



HAL
open science

Influence de l'environnement familial d'apprentissage sur les compétences mathématiques : étude comportementale et par IRMf chez l'enfant

Cléa Girard

► **To cite this version:**

Cléa Girard. Influence de l'environnement familial d'apprentissage sur les compétences mathématiques : étude comportementale et par IRMf chez l'enfant. Neurosciences. Université de Lyon, 2021. Français. NNT : 2021LYSE1246 . tel-03681326

HAL Id: tel-03681326

<https://theses.hal.science/tel-03681326>

Submitted on 30 May 2022

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.



N°d'ordre NNT : 2021LYSE1246

THESE de DOCTORAT DE L'UNIVERSITE DE LYON

opérée au sein de
l'Université Claude Bernard Lyon 1

**Ecole Doctorale N° 476
Neurosciences et Cognition (NSCo)**

Spécialité de doctorat : Neurosciences Cognitives du Développement

Soutenue publiquement le 25/11/2021, par :

Cléa Girard

Influence de l'environnement familial d'apprentissage sur les compétences mathématiques. Étude comportementale et par IRMf chez l'enfant

Devant le jury composé de :

Dr Véronique IZARD, Université de Paris Descartes
Pr Youssef TAZOUTI, Université de Lorraine
Dr Irène ALTARELLI, Université de Paris Descartes
Pr Pierre FOURNERET, Université Claude Bernard Lyon 1
Pr Catherine THEVENOT, Université de Lausanne
Dr Jérôme PRADO, Université Claude Bernard Lyon 1

Rapporteure
Rapporteur
Examinatrice
Examinateur
Examinatrice
Directeur de thèse

Université Claude Bernard – LYON 1

Président de l'Université	M. Frédéric FLEURY
Président du Conseil Académique	M. Hamda BEN HADID
Vice-Président du Conseil d'Administration	M. Didier REVEL
Vice-Président du Conseil des Etudes et de la Vie Universitaire	M. Philippe CHEVALLIER
Vice-Président de la Commission de Recherche	M. Petru MIRONESCU
Directeur Général des Services	M. Pierre ROLLAND

COMPOSANTES SANTE

Département de Formation et Centre de Recherche en Biologie Humaine	Directrice : Mme Anne-Marie SCHOTT
Faculté d'Odontologie	Doyenne : Mme Dominique SEUX
Faculté de Médecine et Maïeutique Lyon Sud - Charles Mérieux	Doyenne : Mme Carole BURILLON
Faculté de Médecine Lyon-Est	Doyen : M. Gilles RODE
Institut des Sciences et Techniques de la Réadaptation (ISTR)	Directeur : M. Xavier PERROT
Institut des Sciences Pharmaceutiques et Biologiques (ISBP)	Directrice : Mme Christine VINCIGUERRA

COMPOSANTES & DEPARTEMENTS DE SCIENCES & TECHNOLOGIE

Département Génie Electrique et des Procédés (GEP)	Directrice : Mme Rosaria FERRIGNO
Département Informatique	Directeur : M. Behzad SHARIAT
Département Mécanique	Directeur M. Marc BUFFAT
Ecole Supérieure de Chimie, Physique, Electronique (CPE Lyon)	Directeur : Gérard PIGNAULT
Institut de Science Financière et d'Assurances (ISFA)	Directeur : M. Nicolas LEBOISNE
Institut National du Professorat et de l'Education	Administrateur Provisoire : M. Pierre CHAREYRON
Institut Universitaire de Technologie de Lyon 1	Directeur : M. Christophe VITON
Observatoire de Lyon	Directrice : Mme Isabelle DANIEL
Polytechnique Lyon	Directeur : Emmanuel PERRIN
UFR Biosciences	Administratrice provisoire : Mme Kathrin GIESELER
UFR des Sciences et Techniques des Activités Physiques et Sportives (STAPS)	Directeur : M. Yannick VANPOULLE
UFR Faculté des Sciences	Directeur : M. Bruno ANDRIOLETTI

A ma filleule adorée, Ella,
C'est promis,
on rattrapera le temps perdu.

Remerciements

Mes premiers remerciements s'adressent aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce manuscrit. Merci donc à mes rapporteur.e.s, Véronique Izard et Youssef Tazouti, et à mes examinateur.e.s, Irène Altarelli, Pierre Fourneret et Catherine Thevenot.

Jérôme, merci de m'avoir accordé ta confiance, depuis l'autre côté de l'Atlantique.

Merci pour ces quelques jours de préparation passés « en vrai » au sein de l'équipe en juillet 2017 pour préparer le concours. Ces quelques jours à Lyon étaient le meilleur condensé possible et m'avaient donné vraiment envie de rejoindre ton équipe. Merci surtout d'avoir fait débiter mon expérience de travail avec toi en m'offrant la plus belle des propositions : celle de modifier le projet initialement prévu pour travailler sur celui qui est devenu l'objet de ma thèse aujourd'hui. Je mesure pleinement la chance que j'ai eu de pouvoir travailler sur un sujet de thèse qui m'a passionné. Merci pour ces quatre années passées à apprendre à tes côtés, merci aussi pour ces derniers mois où jamais tu n'as fait de mon télétravail une anomalie.

Merci aux membres de mon comité de suivi de thèse, Teresa Iuculano et Laure Pisella. Merci d'avoir suivi mon travail et de m'avoir fait des retours bienveillants et pertinents.

Pendant ces années de thèse, j'ai eu la chance de travailler au sein d'une équipe extraordinaire.

Léa, Hanna, Jessica merci à toutes les trois, sans vous les données de cette thèse n'existeraient tout simplement pas. Léa et Hanna, je sais que vous avez assuré comme des cheffes avec les 5 ans et l'IRM fusée, merci infiniment pour ça. Merci pour tous ces mois où sans vous rien n'aurait été possible. Merci également pour vos relectures.

Justine, merci d'avoir été mon meilleur couteau suisse dans cette aventure de thésarde. Merci pour ton aide sur toute la logistique administrative et matérielle, merci de m'avoir initié aux joies de rédaction des projets CPP, de tenue des classeurs investigateurs, des signatures parentales à surveiller minutieusement, merci de m'avoir épaulé pour le recrutement, la mise en place de la salle de testing des 5 ans, cet incroyable décor IRM fusée, nos listes d'achats de cadeaux pour les enfants et la virée à ikea, merci pour tout le reste (je pense aussi à la climatisation !), mais surtout merci pour ton aide humaine si essentielle. Je regretterai longtemps ton bureau refuge le temps d'un café.

Philippine, je sais, je sais très bien que ta thèse est terminée depuis 2 ans, pourtant tu resteras *ma* co-bureau de cette thèse, et bien sûr beaucoup plus que ça. Merci pour ta présence pendant ces deux premières années, mais aussi ces deux dernières années. Merci d'être venue si souvent jusqu'à moi ces douze derniers mois, merci pour ces cafés dans ma cour ou sur mon balcon, merci pour ces appels et ces messages. Merci pour ton amitié et tout ce que tu sais déjà.

Merci, bien sûr, à tous les autres membres, passés ou présents, de l'équipe BBL. À toutes les stagiaires, à celles qui ont participé au codage des vidéos des enfants de 5 ans : Sarah, Alessia, Zoé, Sophie, merci à toutes, pour votre enthousiasme et votre travail ! (Léa, Hanna, Justine, je ne vous oublie pas non plus !).

Domitille, merci d'avoir été la stagiaire rêvée pour m'épauler dans l'acquisition des données IRM chez les enfants de 5 ans ; merci pour d'avoir été la médecin parfaite pour ces nombreuses visites d'inclusion.

Merci aussi à Stéphane pour toutes ces visites médicales réalisées au pied levé ; j'imagine à quel point elles ont dû perturber ton travail et pourtant tu as toujours répondu présent. Merci beaucoup. Hugo, merci à toi aussi, pour ces nombreux allers-retours depuis le Vinatier. Merci à tous les trois d'avoir été les meilleurs médecins possibles pour veiller à l'inclusion de ces enfants sans surtout jamais en effrayer aucun !

Nicolas, merci pour nos échanges et ton humour si précieux ces dernières semaines. Merci aussi pour ta relecture !

Marie-Line, je garde un souvenir joyeux (mais chaotique je le reconnais) de cet après-midi à la médiathèque dans le cadre de la fête de la Science, reconnaissance éternelle à toi et toute ta famille d'avoir été là ! Merci pour nos échanges, merci d'avoir joué le rôle de famille pilote pour tester mes questionnaires, et merci d'avoir accepté de participer à notre groupe d'anglais (qui n'a certes pas duré bien longtemps), mais qui a malgré tout pas mal compté avant de sauter dans le grand bain des réunions 100% en anglais.

Mélanie, merci pour nos échanges, merci pour ta disponibilité pour m'aider à préparer au mieux mes cours aux étudiants d'orthophonie, merci pour ces café visio et tous les autres à venir. Tu vas vivre ta meilleure vie à Montréal, hâte de suivre la suite de ton aventure !

Parnika, le hasard a fait qu'on a partagé toutes les grandes étapes clés de la thèse avec le même calendrier ; jusqu'à nos deadlines de rendu ...et de soutenance. Merci de vivre tout ça avec moi !

Alessia, Andrea, Antoine, Katrien, Nurit, Sarah, Tomoya, je regrette de ne pas, ou trop peu, avoir eu la chance de vous rencontrer « en vrai », il n'empêche que vous avez participé à cette fenêtre sociale qui animait mon écran à chaque *lab meeting* hebdomadaire, merci à vous !

Merci à tous les membres, chercheurs, ingénieurs, doctorants, stagiaires, du L2C2, je ne pouvais pas rêver meilleur endroit pour débiter cette thèse (et je ne dis pas ça que pour les chocolats, bonbons, sucreries en tout genre qui faisaient ma joie chaque semaine en cuisine !). Je garde d'ailleurs un souvenir enjoué de cette cuisine, merci pour tous ces échanges inspirants et heureux. Merci à vous tous donc : Tatjana et Anne R. merci pour votre accueil (Tatjana merci de m'avoir fait découvrir des chemins de traverse dans ces petites rues pour nous rendre jusqu'au métro, j'ai beaucoup apprécié ces petits trajets estivaux) ; Christiane merci pour ta gentillesse et pour tout ce que tu as fait pour me faciliter les choses, Anne C., merci pour ta disponibilité bienveillante, Olivier, merci pour tous avoir jour après jour passé ta tête à travers la porte avec des petits mots d'encouragements au moment de quitter le labo, Yves, merci pour ton humour et tes taquineries.

Zoé merci pour ta bonne humeur contagieuse et ton sourire constant, merci pour les soirées de Noël et les autres c'était si chouette de se retrouver tous ensemble dans ton appartement.

Violette, je n'oublierai jamais ce jour de concours passé ensemble, merci pour cette année à partager notre bureau, merci pour ta curiosité sur la vie et le monde qui t'entoure (grâce à toi j'ai beaucoup appris sur les hélicoptères !), merci pour ces scoubidous, ces thés caramel et toutes tes petites attentions. Je suis impressionnée par tout le chemin que tu as parcouru ces dernières années.

Amandine, merci pour ta douceur, ta présence discrète, mais constante. Merci de m'avoir ouvert ta porte si souvent. J'ai si hâte de te retrouver !

Marie, merci pour ta bienveillance, ta gentillesse à toute épreuve. Je te dois tellement ces derniers mois, merci pour la clé de ton appartement, refuge si précieux au milieu de ce monde de travaux infinis, merci pour tes conseils, le temps consacré à mes demandes multiples et variées. Je te suis *infiniment* reconnaissante pour tout ça.

Mélanie, merci pour ces si nombreux trajets en voiture, autrefois. C'était une vraie chance de finir ces nombreuses journées à tes côtés. Merci aussi pour nos débats enflammés en cuisine !

Parvaneh, Etienne, Nicolas, merci à vous trois pour les chouettes moments partagés.

Merci aussi bien sûr à tous les autres que j'ai eu la chance de côtoyer pendant ces deux années : Aurore, Naïma, Ira, Jacques, Jean-Baptiste, Johann et Sophie.

Merci aussi aux membres du CRNL, ceux d'Eduwell et tous ceux que j'ai eu l'occasion de croiser pendant ces quelques mois dans cette seconde maison. Merci tout particulièrement à Martine et Florian qui ont rendu ce nouveau départ plus doux.

