–492). Springer.
- Gibson, E. J., & Pick, A. D. (2000). *An ecological approach to perceptual learning and development*. Oxford University Press.
- Giles, D. (2002). Parasocial interaction: A review of the literature and a model for future research. *Media Psychology*, *4*(3), 279–305. doi:10.1207/S1532785XMEP0403_04
- Gray, J. H., Reardon, E., & Kotler, J. A. (2017, June 27–30). Designing for parasocial relationships and learning: Linear video, interactive media, and artificial intelligence. In *Proceedings of the 2017 Conference on Interaction Design and Children* (pp. 227–2370), Stanford, CA: ACM. doi:10.1145/3078072.3079736
- Griffith, S. F., Hagan, M. B., Heymann, P., Heflin, B. H., & Bagner, D. M. (2020). Apps as learning tools: A systematic review. *Pediatrics*, *145*(1), e20191579. doi:10.1542/peds.2019-1579
- Hiniker, A., Sobel, K., Hong, S.R., Suh, H., Irish, I., Kim, D., & Kientz, J.A. (2015). Touchscreen prompts for preschoolers: Designing developmentally appropriate techniques for teaching young children to perform gestures. In *Proceedings of the 14th International Conference on Interaction Design and Children* (pp. 109–118). Medford, MA: ACM.
- Hirsh-Pasek, K., Zosh, J., Golinkoff, R., Gray, J., Robb, M., & Kaufman, J. (2015). Putting education in “educational” apps: Lessons from the science of learning. *Psychological Science in the Public Interest*, *16*(1), 3–34. doi:10.1177/1529100615569721
- Kucirkova, N. (2017). iRPD—A framework for guiding design-based research for iPad apps. *British Journal of Educational Technology*, *48*(2), 598–610. doi:10.1111/bjet.12389
- Lewis, M. L., & Weber, R. (2009). Character attachment in games as moderator for learning. In R. E. Ferdig (Ed.), *Handbook of research on effective electronic gaming in education* (Vol. 2, pp. 593–605). IGI Global.
- Lonigan, C. J., & Shanahan, T. (2008). Executive summary: A scientific synthesis of early literacy development and implications for intervention (pp. v-xii). In *Developing early literacy: Report of the national early literacy panel* (pp. 55–106). National Institute for Literacy.
- Martin, J. (1992). *Rapid application development*. Prentice-Hall.
- Ministère de l'Éducation nationale (MEN). (2015). Programme d'enseignement de l'école maternelle. [Official Gazette special issue no. 2 of March 26, 2015]. https://cache.media.education.gouv.fr/file/MEN_SPE_2/84/6/2015_BO_SPE_2_404846.pdf

- National Early Literacy Panel. (2008). *Developing early literacy: Report of the National Early Literacy Panel*. National Institute for Literacy.
- National Mathematics Advisory Panel. (2008). *Foundations for success: The final report of the National Mathematics Advisory Panel*. US Department of Education.
- Neumann, M. M. (2018). Using tablets and apps to enhance emergent literacy skills in young children. *Early Childhood Research Quarterly*, 42, 239–246. doi:10.1016/j.ecresq.2017.10.006
- Outhwaite, L. A., Gulliford, A., & Pitchford, N. J. (2017). Closing the gap: Efficacy of a tablet intervention to support the development of early mathematical skills in UK primary school children. *Computers & Education*, 108, 43–58. doi:10.1016/j.compedu.2017.01.011
- Pitchford, N. J. (2015). Development of early mathematical skills with a tablet intervention: A randomized control trial in Malawi. *Frontiers in Psychology*, 6, 485. doi:10.3389/fpsyg.2015.00485
- Purpura, D. J., Baroody, A. J., & Lonigan, C. J. (2013). The transition from informal to formal mathematical knowledge: Mediation by numeral knowledge. *Journal of Educational Psychology*, 105(2), 453–464. doi:10.1037/a0031753
- Read, J. C., & Bekker, M. (2011, July 4–8). The nature of child-computer interaction. In *Proceedings of the 25th BCS Conference on Human-Computer Interaction (BCS-HCI '11)* (pp. 163–170). Newcastle Upon Tyne, UK: ACM.
- Schacter, J., & Jo, B. (2016). Improving low-income preschoolers mathematics achievement with Math Shelf, a preschool tablet computer curriculum. *Computers in Human Behavior*, 55, 223–229. doi:10.1016/j.chb.2015.09.013
- Shoukry, L., Sturm, C., & Galal-Edeen, G. H. (2012, December). Pre-MEGa: A proposed framework for the design and evaluation of preschoolers' mobile educational games. In *Proceedings of the International Conference on Engineering Education. Instructional Technology, Assessment, and E-learning (EIAE 12)*. Bridgeport, CT: Springer.
- Singhal, A., & Rogers, E. M. (2002). A theoretical agenda for Entertainment-Education. *Communication Theory*, 12(2), 117–135. doi:10.1111/j.1468-2885.2002.tb00262.x
- Whitehurst, G. J., & Lonigan, C. J. (1998). Child development and emergent literacy. *Child Development*, 69(3), 848–872. doi:10.2307/1132208
- Wood, C., Pillinger, C., & Jackson, E. (2010). Understanding the impact of young readers' literacy interactions with talking books and during adult reading support. *Computers & Education*, 54(1), 190–198. doi:10.1016/j.compedu.2009.08.003
- Xie, H., Peng, J., Qin, M., Huang, X., Tian, F., & Zhou, Z. (2018). Can touchscreen devices be used to facilitate young children's learning? A meta-analysis of touchscreen learning effect. *Frontiers in Psychology*, 9, 2580. doi:10.3389/fpsyg.2018.02580
- Yelland, N. J. (2018). A pedagogy of multiliteracies: Young children and multimodal learning with tablets. *British Journal of Educational Technology*, 49(5), 847–858. doi:10.1111/bjet.12635