Merci à Franck et Danielle du Cermep qui ont contribué grandement à l'acquisition des données IRMf. Merci d'avoir joué le jeu des « photos du cerveau », des cadeaux à stocker, des stickers à coller, sans parler de l'imposant décor fusée. Merci Franck d'avoir rempli la salle d'attente de merveilles en tout genre pour les enfants. Merci à vous deux pour votre gentillesse et votre disponibilité.

Merci bien sûr aussi aux parents et aux enfants qui ont participé aux tests. Une grosse pensée à tous nos petits 5 ans qui ont osé « l'aventure IRM fusée », certains non sans challenge, merci à eux tous d'avoir tenté (et pour certains d'avoir fait preuve d'une immobilité *et* d'un intérêt impressionnants!).

Merci à mes enseignants de Licence et Master de Psychologie au LPNC de Grenoble qui ont renforcé mon intérêt pour la recherche, merci tout particulièrement à Karine Mazens de m'avoir donné envie à mon tour d'étudier le développement de la cognition numérique chez l'enfant. Fanny, merci à toi aussi. Merci aussi aux équipes de recherche du CHU Sainte Justine et de l'UDEM de Montréal, qui m'ont donné la chance de travailler pour elles, elles ont permis le déclic dont j'avais besoin. Je ne peux pas clore ce paragraphe sans remercier également Bernard Lahire dont les travaux et l'encadrement m'ont fondamentalement menée à me passionner pour l'étude de la socialisation familiale au croisement de la sociologie et de la psychologie.

Enfin, bien sûr, merci à mes amis proches et ma famille pour leur présence toutes ces années. Merci à mes parents pour leur soutien permanent et sans faille, il est si précieux. Maman, merci infiniment pour toutes ces relectures quasi instantanées ces dernières semaines. Merci Gaétan pour le prêt de ta petite twingo bleue qui nous rend tant de service depuis un an et demi. Alice, Romain, merci à vous deux d'avoir accepté sans hésiter ce cadeau pas très sympa de relecture, merci mille fois pour ça !

Thomas, merci d'avoir tenu bon, la thèse, le confinement puissance 10, merci pour tout ce que tu fais pour moi. Tu le sais, sans toi, je n'en serai tout simplement pas là.

Résumé / Abstract

Résumé

Dès l'école maternelle, il existe de grandes différences individuelles dans les habiletés numériques des enfants. Des études de cohortes ont montré que certaines de ces différences pourraient être liées aux disparités socio-économiques entre les familles. Plus récemment, un nombre croissant d'études ont cherché à savoir si l'environnement familial d'apprentissage en numératie (« Home Numeracy Environment », HNE) pouvait être plus directement lié à ces différences individuelles dans les compétences mathématiques des enfants. Ces études ont toutefois abouti à des résultats relativement hétérogènes concernant les aspects spécifiques du HNE susceptibles d'être liés aux disparités des compétences en mathématiques. Par ailleurs, il reste aussi à déterminer si la relation entre environnement familial de numératie et habiletés numériques peut s'expliquer par des mécanismes numériques ou verbaux. Cette thèse avait pour objectif principal de contribuer à cet ensemble de recherches (1) par l'évaluation de la relation entre les activités familiales de numératie et les compétences en mathématiques des enfants, en mesurant de façon exhaustive les caractéristiques HNE des familles et les composantes numériques des enfants dans un groupe d'enfants français de 8 ans et (2) par le recours à la neuro-imagerie pour identifier les médiateurs neuraux d'une telle relation entre l'HNE et compétences mathématiques. Une première étude a montré l'existence d'une relation entre compétences arithmétiques chez l'enfant et activités familiales de numératie, mais seulement lorsque ces activités étaient formelles et relativement difficiles pour les enfants. Cela souligne l'importance de décomposer les activités familiales de numératie selon leurs caractéristiques spécifiques lors de l'étude du HNE. En outre, cette étude a également permis de souligner le rôle des attentes parentales concernant les acquisitions de leur enfant en mathématiques. Au-delà des autres caractéristiques parentales, des attentes parentales plus élevées concernant l'apprentissage des mathématiques étaient associées à une fréquence plus élevée d'activités familiales de numératie, formelles et « complexes ». Cela a confirmé l'importance de la prise en compte des caractéristiques parentales pour améliorer notre compréhension des facteurs sous-jacents aux différents environnements familiaux en numératie. Une deuxième étude a utilisé l'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) pour identifier les médiateurs neurocognitifs de la relation entre les activités familiales en numératie et les compétences en mathématiques des enfants (plus précisément leurs compétences de fluence arithmétique). Les résultats ont indiqué que la relation entre activités familiales de numératie et compétences arithmétiques des enfants pourrait s'expliquer par des différences dans la façon dont les quantités symboliques (c'est-à-dire les chiffres arabes) sont traitées automatiquement dans le sillon intra-pariétal (IPS). Par conséquent, cette thèse confirme non seulement l'existence d'une relation entre activités familiales dans le domaine de la numératie et compétences mathématiques des enfants, tout en contrôlant un ensemble de facteurs confondants, mais de

plus elle suggère que cette relation peut s'expliquer par une plus grande spécialisation de l'activité cérébrale fondamentale du traitement des symboles numériques.

Mots clés : Environnement familial de numératie, Développement, Mathématiques, IRMf, IPS, Activités familiales de numératie, Attentes parentales, SES

Abstract

There are large individual differences in children's numerical skills that can be measured as early as in kindergarten. Cohort studies have shown that some of these differences may be related to socio-economic disparities between families. More recently, a growing number of studies have investigated whether the home numeracy environment (HNE) may be more directly related to these individual differences in children's numerical skills. These studies, however, have led to relatively heterogeneous findings with regards to the specific aspects of the HNE that may be related to different math skills. It also remains unclear whether the relation between the HNE and children's numerical skills may be mediated by numerical or verbal mechanisms. The aim of this thesis was to contribute to this body of research by (1) assessing the relation between the HNE and math skills while measuring a range of HNE characteristics and mathematical skills in a sample of French 8-year-olds and (2) using neuroimaging to identify the neural mediators of the relation between the HNE and math skills. A first study showed a relation between children's arithmetic skills and home numeracy activities, but only when these activities were formal and relatively challenging for children. This highlights the importance of breaking down home numeracy activities according to their specific characteristics when investigating the HNE. Furthermore, this study also highlighted the role of parental expectations regarding math learning for their child. Over and above other parental traits, higher parental expectations regarding math learning were associated with higher frequency of advanced formal home numeracy activities. This confirmed the importance of considering parental traits to improve our understanding of the factors underlying different home numeracy environments. A second study used functional magnetic resonance imaging (fMRI) to identify the neurocognitive mediators of the relation between the HNE and math skills (more specifically arithmetic fluency). The results indicated that this relation was mediated by differences in how symbolic quantities (i.e., Arabic numerals) are automatically processed in the intraparietal sulcus (IPS). Therefore, this thesis not only confirms the existence of a relation between home numeracy activities and children's mathematical skills while controlling for a range of confounding factors, it also suggests that this relation is underpinned by a modulation of number-specific mechanisms in the IPS rather than by general verbal mechanisms.

Keywords: Home numeracy environment, Development, Mathematics, fMRI, IPS, Home numeracy activities, Parental expectations, SES

Liste des publications

Publications incluses dans cette thèse

Girard C., Bastelica T., Léone J., Epinat-Duclos J., Longo L. & Prado J. (*In Press*). Nurturing the mathematical brain: Home numeracy practices are associated with children's neural responses to symbolic numbers, *Psychological Science*

Girard C., Bastelica T., Léone J., Epinat-Duclos J., Longo L. & Prado J. (2021). The relation between home numeracy practices and a variety of math skills in elementary school children, *Plos One*, 16(9). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255400>

Publications incluses en annexes

Girard C., Bastelica T., Léone J., Epinat-Duclos J., Longo L. & Prado J. (2021). Nurturing the reading brain: home literacy practices are associated with children's neural response to printed words through vocabulary skills, *npj Science of Learning*. <https://doi.org/10.1038/s41539-021-00112-9>

Girard C., Bastelica T., Léone J., Epinat-Duclos J., Longo L. & Prado J. (*in revision*). Prior home learning environment predicts adaptation to homeschooling during COVID lockdown.

Table des matières

Introduction générale	27
Chapitre 1 : Statut socio-économique et disparités de réussite mathématique au sein des cohortes internationales et françaises	31
1. STATUT SOCIO-ECONOMIQUE.....	31
1.1. Définitions et mesures du statut socio-économique	31
1.2. Données sur les inégalités socio-économiques en France.....	33
2. LES LIENS ENTRE SES FAMILIAL ET REUSSITE EN MATHEMATIQUES CHEZ L'ENFANT	34
2.1. Avant l'entrée en maternelle.....	35
2.2. De l'entrée à la maternelle à la scolarisation primaire.....	37
2.3. Pendant la scolarisation primaire, jusqu'au secondaire et au-delà.	38
2.4. Les résultats en France.....	40
Chapitre 2 : Le développement neurocognitif des compétences numériques	45
1. COMPETENCES NUMERIQUES PRECOCES	45
1.1. Les compétences non symboliques	46
1.2. Les compétences symboliques	54
2. LIENS ENTRE COMPETENCES SYMBOLIQUES ET NON SYMBOLIQUES	57
2.1. Liens entre compétences symboliques exactes et précision des représentations non symboliques	57
2.2. Des différences entre représentations symboliques exactes et représentations non symboliques approximatives.....	62
3. CALCULS ET OPERATIONS ARITHMETIQUES ELEMENTAIRES.....	64
3.1. Compétences quantitatives approximatives et intuition arithmétique.....	65
3.2. Calcul mental et transformations arithmétiques	66
4. OUTILS D'EVALUATIONS MATHEMATIQUES UTILISES AUPRES DES ENFANTS FRANCOPHONES	74
Chapitre 3 : Aspects neurocognitifs des liens entre statut socio-économique familial et compétences mathématiques	79
1. SES ET SCORES COGNITIFS : LANGAGE ET FONCTIONS EXECUTIVES.....	80
1.1. Utilisation des batteries d'évaluation cognitive pour identifier l'existence de disparités socio-économiques au sein de différents domaines cognitifs.....	80
1.2. Relation entre SES et structures cérébrales susceptibles d'être impliquées dans la lecture et les fonctions exécutives	83
2. UTILISATION DES INDICES COGNITIFS LANGAGIERS ET/OU EXECUTIFS POUR ECLAIRER LA RELATION ENTRE SES ET REUSSITE SCOLAIRE MATHEMATIQUE.....	88
2.1. Rôle des mesures cognitives langagières et/ou exécutives précoces.....	88
2.2. Intérêt des mesures cognitives langagières et/ou exécutives plus tardives	89
2.3. Identification de médiateurs cognitifs de domaines cognitifs différents	90
3. SES ET MESURES DES DIFFERENTES COMPETENCES NUMERIQUES.....	92
3.1. Des disparités socio-économiques dans les composantes « verbales » des habiletés mathématiques : acquisition et maîtrise des systèmes symboliques et de l'arithmétique.....	103
3.2. Hypothèse de dépassement du clivage « verbal » / « non verbal » : hétérogénéité des résultats et études du système non symboliques	111

4. CARACTERISTIQUES « PROXIMALES » DU SES ET CONCLUSION.....	117
Chapitre 4 : Environnement familial d'apprentissage en numératie et compétences numériques de l'enfant	121
1. LA NOTION D'« ENVIRONNEMENT FAMILIAL D'APPRENTISSAGE »	122
1.1. L'échelle « Home Observation Measure of the Environment », une première mesure permettant une mesure globale de l'environnement familial.....	122
1.2. Décomposer les indicateurs de l'environnement familial : objectiver les caractéristiques susceptibles de soutenir le développement cognitif.....	124
2. UN PRECURSEUR DE L'ENVIRONNEMENT FAMILIAL D'APPRENTISSAGE EN NUMERATIE : L' ENVIRONNEMENT FAMILIAL D'APPRENTISSAGE EN LITTERATIE	126
2.1. Un modèle d'identification des activités familiales en lien avec la littératie et de leurs relations avec les compétences langagières chez l'enfant	126
2.2. Des relations entre les activités familiales de littératie et l'activité cérébrale dédiée au traitement du langage	127
2.3. Relations entre les caractéristiques des échanges langagiers au sein de l'environnement familial et le développement neurocognitif langagier chez l'enfant	129
2.4. Vers une caractérisation de l'environnement familial en littératie comme objet d'étude à part entière : préciser les expériences de l'enfant et mesurer les traits parentaux	132
3. L'ENVIRONNEMENT FAMILIAL D'APPRENTISSAGE EN NUMERATIE	133
3.1. Modèle du Home Numeracy Environment (HNE) : une entrée par les activités familiales de numératie	134
3.2. Capturer les stimulations familiales de numératie par des mesures du langage « mathématique » employé.....	145
3.3. Mesures du langage mathématique employé et mesures des activités de numératie réalisées	151
3.4. Conclusion intermédiaire : relations hétérogènes, mais robustes entre stimulations familiales et compétences chez l'enfant dans le domaine des mathématiques	155
3.5. Modèle du Home Numeracy Environment (HNE) : la prise en compte des traits parentaux	157
3.6. Influence des attentes des parents vis-à-vis de la réussite scolaire de leur enfant	159
3.7. Expériences parentales ou attitude vis-à-vis des mathématiques	163
3.8. Objectivation des compétences parentales en mathématiques.....	168
3.9. Caractéristiques socio-économiques du foyer et HNE.....	173
3.10. Environnement familial en numératie : plusieurs limites à considérer.....	177
Synthèse et hypothèses de travail.....	187
1. SYNTHÈSE	187
2. PRESENTATION DES HYPOTHESES EXPERIMENTALES	189
Chapitre 5 : Première étude	197
The relation between home numeracy practices and a variety of math skills in elementary school children.	197
Chapitre 6 : Deuxième étude.....	225
Nurturing the mathematical brain: Home numeracy practices are associated with children's neural responses to symbolic numbers.	225
Discussion.....	275
1. RAPPEL DES OBJECTIFS ET DISCUSSION DES RESULTATS PRINCIPAUX.....	275
1.1. Apports principaux des résultats comportementaux	275
1.2. Apports principaux des résultats neurocognitifs.....	280

2. IMPORTANCE DU CONTROLE DES FACTEURS CONFONDANTS DANS L'ETUDE DES RELATIONS ENTRE ENVIRONNEMENT FAMILIAL DE NUMERATIE ET COMPETENCES NEUROCOGNITIVES EN MATHÉMATIQUES CHEZ L'ENFANT.	284
2.1. <i>Mesure conjointe des variables contrôles : facteurs neurocognitifs non numériques chez l'enfant et fréquences des activités familiales de littératie</i>	284
2.2. <i>Mesure de la variabilité socio-économique des familles testées</i>	285
2.3. <i>Mesure des compétences parentales en mathématiques</i>	286
2.4. <i>Résultats corrélacionnels et inférence de la causalité : mesure de l'estimation des compétences de l'enfants par son parent, une tentative limitée pour réduire cette limite majeure</i>	286
3. VERS UN MODELE NEUROCOGNITIF DES LIENS ENTRE ACTIVITES FAMILIALES DE NUMERATIE ET COGNITION NUMERIQUE CHEZ L'ENFANT	287
4. PERSPECTIVES ET CONCLUSIONS.....	290
4.1. <i>Un modèle de lecture des relations entre famille et capacités cognitives compatibles avec certaines théories sociologiques</i>	290
4.2. <i>Un modèle « optimiste » conduisant à l'identification des caractéristiques les plus « malléables » de l'environnement familial</i>	291
4.3. <i>Aspect développemental du modèle neurocognitif défendu : apport futur des données en cours d'acquisition chez l'enfant d'âge préscolaire</i>	293
4.4. <i>Conclusion</i>	294
Références	297

Annexes

Annexe 1 : Table	343
Annexe 2 : Aspects neurocognitifs des liens entre statut socio-économique familial et compétences langagières et exécutives de l'enfant	345
A2.1. LE DOMAINE NEUROCOGNITIF DU LANGAGE	345
A2.1.1. <i>SES et composante lexicale du langage</i>	346
A2.1.2. <i>SES et composante phonologique du langage</i>	348
A2.1.3. <i>SES et composante syntaxique du langage</i>	351
A2.2. LE DOMAINE NEUROCOGNITIF DES FONCTIONS EXECUTIVES	352
A2.2.1. <i>Décomposer la relation entre SES et fonctions exécutives selon les trois composantes principales (inhibition, mémoire de travail et flexibilité cognitive)</i>	353
A2.2.2. <i>Analyser la relation entre SES et différentes composantes exécutives en précisant davantage les performances</i>	356
References	358
Annexe 3 : Caractéristiques de l'environnement familial d'apprentissage en littératie et les compétences langagière de l'enfant	363
A3.1. DECOMPOSER LES TYPES D'ACTIVITES EN LIEN AVEC LA LITTERATIE	363
A3.1.1. <i>Capter la variabilité des activités pratiquées en famille</i>	363
A3.1.2. <i>Outils de mesure de ces activités de littératie</i>	364
A3.2. UN MODELE DE DISSOCIATION SUR LES COMPETENCES COMPORTEMENTALES SUSCEPTIBLES D'ETRE ENTRAINEES	364
A3.2.1. <i>Des résultats obtenus via l'administration de scores comportementaux évaluant différentes composantes du langage</i>	364

<i>A3.2.2. Spécifier les caractéristiques du langage échangé au sein de l'environnement familial</i>	366
A3.3. MESURES PROXIMALES DE L'ENVIRONNEMENT FAMILIAL ET VARIABILITE INTRA-SES	367
<i>A3.3.1. Disparités intra-SES des activités d'apprentissage</i>	367
<i>A3.3.2. Disparités intra-SES des caractéristiques du langage employé</i>	368
A3.4. VERS UNE CARACTERISATION DE L'ENVIRONNEMENT FAMILIAL COMME OBJET D'ETUDE A PART ENTIERE : PRECISER LES EXPERIENCES DE L'ENFANT ET MESURER LES TRAITS PARENTAUX	369
<i>A3.4.1. Le caractère multidimensionnel des expériences induites par les disparités de statut socio- économique</i>	369
<i>A3.4.2. Combiner les mesures proximales de stimulations cognitives familiales pour mieux les discriminer</i>	369
<i>A3.4.3. Intégrer des mesures des traits parentaux</i>	371
A3.5. CONCLUSION INTERMEDIAIRE : L'ENVIRONNEMENT FAMILIAL D'APPRENTISSAGE COMME OBJET D'ETUDE A PART ENTIERE.....	372
References	373
Annexe 4 : Nurturing the reading brain: Home literacy practices are associated with children's neural response to printed words through vocabulary skills.	379
Supplementary information.....	392
Annexe 5 : Prior home learning environment predicts adaptation to homeschooling during COVID lockdown.	393
Supplementary information.....	414

Liste des figures

Figure 1	Coefficient de Gini du revenu disponible sur la population totale au sein de différents pays de l'OCDE (OCDE, 2016).....	33
Figure 2	Représentation des niveaux de revenu et d'éducation en France (Demaison, Grivet, Maury-Duprey, & Mayo-Simbsler, 2017; Insee, 2021).....	34
Figure 3	Moyenne aux tests de lecture et mathématiques pour des enfants américains selon le niveau de revenus familial (Nores & Barnett, 2014).....	37
Figure 4	Taille d'effet de différents prédicteurs sur la réussite en mathématiques d'enfants américains à 10 ans (Melhuish et al., 2008).....	39
Figure 5	Liste des différents pays ayant participé aux évaluations PISA (Peña-López, 2019).....	41
Figure 6	Répartition des performances en mathématiques des élèves de CM1 à travers les pays de l'Union européenne ou de l'OCDE en mathématiques (Colmant & Le Cam, 2020).....	43
Figure 7	Protocole expérimental permettant de tester les capacités des nouveau-nés à appairer des séquences de son et d'images (Izard, Sann, Spelke, & Streri, 2009).....	48
Figure 8	Protocole IRMf d'adaptation numérique (Cantlon, Brannon, Carter, & Pelphey, 2006).....	49
Figure 9	Illustration de différents rapports entre quantités non symboliques (Halberda, Mazocco, & Feigenson, 2008).....	51
Figure 10	Représentation spatiale des quantités analogiques sur une ligne numérique (Dehaene, Izard, Spelke, & Pica, 2008).....	52
Figure 11	Lexique numérique des Mundurucus (Pica, Lemer, Izard, & Dehaene, 2004).....	53
Figure 12	Tâche de ligne numérique symbolique et représentation logarithmique (Fayol, 2018; Siegler & Opfer, 2003).....	61
Figure 13	Méta-analyse de résultats concernant l'activité cérébrale dédiée aux quantités symboliques et non symboliques (Sokolowski, Fias, Mousa, & Ansari, 2017).....	63
Figure 14	Énoncé d'un problème arithmétique symbolique approximatif (Gilmore, McCarthy, & Spelke, 2007).....	65
Figure 15	Évolution du réseau d'activation cérébrale pour le traitement numérique de l'enfant à l'adulte (Kucian & Von Aster, 2015).....	68
Figure 16	Relation entre SES et différents domaines cognitifs (Farah et al., 2006).....	81
Figure 17	Relations entre SES et trajectoires développementales pour différents domaines cognitifs (Tucker-Drob, 2013).....	83
Figure 18	Évolution du volume total de matière grise cérébrale selon le SES (Hanson et al., 2013).....	84
Figure 19	Relations entre SES et structure cérébrale (Farah, 2017).....	85
Figure 20	Approche de modélisation entre voie « générale » et voies « spécifiques aux domaines » (Tucker-Drob, 2013).....	92
Figure 21	Interactions entre SES, performances arithmétiques des enfants et activité cérébrale dédiée à la résolution de soustractions (Demir, Prado, & Booth, 2015).....	105
Figure 22	Relations entre scores arithmétiques et SES selon la modalité de réponse (Jordan, Huttenlocher, & Levine, 1994).....	109

Figure 23	Protocole de transformation additive non symbolique (Gilmore, McCarthy, & Spelke, 2010).....	112
Figure 24	Évolution du volume de matière grise dans la lobe pariétal selon le SES (Hanson et al., 2013).....	113
Figure 25	Relation entre SES et surface corticale totale des enfants (Noble et al., 2015).....	118
Figure 26	Représentation de la médiation par des facteurs proximaux de la relation entre SES et disparités cérébrales (Farah, 2017).....	119
Figure 27	Relations entre différentes expériences familiales de littératie et compétences langagières de l'enfant (Sénéchal, 2006).....	127
Figure 28	Relations entre SES et caractéristiques du langage adressé à l'enfant (Romeo et al., 2018).....	129
Figure 29	Modèle de médiation par l'activité cérébrale de la relation entre les stimulations langagières de l'enfant (Romeo et al., 2018).....	131
Figure 30	Tailles d'effet des relations observées pour différents échantillons entre différentes activités familiales de numératie et compétences mathématiques des enfants (Dunst, Hamby, Wilkie, & Dunst, 2017).....	140
Figure 31	Fréquence de différentes activités familiales de numératie selon l'âge des enfants (Thompson, Napoli, & Purpura, 2017).....	142
Figure 32	Modèle de médiation par les compétences des enfants en langage mathématique de la relation entre HNE formel et leurs compétences mathématiques (King & Purpura, 2021).....	146
Figure 33	Association concurrente entre langage mathématique employé par la mère et compétences mathématiques des enfants (Elliott, Braham, & Libertus, 2017).....	149
Figure 34	Relation longitudinale entre langage mathématique employé par la mère et compétences ultérieures des enfants en mathématiques (Levine, Suriyakham, Rowe, Huttenlocher, & Gunderson, 2010).....	150
Figure 35	Types d'échanges langagiers initiés par le parent selon différentes activités (Zippert, Douglas, Smith, & Rittle-Johnson, 2020).....	153
Figure 36	Courbe des valeurs de p (observées dans la littérature pour la relation entre HNE et compétences mathématiques des enfants) en faveur d'un effet <i>réel</i> (Mutaf-Yıldız, Sasanguie, De Smedt, & Reynvoet, 2020).....	156
Figure 37	Modèle « hybride » des liens entre les caractéristiques distales et proximales de l'environnement familial avec les compétences mathématiques des enfants (Elliott & Bachman, 2018).....	157
Figure 38	Modération par le niveau d'anxiété parentale de la relation entre la fréquence de l'aide apportée aux devoirs en mathématiques de leur enfant et le développement des compétences mathématiques de ce dernier. (Maloney, Ramirez, Gunderson, Levine, & Beilock, 2015).....	166
Figure 39	Effet d'interaction entre attentes et attitude parentales vis-à-vis des mathématiques sur la réussite en mathématiques de leur enfant (Silver, Elliott, & Libertus, 2021).....	167
Figure 40	Illustrations et explications de la « Familial Control Method » (Hart, Little, & Bergen, 2021).....	170
Figure 41	Modèle de relation entre différents traits parentaux, caractéristiques HNE et compétences mathématiques des enfants (Cheung, Dulay, & McBride, 2020).....	172

Figure 42	Possibles relations entre caractéristiques cognitives interindividuelles des enfants et caractéristiques HNE sur les différences interindividuelles en mathématiques des enfants (Kleemans, Segers, & Verhoeven, 2016).....	177
Figure 43	Différences des tailles d'effet des relations observées selon la temporalité des mesures (pour différents échantillons) entre différentes activités familiales de numération et compétences mathématiques des enfants (Dunst, Hamby, Wilkie, & Dunst, 2017).....	180
Figure 44	Illustration du protocole IRMf utilisé dans notre étude	192
Figure 45	Modèle hypothétique de la relation attendue dans nos données (adaptée des résultats de Romeo et al., 2018; Merz, Maskus, Melvin, He, & Noble, 2020)	193
Figure 46	Rappel de nos résultats concernant les fréquences des activités de numération déclarées par les parents.....	276
Figure 47	Rappel de nos résultats sur la relation observée entre fréquence des activités familiales de numération et compétences arithmétiques des enfants	278
Figure 48	Rappel de nos résultats sur la médiation par le traitement des symboles numériques dans l'IPS de la relation entre fréquence des activités familiales de numération et compétences arithmétiques des enfants.....	281
Figure 49	Hypothèse sur les relations entre HNE et compétences neurocognitives des mathématiques chez l'enfant.....	288
Figure 50	Hypothèse d'un modèle neurocognitif impliquant des voies spécifiques à la numération (et notamment l'IPS gauche).....	290
Figure A1	Niveau de vocabulaire selon SES (Fernald et al. 2013)	346
Figure A2	Illustration du protocole expérimental de Ralph et collaborateurs (2020).....	348
Figure A3	Compétences langagières et SES (Noble et al. 2006)	349
Figure A4	Compétences syntaxiques et SES (Vasilyeva et al. 2008)	351
Figure A5	Variété lexicale (Montag et al. 2015).....	371

Liste des abréviations

DEPP : Direction de l'Évaluation, de la Prospective et de la Performance

ET : Ecart-Type

HNE : Home Numeracy Environment / Environnement familial de numératie

IFG : Inferior Frontal Gyrus / Gyrus frontal inférieur

IPS : Intra-Parietal Sulcus / Sillon intra-pariétal

IRM : Imagerie par Résonance Magnétique

IRMf : Imagerie par Résonance Magnétique fonctionnelle

OCDE : l'Organisation de Coopération et de Développement Économique

QI : Quotient Intellectuel

SAN : Système Approximative Numérique

SES : Statut Socio-Économique

WJ : Woodcock Johnson

Cohortes :

BiKS : Cohorte allemande (Kindergarten Cohort Study)

CEDRE : Cycle des Évaluations Disciplinaires Réalisées sur Échantillons

ECLS : Early Childhood Longitudinal Study (**K** : Kindergarten Cohort / **B** : Birth)

EPPE : Effective Pre-school and Primary Education

INVALSI : Italian Institute for the Evaluation of Educational Assessment

NICHD : Early Child Care Research Network Cohort

NIH MRI : National Institutes of Health Magnetic Resonance Imaging

PING : Pediatric Imaging Neurocognition and Genetics

PISA : Programme International pour le Suivi des Acquis des élèves

TIMMS : Trends in International Mathematics and Science Study

Annexes

WCST : Wisconsin Card Sorting Task

PARTIE THÉORIQUE

Introduction générale

En raison de la pandémie de COVID-19, de nombreux repères de notre vie quotidienne ont été bousculés. Parmi les mesures prises face au virus, la fermeture des écoles a obligé les familles à adopter une position inédite dans l'accompagnement scolaire des apprentissages des enfants, notamment des plus jeunes (Petretto, Masala, & Masala, 2020). Plus que jamais, cette situation a conduit à pointer les inégalités scolaires, face à la crainte de leurs potentielles exacerbations (Di Pietro et al., 2020). Cela a notamment amené la Société Française de Pédiatrie à recommander un retour rapide aux conditions de scolarisation les plus « normales » possibles (R. Cohen, Delacourt, Gras-Le Guen, & Launay, 2020).

La crise mondiale que nous traversons a ainsi poussé les familles à devoir investir la scolarisation de leur enfant d'une façon totalement nouvelle et inattendue, conduisant à s'interroger sur les conséquences possibles dans l'aggravation des inégalités de réussite scolaire (Bacher-Hicks, Goodman, & Mulhern, 2021; Bol, 2020; Jæger & Blaabæk, 2020; Reimer, Smith, Andersen, & Sortkær, 2021). Néanmoins l'existence de disparités importantes dans la réussite scolaire des enfants selon leurs milieux socio-économiques est un phénomène statistique largement établi et qui dépasse amplement le cadre de cette crise exceptionnelle.

En effet, dès l'entrée à l'école, les enfants présentent des compétences différentes en mathématiques et ces différences ont tendance à persister tout au long de la scolarisation (Duncan et al., 2007). En France, en 2019, un élève sur sept en CM1 ne maîtrisait pas les compétences mathématiques dites « élémentaires » (Colmant & Le Cam, 2020). Précisons dès à présent que de telles difficultés d'apprentissage en mathématiques n'équivalent pas nécessairement à l'existence de « troubles des apprentissages » (American Psychiatric Association, 2015) et notre propos dans le cadre de cette thèse sera consacré aux variations « non pathologiques » des compétences en mathématiques à travers l'étude des dimensions neurocognitives et environnementales susceptibles de participer à l'établissement de ces difficultés (Fourneret, 2018). Il a été montré que ces différences ne semblaient pas s'établir de façon aléatoire, mais avaient au contraire statistiquement tendance à être fortement liées aux caractéristiques socio-économiques familiales (Bernigole, Bret, Chabanon, Roussel, & Verlet, 2019; Peña-López, 2019b). L'ampleur de ce phénomène de disparités interfamiliales est telle qu'il se donne à lire à travers les recommandations françaises officielles du Ministère de l'Éducation nationale. Celles-ci placent désormais la « coopération avec les parents d'élèves » comme une des compétences fondamentales, au sein du référentiel de « compétences professionnelles » à maîtriser par les Professeurs des Écoles (Ministère de l'Éducation nationale, 2013), supposant ainsi un phénomène de « coéducation » entre école et famille (Maire Sandoz, 2017). Plus encore, parmi les six priorités recensées dans le référentiel pour l'éducation prioritaire cette notion de coopération avec les familles apparaît en troisième place (Ministère de l'Éducation nationale, 2014).

Si les inégalités de réussite en mathématiques ne sont pas nouvelles, ces dernières années on assiste cependant à une transition avec une inflexion des politiques publiques françaises sur cette problématique. À titre d'illustration, le référentiel pour l'éducation prioritaire précédemment mentionné (Ministère de l'Éducation nationale, 2014) plaçait « l'acquisition du lire, écrire, parler » comme priorité absolue, mais ne présentait aucune mention ayant trait aux nombres ou aux mathématiques. Face au constat de la baisse du niveau général et de l'accroissement des inégalités de réussite en mathématiques, un rapport récent du Sénat a recommandé d'inscrire cette discipline comme « priorité nationale » en mettant l'accent sur le caractère fondamentalement cumulatif de son apprentissage (Villani, Torossian, & Dias, 2018). Ce rapport s'est notamment traduit en l'instauration d'une « année des mathématiques » (sur l'année scolaire 2019-2020), mais aussi en la publication de « recommandations pédagogiques » concernant le cycle de scolarisation en maternelle (Cycle 1, en complément du programme de 2015). La « découverte et l'utilisation des nombres » sont donc désormais formalisées comme relevant d'un apprentissage « fondamental » avant l'entrée en école élémentaire (Ministère de l'Éducation nationale, 2019). De façon tout à fait surprenante cependant, la notion de partenariat avec la famille est absente ; tout au plus celle-ci se traduit dans un souci de rendre « accessibles » et compréhensibles aux parents les résultats de leur enfant en mathématiques.

Pourtant, les données de cohortes internationales et nationales convergent à montrer que la réussite en mathématiques des enfants, quel que soit leur âge, apparaît fortement corrélée aux caractéristiques socio-économiques familiales. Face à un tel constat, ces vingt dernières années de nombreux travaux de recherche, comportementaux et en neuro-imagerie, ont visé à identifier les domaines cognitifs les plus susceptibles d'être liés à ces différences familiales. De telles disparités ont été majoritairement analysées à travers le prisme du domaine langagier (Farah, 2017; Korous, Causadias, Bradley, Luthar, & Levy, 2020; Merz, Wiltshire, & Noble, 2019), mais relativement peu d'études ont cherché à identifier les différences socio-économiques dans le domaine des mathématiques. Il a été également proposé d'expliquer les disparités socio-économiques des résultats en mathématiques par le biais de leurs « composantes verbales » (N. C. Jordan & Levine, 2009).

Plus récemment, la focale d'étude de la famille a été déplacée sur des caractéristiques moins « distales » que les seules caractéristiques socio-économiques. Des éléments de l'environnement familial susceptibles d'influencer le développement des compétences de l'enfant de façon plus « proximale » ont ainsi pu être identifiés (p. ex. le stress, la nutrition, le sommeil ou l'exposition aux toxines ; Farah, 2017). La famille comme « environnement d'apprentissage » s'est par ailleurs établie comme objet d'étude à part entière ; apprentissage entendu d'abord au sens large (Melhuish et al., 2008) ou restreint à des domaines plus spécifiques, comme la littératie (Sénéchal, 2006b) ou la numératie (LeFevre et al., 2009). Plus concrètement, les travaux de ce champ de recherche ont été consacrés à la famille comme lieu quotidien d'expériences d'apprentissage de l'enfant ; indépendamment de toute notion de « co-éducation » avec la sphère scolaire précédemment évoquée. Dans ce cadre, les activités familiales d'apprentissage ne sont pas assimilées à l'investissement parental dans la scolarité de leur enfant, que ce soit à travers leur présence directe au sein de la sphère scolaire ou dans l'aide apportée aux devoirs à la maison. Les études sur les caractéristiques de l'environnement

familial en numératie ont augmenté de façon exponentielle ces dix dernières années et ont suggéré l'existence de liens entre les compétences mathématiques des enfants et différentes caractéristiques de l'environnement familial d'apprentissage en numératie. Néanmoins, parmi ces nombreuses études, les mesures employées ont été très variables (que ce soit pour quantifier certains aspects de l'environnement familial ou pour évaluer certains types de compétences mathématiques des enfants) et ont conduit à des résultats relativement hétérogènes (Daucourt, Napoli, Quinn, Wood, & Hart, 2021; L. Elliott & Bachman, 2018a; Mutaf-Yıldız et al., 2020). Par ailleurs, la proposition de Jordan et Levine (2009) sur la composante fondamentalement verbale des disparités de réussite mathématique n'a jamais été formellement testée à travers cette littérature. La question des mécanismes de la relation entre environnement familial et habiletés numériques reste donc en suspens : cette relation peut-elle s'expliquer par des composantes numériques ? Ou bien cette relation ne peut-elle se comprendre qu'à travers les composantes verbales des mathématiques ?

L'objectif de cette thèse était d'évaluer la relation entre environnement familial d'apprentissage en numératie et compétences mathématiques des enfants, en veillant à tenir compte des limites de la littérature existante, notamment concernant l'hétérogénéité des protocoles précédemment utilisés. Pour cela, nous avons, dans un premier temps, cherché à évaluer cette relation avec la plus grande exhaustivité dans la mesure des deux composantes de la relation (caractéristiques familiales et habiletés numériques), mais aussi dans la mesure de nombreuses variables susceptibles d'avoir des effets confondants (p. ex. des facteurs cognitifs non numériques chez l'enfant et des activités familiales non dédiées à la numératie). À l'aide d'un protocole de neuro-imagerie, nous avons également souhaité interroger les mécanismes cérébraux sous-jacents à cette relation, tout en veillant à contrôler là aussi pour plusieurs variables potentiellement confondantes. Dit autrement, nous avons cherché si les médiateurs neuronaux de la relation entre caractéristiques de l'environnement familial et compétences mathématiques de l'enfant permettaient de suggérer une relation spécifiquement numérique.

Ce manuscrit est organisé en trois parties : une partie théorique, une partie expérimentale et une discussion générale.

La partie théorique propose, à travers quatre chapitres, une revue des études de cohorte, des études de psychologie et de neurosciences cognitives ayant permis d'identifier les différentes composantes de la cognition numérique et d'explorer leurs relations avec l'environnement familial (évalué à travers différentes échelles).

Le premier chapitre, après une brève définition de la notion de statut socio-économique et les grandes lignes de ses caractéristiques en France, décrit les données de plusieurs études de cohortes (internationales et françaises) qui illustrent le phénomène considérable de corrélation des compétences mathématiques des enfants, à tout âge, avec les caractéristiques socio-économiques de leur foyer. En dépit des caractéristiques « universelles » de ce phénomène, sont également présentées des données indiquant que le système scolaire français semble particulièrement en difficulté face à l'ampleur de ces disparités de réussites en mathématiques. Le deuxième chapitre propose un état des lieux des connaissances actuelles sur le développement neurocognitif de la cognition numérique chez l'enfant, dès le plus jeune âge et jusqu'à la scolarité élémentaire. Le troisième chapitre présente les travaux ayant évalué les

relations entre le développement neurocognitif des enfants et leur environnement familial caractérisé par la mesure des seules caractéristiques socio-économiques (distales). À partir du postulat théorique selon lequel les composantes verbales des habiletés numériques seraient davantage liées aux disparités socio-économiques familiales (N. C. Jordan & Levine, 2009), ce chapitre dresse une synthèse des travaux ayant testé les relations entre différentes composantes numériques et les inégalités entre foyers. Le quatrième chapitre expose les travaux ayant visé à étudier l'environnement familial à l'aide de caractéristiques plus « proximales » et liées, plus ou moins directement, aux expériences d'apprentissage des enfants au sein de leur famille. Sont ainsi brièvement présentés les travaux sur l'environnement familial d'apprentissage au sens large et dédié au domaine de la littératie qui ont, historiquement, permis la fondation du champ de recherche sur l'environnement familial de numératie. Ce champ de recherche, qui fait par ailleurs l'objet de très nombreux travaux ces dernières années et dans le cadre duquel notre travail expérimental vise à s'inscrire, est présenté de façon exhaustive afin d'identifier ses enseignements, mais aussi ses incohérences et certaines limites inhérentes aux études réalisées jusqu'alors. Enfin, pour conclure l'ensemble de cette partie théorique, une synthèse de celle-ci ainsi que nos hypothèses de travail sont présentées.

La partie expérimentale présente le travail effectué dans le cadre de cette thèse. Dans une première étude, présentée dans le chapitre 5, nous avons cherché à caractériser de façon exhaustive et préciser les caractéristiques de l'environnement familial d'apprentissage en numératie, les sous-composantes des habiletés numériques des enfants et identifier les relations entre ces deux ensembles de variables. Dans une deuxième étude, présentée dans le chapitre 6, nous avons voulu utiliser des mesures de neuro-imagerie pour interroger le postulat théorique selon lequel la relation entre environnement familial et compétences numériques s'expliquerait uniquement par les composantes verbales de ces compétences (N. C. Jordan & Levine, 2009).

Enfin, la discussion générale nous permet de discuter nos résultats expérimentaux et de les mettre en perspective avec la littérature existante.

Chapitre 1 : Statut socio-économique et disparités de réussite mathématique au sein des cohortes internationales et françaises

La notion de « statut socio-économique » recouvre des mesures variées et celles-ci ont pu être mises en lien avec des disparités dans les compétences des enfants en mathématiques. Dans ce chapitre, nous proposons une définition de cette notion et de l'intérêt des mesures utilisées. Nous présentons également quelques repères concernant la variabilité des situations socio-économiques en France, du point de vue des disparités de revenus et de diplômes. Nous présentons ensuite les relations statistiques établies entre variations socio-économiques et compétences mathématiques des enfants, à partir de données de cohortes internationales et françaises.

1. Statut socio-économique

1.1. Définitions et mesures du statut socio-économique

Historiquement, la façon principale de caractériser l'environnement familial de l'enfant a consisté à utiliser la notion de « statut socio-économique » (SES) familial (pour revue, voir Bradley & Corwyn, 2002; Brito & Noble, 2014). À l'aide d'une mesure « quantifiée », le principe est de positionner chaque famille (ou n'importe quel individu) au sein de l'échiquier social d'une société déterminée, englobant ainsi des paramètres supposés découler de cette « position » : notion d'accès aux ressources sociales et économiques, de positionnement social, d'accès à certains privilèges ou prestiges (American Psychological Association, 2007; Duncan & Magnuson, 2012). Aux termes de « position » ou de « statut », il a parfois été préféré le terme de « capital » socio-économique (J. S. Coleman, 1988; cité par Bradley & Corwyn, 2002), pour englober à la fois la notion de capital financier (supposée représenter les ressources matérielles dont dispose une famille), ainsi que celle de capital humain ou social (qui représente des ressources immatérielles, comme l'éducation).

Pour quantifier ce statut socio-économique, plusieurs indices peuvent être pris en compte. *A minima*, les indices les plus couramment utilisés (de façon combinée ou séparée) sont le niveau de revenu et le niveau d'étude du ou des parent/s, voire leur statut occupationnel (Hackman & Farah, 2009). Par exemple, l'index Hollingshead utilisé dans de nombreuses

études développementales (p. ex. Demir-Lira, Prado, & Booth, 2016; Hoff, 2003; Jednoróg et al., 2012; Noble, McCandliss, & Farah, 2007; Noble, Norman, & Farah, 2005; Noble, Wolmetz, Ochs, Farah, & McCandliss, 2006; Sarsour et al., 2011) est un score pondéré du « prestige » du statut occupationnel et du niveau d'étude (Hollingshead, 1975). Un autre exemple plus contemporain est l'indicateur « économique, social et culturel » utilisé dans les études menées par l'Organisation de Coopération et de Développement Économique (OCDE ; « Programme International pour le Suivi des Acquis des élèves » ou étude PISA). Cet indicateur combine les 3 indices suivants : niveau de diplôme le plus élevé des parents, statut professionnel le plus élevé des parents ainsi que certaines possessions matérielles du foyer (comme un ordinateur, un instrument de musique ou encore une œuvre d'art, ainsi que la quantité de livres possédés au domicile). Dans le cadre des études PISA, ces indicateurs sont ensuite combinés à partir d'une analyse par composantes principales ou par une pondération à poids égaux (voir Avvisati, 2020; voir aussi Annexe A1 chez Peña-López, 2019a).

De façon générale, parmi les indicateurs utilisés pour mesurer le SES, le niveau d'étude est souvent le plus utilisé, car son évaluation est souvent considérée comme moins « compliquée » que celle du niveau de revenu (Hauser, 1994). Ces deux indicateurs présentent par ailleurs une forte inter-corrélation (Bradley & Corwyn, 2002; Braveman et al., 2005) et certaines études ont pu proposer une mesure du SES qui s'affranchissait de la mesure du revenu. Néanmoins, il a aussi été défendu que le niveau de revenu et le niveau de salaire pourraient malgré tout expliquer des phénomènes sous-jacents bien distincts et gagneraient à ne pas être interchangeables au sein des mesures du SES (Bradley & Corwyn, 2002; Braveman et al., 2005). Plus encore, il a été recommandé d'étudier leurs effets de façon conjointe, sans les combiner en une seule variable, afin de ne pas risquer de masquer des voies d'influence distinctes (O'Connell, 2019; Sirin, 2005).

L'indicateur SES a parfois été enrichi par la répétition des mesures du niveau de salaire et d'étude (susceptibles d'évoluer dans le temps), par des indicateurs de la qualité du voisinage, des informations sur le nombre d'enfants par foyer ou d'autres caractéristiques de la structure familiale, ainsi que par des relevés concernant certains types de possessions matérielles (comme le nombre de livres ; Gustafsson, Nilsen, & Hansen, 2018). À l'inverse, la variable SES a parfois été estimée à l'aide de mesures « intermédiaires » disponibles et considérées comme susceptibles d'être fortement corrélées au niveau SES, par exemple par la prise en compte des critères d'éligibilité de certains enfants pour des repas fournis gratuitement ou à prix réduit dans le cadre scolaire (Duncan & Magnuson, 2012; Pungello, Kupersmidt, Burchinal, & Patterson, 1996). Ces mesures « intermédiaires » ont toutefois été critiquées pour leur manque de fiabilité (Hauser, 1994).

Bien qu'une grande hétérogénéité subsiste au sein des diverses mesures SES utilisées (S. Thomson, 2018), il importe de souligner que celles-ci pourraient concourir à des observations très similaires (notamment en ce qui concerne les différences interindividuelles de réussite scolaire) et conserveraient ainsi tout leur intérêt (Brito & Noble, 2014). À l'aide d'une méta-analyse récente, il a par exemple été démontré que, quel que soit l'indicateur SES utilisé (niveau de diplôme, niveau de salaire ou statut occupationnel), les résultats obtenus entre les études étaient largement cohérents (Chmielewski, 2019). À ce propos, soulignons que les études

que nous allons rapporter tout au long de ce manuscrit seront représentatives de cette hétérogénéité dans leurs mesures du SES familial.

1.2. Données sur les inégalités socio-économiques en France

Concernant les niveaux moyens de revenus, la France se situerait dans la moyenne des pays européens (Beffy, Clerc, & Thévenot, 2014; OCDE, 2016; voir **Figure 1**). Cette mesure recouvre néanmoins un phénomène d'inégalités persistantes, en matière d'emplois et de revenus d'activités (voir **Figure 2.A** ; tirée de Demaison et al., 2017). Les inégalités de revenus d'activités ne seraient que partiellement modérées par le système de redistribution : le système de redistribution français corrigerait les inégalités les plus marquées en soutenant le niveau de vie des ménages les plus pauvres (les transferts monétaires vers les ménages les plus démunis permettant, après redistribution, de maintenir le taux de pauvreté relativement bas ; Causa & Hermansen, 2017). En 2019, la redistribution ferait ainsi baisser les inégalités mesurées par l'indice de Gini (-0.103 ; Demaison, Grivet, Lesdos, & Maury-Duprey, 2020). Néanmoins le système de redistribution français ne corrigerait pas l'ensemble des inégalités¹ (Boone & Goujard, 2019). En 2018, 14.8% de la population en France métropolitaine (soit 9.3 millions de personnes) vivait sous le seuil de pauvreté de 1063 euros par mois (c.-à-d. 60% du niveau de vie médian ; Demaison et al., 2020). À titre comparatif, au niveau européen, le taux de pauvreté général est de 17%.

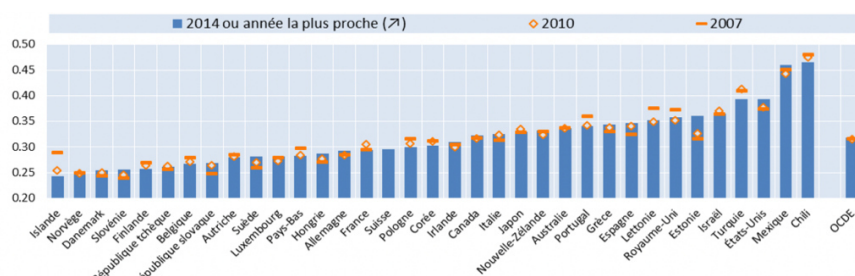


Figure 1 : Figure tirée de OCDE (2016) représentant le coefficient de Gini du revenu disponible (une mesure du niveau d'inégalité de la répartition du revenu dans la population²) en 2014 (ou année la plus proche) sur la population totale au sein de différents pays de l'OCDE.

Par ailleurs, il importe de noter que près d'une personne sur cinq appartient à la catégorie de revenu médian en 2014 (**Figure 2.A** ; tirée de Demaison et al., 2017). Homogène en ce qui concerne le niveau de revenu, cette catégorie pourrait être bien plus hétérogène sur d'autres

¹ En 2018, 66% des personnes bénéficiant du système de redistribution via le revenu de solidarité active vivent sous le seuil de pauvreté (Demaison, Grivet, Lesdos, & Maury-Duprey, 2020).

² Définition de l'indice de Gini (d'après Demaison et al., 2020) : « L'indice de Gini varie entre 0 et 1. Il est égal à 0 dans une situation d'égalité parfaite où tous les niveaux de vie seraient égaux. À l'autre extrême, il est égal à 1 dans la situation la plus inégalitaire possible, celle où tous les niveaux de vie sauf un seraient nuls. Entre 0 et 1, l'inégalité est d'autant plus forte que l'indice de Gini est élevé. »

dimensions, incluant notamment le niveau de diplôme. Ce dernier aurait globalement augmenté au fil des générations au sein de la population française. Par exemple, en 2019, seuls 13% des 25-34 ans n’avaient pas de diplôme ou seulement le brevet alors qu’ils étaient 31% parmi les 55-64 ans (Demaison et al., 2020). Pour autant, cette progression globale n’efface pas la persistance des disparités en ce qui concerne le niveau de diplôme au sein de la population globale : en 2020, près de 20% de la population française détenait, au mieux, le brevet des collèges tandis qu’un peu plus de 20% avait un niveau au moins équivalent à une licence universitaire (voir **Figure 2.B**; tirée de Insee, 2021). Par ailleurs, un phénomène de « reproduction » des inégalités de diplôme peut être objectivé : les inégalités dans le niveau d’étude des enfants seraient particulièrement liées au niveau d’étude de leurs parents (Demaison et al., 2020). Cette observation souligne l’enjeu de compréhension des relations entre différents indicateurs SES, mais aussi, de façon plus générale, la nécessité de décomposer et de proposer des pistes d’interprétation aux relations entre caractéristiques socio-économiques familiales et réussite scolaire des enfants.

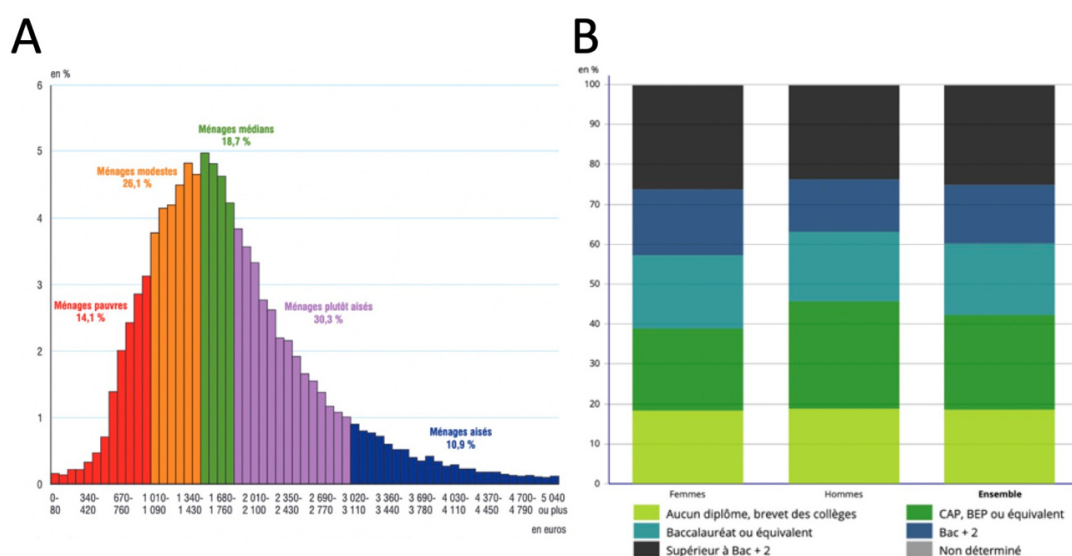


Figure 2 : **A.** Figure tirée de Demaison et al. (2017), représentant la distribution des niveaux de vie mensuels en France en 2014, répartis en 5 catégories : ménages « pauvres », « modestes », « médians », « plutôt aisés » et « aisés ». **B.** Figure tirée de Insee (2021), représentant le niveau de diplôme le plus élevé obtenu en 2020 en France, en population générale et selon le sexe (données : France, hors Mayotte, personnes vivant en logement ordinaire de 25 à 64 ans).

2. Les liens entre SES familial et réussite en mathématiques chez l’enfant

Depuis plusieurs dizaines d’années, la mise en place de protocoles de suivi de grandes cohortes longitudinales a permis d’étudier l’effet du facteur SES sur le développement des enfants. Si ces effets ont pu être mis en évidence dans les domaines de la santé, du développement socio-émotionnel ou comportemental (Isaacs & Magnuson, 2011), ce sont avant

tout les mesures de réussites scolaires dans le domaine des mathématiques qui seront l'objet de notre intérêt ici.

Les études examinant l'association entre SES et réussite scolaire se sont historiquement concentrées sur certains jalons académiques, notamment ceux de la réussite scolaire globale (Brooks-Gunn & Duncan, 1997). Dans une méta-analyse regroupant près de 200 études publiées au cours du 20^e siècle (de 1918 à 1976), White (1982) a pu mettre en évidence un lien relativement faible, mais reproductible, entre SES et réussite académique (et ce à travers des études couvrant des époques très hétérogènes). Plus précisément, d'après cette méta-analyse, le SES familial pouvait expliquer environ 5% de la variance dans la réussite académique des enfants au cours de cette large période (White, 1982). Une seconde méta-analyse ciblant 58 études sur une période plus courte et plus homogène (études publiées entre 1990 et 2000 et représentant 74 échantillons indépendants) a montré quant à elle un lien entre SES et réussite académique dont la taille d'effet¹ était qualifiée de moyenne à forte par l'auteur (de $r=.22$ à $r=.35$ selon le score académique considéré ; Sirin, 2005). Ce dernier soulignait l'intérêt de décomposer le score de réussite académique dans l'analyse de sa relation avec le SES familial : la taille d'effet de la relation augmentant lorsque le score de réussite en mathématiques était considéré de façon distincte ($r=.35$ contre $r=.22$ pour un score général et $r=.32$ pour la réussite verbale). Enfin plutôt qu'un affaiblissement avec le temps, la relation entre réussite académique et SES aurait tendance à augmenter significativement pour chaque année de scolarisation supplémentaire (Heckman, 2006).

Ces vingt dernières années, de nombreuses études de cohortes longitudinales ont permis d'enrichir la compréhension des liens entre indicateurs SES et compétences scolaires, de façon précoce et ensuite au cours de toute la scolarisation : ces études feront l'objet d'un exposé tout au long de cette section. Ces cohortes récentes ont précisé le type de « réussite scolaire » évalué, en dissociant *a minima* la composante mathématique et celle de lecture. Elles ont parfois également dissocié les différents indicateurs composant le SES. De façon générale, l'existence d'une relation de covariation entre caractéristiques socio-économiques et réussite scolaire a été rapportée tant en lecture qu'en mathématiques (avec une tendance à un effet néanmoins plus marqué en mathématiques, Chmielewski, 2019; Reardon, 2011). Nous proposons ici un état des lieux des résultats récents fournis par l'analyse de cohortes sur la question spécifique du poids des facteurs socio-économiques dans la réussite en mathématiques, d'après le niveau de scolarisation des enfants étudiés. Ces résultats sont d'abord présentés dans une perspective internationale, puis seront davantage ciblés sur les résultats des écoliers français².

2.1. Avant l'entrée en maternelle

L'analyse de données de cohortes longitudinales a permis de montrer que les disparités socio-économiques dans les compétences cognitives des enfants, et notamment en

¹ Cohen (1992; 2013) a proposé les repères de r de Pearson de 0.10 ; 0.30 ; et 0.50 pour délimiter les effets faibles, moyens et importants, respectivement.

² Pour faciliter la lecture, tous les niveaux scolaires seront indiqués dans ce manuscrit en équivalent français (voir **Tableau A1** dans **annexe 1** pour conversion avec le système américain).

mathématiques, existent de façon très précoce. À partir des données sur 753 enfants âgés de 3 à 5 ans en 1997 de la cohorte américaine American Panel Study of Income Dynamics, il a été établi que les niveaux de salaire des parents étaient directement liés aux scores en mathématiques de leur enfant (Yeung, Linver, & Brooks-Gunn, 2002). Les données de la cohorte canadienne Quebec Newborn Twin Registry ont également permis de mettre en évidence que les compétences en mathématiques à l'entrée à l'école étaient en grande partie liées aux caractéristiques socio-économiques familiales (Lemelin et al., 2007). Des résultats récents issus de la cohorte Boston University Twin Project ont montré que le statut socio-économique familial était directement en lien avec les compétences préscolaires générales des enfants à 4 ans (Micalizzi, Brick, Flom, Ganiban, & Saudino, 2019). L'analyse de données fournies par la Early Childhood Longitudinal Study Kindergarten Cohort (ECLS-K, données sur la vague la plus récente 2010-2011 portant sur des enfants américains scolarisés en grande section) a permis de dissocier les effets du salaire et du niveau d'étude sur les compétences des enfants à l'entrée à l'école (Nores & Barnett, 2014). Il a ainsi été montré que le niveau de salaire avait un effet important sur les compétences des enfants (effet légèrement plus marqué en mathématiques qu'en lecture) et cela avant même le début de la scolarisation formelle. Comme le montre la **Figure 3**, les enfants issus des foyers les plus pauvres se situent à 0,4 écart-type (ET) sous la moyenne, tandis que leurs pairs issus des foyers les plus riches se situent à environ 0,4 ET au-dessus de la moyenne. Selon les auteurs, leur écart de performance représente près d'un écart-type, soit l'équivalent d'une différence d'âge de 20 mois pour un enfant entrant en maternelle (Nores & Barnett, 2014). Considérer l'effet du salaire comme un gradient continu permet aux auteurs de souligner que ce phénomène d'inégalités de compétences à l'entrée à l'école ne concerne pas uniquement les enfants vivant dans la plus grande précarité (Nores & Barnett, 2014). Par ailleurs, Nores et Barnett (2014) ont indiqué que le niveau de diplôme des parents aurait également un effet critique sur les compétences précoces de leur enfant. L'analyse de résultats antérieurs de cette même cohorte avait également permis de préciser les effets du facteur socio-économique familial sur différents indicateurs des compétences mathématiques chez l'enfant (p. ex. sens du nombre, connaissance de propriétés mathématiques, opérations arithmétiques; ECLS-K, première vague; kindergarten de 1998 à 1999; Galindo & Sonnenschein, 2015)¹.

¹ Pour définition de ces notions, voir le chapitre 2 portant sur le développement neurocognitif des compétences numériques chez l'enfant.

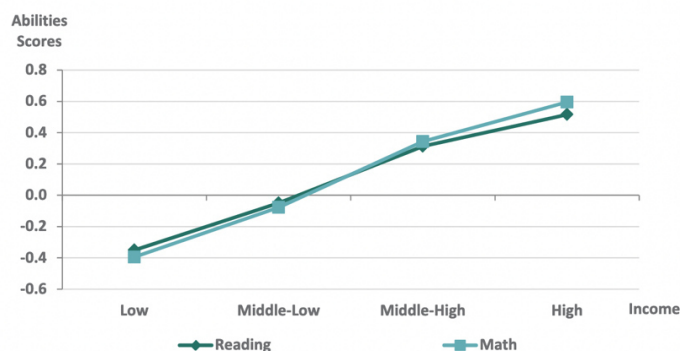


Figure 3 : Graphique tiré de Nores & Barnett (2014) présentant les moyennes aux tests de lecture et mathématiques pour des enfants américains selon le niveau de revenu de leur famille (« bas », « moyen-bas », « moyen-haut », « haut »). La courbe vert clair représente les scores en mathématiques, la courbe vert foncé représente les scores en lecture.

Une cohorte spécifique du programme ECLS a également visé à suivre les enfants américains de façon plus précoce : de leurs 9 mois (en 2001-2002) jusqu'à leur entrée à l'école élémentaire (Early Childhood Longitudinal Study- Birth, ECLS-B). L'analyse de ces données a permis d'identifier de nombreux facteurs prédictifs de la réussite en mathématiques à l'entrée à l'école. Parmi eux ont été retrouvés les facteurs clés du niveau de diplôme et du niveau de salaire des parents (Isaacs & Magnuson, 2011). En comparant le premier et le dernier quintile SES, il a été montré que les scores percentiles moyens en mathématiques passaient de 33 à 70 (Larson, Russ, Nelson, Olson, & Halfon, 2015). Enfin le Early Head Start Research and Evaluation Project, un suivi réalisé à partir de la fréquentation aux centres américains Early Head Start, a également permis de mettre en évidence le poids des caractéristiques socio-économiques de la famille sur les compétences précoces des enfants, 6 mois avant leur entrée en maternelle (Palermo, Ispa, Carlo, & Streit, 2018).

2.2. De l'entrée à la maternelle à la scolarisation primaire

À travers des données américaines tirées de la Early Childhood Longitudinal Study-Kindergarten Cohort (ECLS-K, multi-niveaux), il a été mis en évidence que le statut socio-économique familial était en lien avec des compétences mathématiques (comme les connaissances procédurales ou la résolution de problèmes) des enfants en début et en fin de grande section de maternelle, mais également au CP et au CE2 (Baker, 2015; Byrnes & Wasik, 2009; West, Denton, & Reaney, 2000). Environ la moitié des items sur lesquels les enfants étaient testés portait sur le sens du nombre, les propriétés des nombres et les opérations arithmétiques¹ ; tandis que l'autre moitié évaluait des connaissances en lien avec les mesures, la géométrie et le sens de l'espace, l'analyse des données, les statistiques et les probabilités, les modèles et les fonctions (US Department of Education, 2001). Les données de la première vague de cette même cohorte (première vague 1998-1999) avaient déjà permis de mettre en

¹ Pour une explication de ces notions, voir le chapitre 2.

évidence l'existence de fortes disparités selon le statut socio-économique dès l'entrée à l'école maternelle qui se maintenait et s'aggravait ensuite au cours de la scolarisation. Ainsi entre les enfants les plus favorisés et ceux les plus défavorisés, il était observé une différence moyenne de 1.34 ET en mathématiques à l'entrée à l'école et de 1.38 ET en fin d'école primaire (Duncan & Magnuson, 2011).

Des données issues de la cohorte américaine Early Child Care Research Network Cohort (NICHD) ont également montré un effet du salaire parental sur les scores cognitifs et langagiers des enfants de façon très précoce et avant le début de la scolarisation formelle : dès 24 mois, puis à 36 mois et à 54 mois. Ce lien entre salaires parentaux et scores chez l'enfant se maintenait ensuite après le début de la scolarisation formelle : au CP et au CE2 (National Institute of Child Health and Human Development Early Child Care Research Network, 2005). Des analyses ultérieures des données de cette même cohorte (NICHD) ont également souligné un lien entre niveau de diplôme des parents et réussite en mathématiques de leur enfant au CP (Waters, Ahmed, Tang, Morrison, & Davis-Kean, 2021). De façon générale, des constats similaires ont par ailleurs été renouvelés dans d'autres cohortes, par exemple canadiennes (Quebec Longitudinal Study of Child Development, Garon-Carrier et al., 2018) ou allemandes (Education Processes, Competence Development and Selection Decisions at Pre- and Primary School Age, BiKS ; Lehl, Ebert, Blaurock, Roszbach, & Weinert, 2020; ou « Projet School Ready Child » ; Niklas & Schneider, 2013, 2017).

2.3. Pendant la scolarisation primaire, jusqu'au secondaire et au-delà.

L'analyse de la première vague de la cohorte ECLS-K a permis de montrer qu'une accumulation des désavantages socio-économiques prédisait de faibles scores en mathématiques tout au long de la scolarisation à l'école primaire (Crosnoe & Cooper, 2010). De la même manière, l'analyse de données d'une large communauté d'enfants américains, scolarisés dans des écoles publiques élémentaires et suivis pendant leur scolarité (Patterson, Kupersmidt, & Vaden, 1990), a montré que le niveau du salaire parental était un facteur prédictif des difficultés en mathématiques pendant toute la scolarisation élémentaire (Pungello et al., 1996).

- *Des disparités au sein des familles les plus défavorisées*

De façon un peu plus précise, les données de la cohorte Family Life Project, portant spécifiquement sur certaines familles parmi les plus défavorisées résidant au sein d'aires rurales en Pennsylvanie et Caroline du Nord (USA), ont permis de discriminer des différences de réussite scolaire parmi les enfants issus de ces foyers. L'exposition précoce des enfants à certains risques considérés comme « liés à la pauvreté » (comme une instabilité du couple parental, un large nombre d'heures de travail, un faible prestige de l'emploi ou un ratio salaire-besoin du foyer insuffisant) prédisait leur réussite en mathématiques de nombreuses années plus tard, au CE1 (Perry, Braren, Blair, & Family Life Project Key Investigators, 2018).

- Une relation à long terme entre SES et réussite scolaire en mathématique

Les données de la cohorte NICHD ont également permis de montrer que la pauvreté précoce (pour des enfants entre 1 et 24 mois) était un prédicteur robuste de la réussite scolaire 10 années après. Crooks et Evans (2014) ont ainsi montré que, même en contrôlant pour le score de Quotient Intellectuel (QI) de l'enfant, le ratio revenu-besoin, mesuré lors des premiers mois de vie de l'enfant, prédisait sa réussite en mathématiques en CM2. Le niveau de diplôme obtenu par la mère permettait également de prédire la réussite en mathématiques de l'enfant à très long terme (au CE2 mais également à la fin du collège ; Blums, Belsky, Grimm, & Chen, 2017). En Italie, la cohorte INVALSI (Italian Institute for the Evaluation of Educational Assessment ; Cascella, 2020) a montré des configurations similaires de résultats (niveau de SES pendant l'enfance lié aux résultats en mathématiques en fin de primaire et en début de lycée). Une cohorte anglaise, la Effective Pre-school and Primary Education (EPPE), a suivi quelques 3000 enfants du début de la maternelle jusqu'à l'âge de 16 ans. À l'aide de ces données, Melhuish et collaborateurs (2008) ont pu identifier et comparer la taille d'effet de différents prédicteurs de la réussite mathématique de ces enfants à l'âge de 10 ans (voir **Figure 4**, tirée de Melhuish et al., 2008). Quelle que soit la mesure du SES familial précoce considérée (niveaux de diplôme des mères et niveaux de revenu familial, considérés de façon séparée ou combinée), celle-ci expliquait une part significative de la réussite en mathématiques de l'enfant à 10 ans.

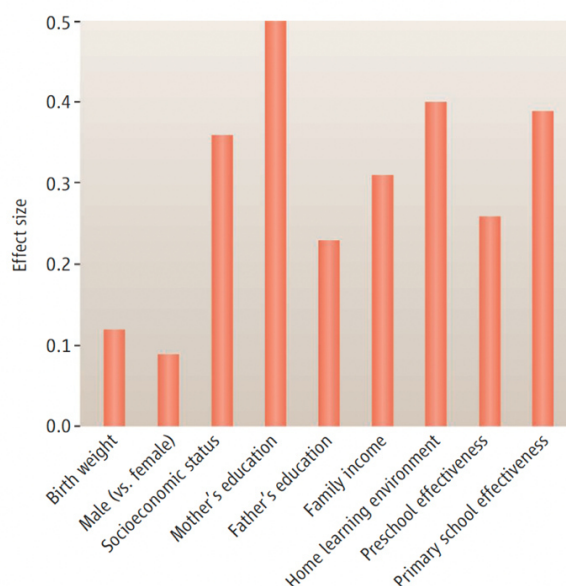


Figure 4 : Graphique tiré de Melhuish et al. (2008) présentant la taille d'effet (en écarts-types) de différents prédicteurs sur la réussite en mathématiques des enfants à 10 ans. N=2558

- *Une tendance à l'accentuation des disparités socio-économiques au cours de la scolarisation*

Une cohorte canadienne (la National Longitudinal Study of Children and Youth) a permis d'informer sur l'évolution des inégalités socio-économiques dans la réussite académique au-delà de la scolarisation primaire (Caro, McDonald, & Willms, 2009), à partir de l'évaluation d'un large panel de compétences mathématiques des enfants entre les âges de 7 et 15 ans. Cette cohorte a montré que l'effet du SES sur les inégalités scolaires restait stable jusqu'à 11 ans et augmentait ensuite graduellement. Des résultats similaires ont été trouvés à travers les données anglaises de la cohorte Twins' Early Development Study (Stumm, Rimfeld, Dale, & Plomin, 2020), mais également par celles des cohortes américaines, High School Longitudinal Study (Barr, 2015) et National Education Longitudinal Study (Crosnoe & Schneider, 2010). Cette dernière cohorte montrait d'importantes disparités à un test mathématique standardisé en fin de collège : les adolescents issus des milieux les plus favorisés dépassaient de 20 points en moyenne leurs pairs moins favorisés. De plus, les adolescents plus favorisés avaient également tendance à choisir davantage des cours d'algèbre (optionnels dans le système américain) et surtout à poursuivre ensuite leur scolarisation dans le supérieur (et cela même à compétences équivalentes au lycée ; Crosnoe & Schneider, 2010).

2.4. Les résultats en France

Nous proposons deux manières d'étudier les résultats des écoliers français : la première à l'aide de deux études internationales qui autorisent la comparaison avec d'autres pays de l'Union européenne, la seconde à l'aide de résultats d'enquêtes exclusivement françaises.

2.4.1. Les données PISA

En 2000, l'OCDE a créé le programme PISA. Depuis, tous les trois ans des élèves de 15 ans sont évalués, à travers de nombreux pays (membres de l'OCDE, mais également pays partenaires : voir **Figure 5** du panel 2018, issue de Peña-López, 2019b) sur leurs compétences en compréhension de l'écrit et en « culture » mathématique et scientifique. Au sein d'une classe d'âge arrivant en fin de scolarité obligatoire dans la plupart des pays concernés et plutôt que d'évaluer les acquis scolaires au sens strict (degré d'atteinte des objectifs académiques), l'objectif du programme PISA est de mesurer la capacité des élèves à utiliser ces connaissances dans des situations variées. À l'aide de questionnaires, de nombreux facteurs susceptibles d'influencer leurs performances sont également pris en compte, notamment des indicateurs du SES familial (l'indicateur utilisé est décrit plus en détail dans la section 1.1 de ce chapitre).

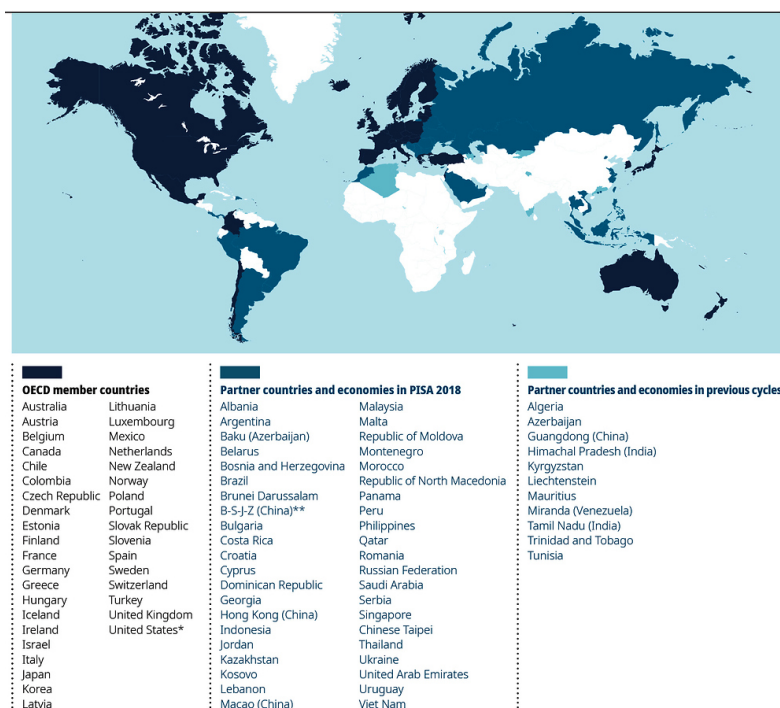


Figure 5 : Figure tirée de Peña-López (2019b) listant les différents pays ayant participé aux évaluations PISA (pays OCDE et hors OCDE).

Dès sa création (Cocks et al., 2003) et ensuite lors des vagues ultérieures (Kalaycioglu, 2015; Kang & Cogan, 2020; Martins & Veiga, 2010), les données PISA ont permis de renouveler le constat du poids des facteurs socio-économiques dans les inégalités de réussite scolaire, notamment en mathématiques, et cela à travers la majorité des pays étudiés. Lors de la vague la plus récente (de 2018), ce sont 252 établissements français qui ont participé à l'enquête, soit plus de 6000 élèves (tirés au sort, publics ou privés sous contrat ; au collège ou en lycée agricole, général, technologique ou professionnel). Après avoir baissé depuis 2003 (score alors de 511 points), le score moyen des étudiants français en « culture mathématique » est apparu stable comparativement aux dernières vagues d'évaluation (495 en 2018 ; 493 en 2015 et 495 en 2012). Cette capacité des élèves français à mobiliser leurs acquis mathématiques dans des situations de la vie réelle se situe légèrement au-dessus du score moyen de l'ensemble des pays de l'OCDE (score de 493). Néanmoins cette moyenne recouvre de larges disparités entre les élèves. En France, une part considérable de la variance dans la réussite en mathématiques pourrait être expliquée par le SES familial. Le programme PISA propose le calcul d'un indicateur de la relation entre disparités socio-économiques et performances de l'élève : l'écart de score en mathématiques associé à la variation d'une unité de l'indice SES. En France, cet indicateur est de 47 points (soit, pour une variation d'une unité de l'indice SES, un écart de 47 points de scores en mathématiques). Cet indicateur place la France parmi les pays de l'OCDE où le poids des facteurs SES dans la réussite en mathématiques est le plus élevé (en moyenne pour l'OCDE, un écart d'un point de l'indice SES est associé à un écart de 36 points en mathématiques, soit 11 points de moins que pour la France ; Bernigole et al., 2019). Le rapport officiel de PISA 2018 indique que le SES familial permettait d'expliquer, en moyenne, 13.8% des performances en mathématiques au sein des pays de l'OCDE.

Comparativement en France (mais aussi en Argentine, en Belgique, en Hongrie, au Pérou et en Slovaquie), le SES familial prédisait plus de 20% de la réussite en mathématiques (Peña-López, 2019b). De façon générale, le programme PISA donne à voir l'importance des disparités socio-économiques dans la réussite en mathématiques au sein de l'ensemble des pays de l'OCDE. La France occupe cependant une place préoccupante au sein du palmarès des pays où ces disparités ont le plus de poids. En conclusion de cette section, rappelons néanmoins, le caractère « non conventionnel » de l'évaluation réalisée dans le cadre de ce programme (celle d'une « culture des mathématiques » plutôt qu'une évaluation « scolaire »).

2.4.2. Les données TIMMS

Créée en 1995 par une organisation internationale indépendante (l'International Association for the Evaluation of Educational Achievement), l'étude Trends in International Mathematics and Science Study (TIMMS) évalue tous les 4 ans les performances des élèves de CM1 et de 4^e sur les acquis attendus d'après les programmes d'enseignement de mathématiques et de sciences communs aux pays participants (acquis scolaires au sens strict donc, contrairement aux compétences évaluées dans le cadre du programme PISA). La France n'a participé qu'aux éditions de 1995, 2015 (CM1 seulement) et 2019.

Deux constats marquants peuvent être faits à partir des données fournies par TIMMS. Le premier constat est que le niveau moyen des élèves français, en CM1 (**Figure 6**) comme en 4^e, se situe en dessous de la moyenne des pays européens/de l'OCDE (au CM1 : 485 points en France versus une moyenne de 527 ; en 4^e : 483 points en France versus une moyenne de 511 ; Colmant & Le Cam, 2020; Salles, Le Cam, & France, 2020). Le deuxième constat est que, dès la première édition incluant les écoliers français (Schiller, Khmelkov, & Wang, 2002; Yang, 2003) et à travers les éditions suivantes (Kang & Cogan, 2020; Mullis, Martin, Foy, & Hooper, 2016; Mullis, Martin, Foy, Kelly, & Fishbein, 2020), la France se caractérise par un effet remarquablement constant des différences de diplômes parentaux sur la réussite en mathématiques des enfants. En 2019, en France, le score moyen des élèves issus des écoles les plus défavorisées socialement (c.-à-d. comportant plus de 25% d'élèves socialement défavorisés et moins de 25% d'élèves socialement favorisés¹) est parmi les plus faibles de pays de l'OCDE (Mullis et al., 2020). Un effet du genre est relevé en France (écart de 14 points supérieurs pour les garçons en moyenne en CM1 et de 8 points en 4^e), mais cet effet est sans commune mesure avec celui du milieu socio-économique (119 points d'écarts entre milieux favorisés et défavorisés en CM1 et 102 points d'écart en 4^e).

Les résultats de cette deuxième cohorte permettent par ailleurs de proposer une relecture des résultats de l'étude PISA : le poids des caractéristiques socio-économiques dans la réussite en mathématiques des élèves français évalués au sein de l'étude PISA ne peut pas s'expliquer par le seul caractère « atypique » du type d'évaluation mathématique réalisée. En effet, des résultats similaires en termes d'inégalités socio-économiques sont également obtenus dans les

¹ D'après les informations sur le milieu socio-économique des élèves fournies par les directeurs d'établissement via un questionnaire (M. O. Martin, von Davier, & Mullis, 2020).

données TIMSS et cela à partir d'évaluations scolaires plus « traditionnelles » et à des âges différents.

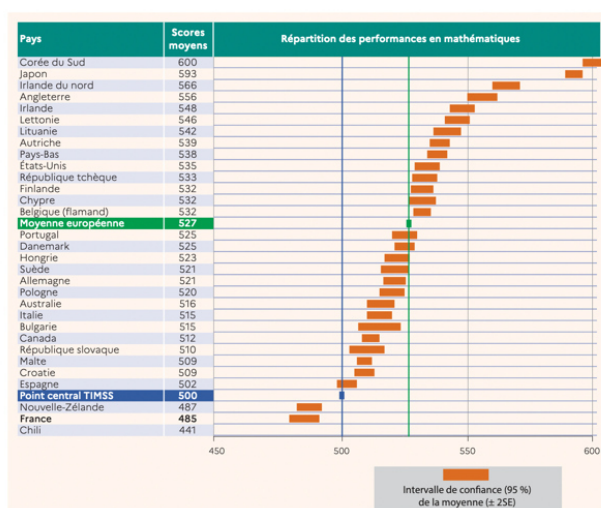


Figure 6 : Figure tirée de Colman et Le Cam (2020) indiquant la répartition des performances en mathématiques des élèves scolarisés en CM1 dans les pays de l'Union européenne ou de l'OCDE. La moyenne de la France (485) se situe en dessous de la moyenne européenne (527). Le rectangle orange représente l'intervalle de confiance autour de la moyenne.

2.4.3. Les données françaises

Enfin, des études françaises menées par la Direction de l'Évaluation, de la Prospective et de la Performance (DEPP) éclairent également sur la dispersion des résultats des écoliers français. Parmi elles, depuis 2003 est réalisé le Cycle des Évaluations Disciplinaires Réalisées sur Échantillons (CEDRE) sur les élèves en dernière année de collège et d'école primaire. À partir des données de la cohorte la plus récente (en 2019), le constat établi est celui d'une baisse des performances en mathématiques. De plus cette baisse n'affecterait pas les écoles accueillant les élèves issus des milieux socio-économiques les plus favorisés et les écarts de performance objectivés seraient susceptibles de s'expliquer par le profil des écoles (Ninnin & Salles, 2020). Enfin, ce constat d'une relation entre différences de milieux socio-économiques et performances des élèves français en mathématiques a été renouvelé sur des données obtenues à l'automne 2020 auprès de 800 000 élèves en sixième (Andreu et al., 2021).

En conclusion, l'ensemble des données internationales et nationales recensées dans ce chapitre désignent l'importance du facteur socio-économique familial dans les compétences mathématiques des enfants, dès leur plus jeune âge et avant le début de toute scolarisation formelle, mais également tout au long de leur scolarité (et jusqu'aux études supérieures). Ces inégalités, ayant tendance à se maintenir (voire s'aggraver ; Sirin, 2005) au fur et à mesure de l'avancée en scolarisation, pourraient indiquer que l'école ne parviendrait pas à gommer les différences préexistantes au début de la scolarisation. Ce constat n'est pas nouveau et ces inégalités semblent se pérenniser (Schleicher, 2019) ou se creuser (Chmielewski, 2019; Peña-López, 2019b; Reardon, 2011), à travers les époques, les pays et les diverses réformes scolaires

engagées. Depuis les années 2000, les enquêtes internationales mettent néanmoins en lumière que ces inégalités n'ont pas (ou plus) le même poids à travers les différents pays de l'OCDE. La France se distinguerait ainsi de la plupart des autres pays de l'OCDE par la part conséquente de la variabilité de réussite en mathématiques de ses écoliers susceptible d'être expliquée par les inégalités socio-économiques familiales (Bernigole et al., 2019; Peña-López, 2019b).

À la lecture de ces très nombreuses données issues de cohortes, internationales ou françaises, il apparaît nécessaire de mieux comprendre comment les facteurs socio-économiques familiaux sont susceptibles d'impacter la réussite scolaire en mathématiques. En effet, si cette littérature conséquente nous donne à voir l'importance du phénomène d'inégalités scolaires, elle ne permet cependant pas de comprendre immédiatement les mécanismes neurocognitifs en jeu (Farah et al., 2006). Les mesures utilisées, qu'il s'agisse de performances scolaires ou de tests standardisés, sont souvent très générales et peu spécifiques et ne permettent donc pas l'identification de capacités cognitives précises (Noble et al., 2007)¹. Pourtant, identifier et comprendre les mécanismes sous-jacents à ces disparités socio-économiques au sein des compétences mathématiques est un enjeu crucial pour concevoir des programmes de prévention et de remédiation efficaces (Crook & Evans, 2014; Noble et al., 2005).

Il paraît important de préciser ce que les compétences mathématiques mesurées à travers ces cohortes peuvent englober, notamment au travers des différentes étapes du développement neurocognitif des compétences numériques chez l'enfant. C'est pourquoi le chapitre suivant sera consacré à la présentation des différentes composantes neurocognitives dédiées au domaine numérique chez l'enfant et les possibles relations que celles-ci entretiennent les unes avec les autres. Après cet état des lieux, dans un troisième chapitre, nous présenterons les relations mises en évidence entre SES familial et différentes caractéristiques neurocognitives des habiletés numériques chez les enfants.

¹ Nous précisons néanmoins que certaines des cohortes récentes mentionnées dans ce chapitre ont mesuré des scores plus précis que ceux détaillés dans le présent chapitre. Ces données seront présentées dans les chapitres 3 et 4.

Chapitre 2 : Le développement neurocognitif des compétences numériques

Les travaux de cohorte listés dans le premier chapitre suggèrent l'existence d'un lien entre caractéristiques socio-économiques du foyer et réussite en mathématiques de l'enfant à des âges variés. Les compétences « mathématiques » mesurées à travers ces études varient nécessairement : celles qui évaluent les enfants d'âge préscolaire ciblent des compétences différentes de celles qui s'intéressent aux capacités des élèves du secondaire. En outre, les indices utilisés sont majoritairement des scores composites reflétant un agrégat de sous-compétences ou des mesures globales de réussite scolaire et sont donc peu informatifs sur la nature exacte des compétences numériques les plus susceptibles de varier chez les enfants selon les aspects socio-économiques de leur foyer.

Dans ce chapitre, nous proposons une revue des connaissances actuelles sur le développement de la cognition numérique chez l'enfant, d'un point de vue à la fois comportemental et cérébral. De façon générale, cette présentation souhaite donner à lire la caractéristique résolument incrémentale de ce développement (p. ex. De Smedt, Verschaffel, & Ghesquière, 2009; Locuniak & Jordan, 2008; Watts, Duncan, Clements, & Sarama, 2018; Watts, Duncan, Siegler, & Davis-Kean, 2014), c'est-à-dire la nécessaire maîtrise des compétences précédentes pour l'acquisition de chacune des compétences successives. Dans un premier temps, nous discuterons des compétences numériques non symboliques et symboliques ainsi que des liens qu'elles entretiennent. Dans un deuxième temps, nous proposerons un aperçu des connaissances actuelles sur l'entrée de l'enfant dans le calcul arithmétique (notamment en ce qui concerne la résolution d'additions et de soustractions) et les différentes stratégies de résolution accessibles au fur et à mesure du développement de son expertise. Enfin, nous exposerons brièvement les outils francophones disponibles permettant une évaluation approfondie des différentes compétences présentées.

1. Compétences numériques précoces

Le champ de la cognition numérique a longtemps été influencé par les travaux d'inspiration piagétienne (Piaget & Inhelder, 1975; Piaget & Szeminska, 1941). Cette théorie suppose que les apprentissages de l'enfant se développent par stades successifs bien définis et que l'enfant n'accède que tardivement (vers 5-7 ans) à la compréhension du nombre. Piaget faisait ainsi l'hypothèse que l'enfant n'accédait au nombre que lorsqu'il atteignait le stade dit

« *logico-mathématique* » qui suppose la coordination d'opérations mentales spécifiques (la classification et la sériation). Néanmoins, de nombreux travaux dans le champ des sciences cognitives ont par la suite remis en question cette théorie en donnant à voir l'existence de compétences numériques chez l'enfant de façon bien plus précoce. Pour introduire ces travaux, il importe tout d'abord de définir ce qu'implique la notion de nombre dans le cadre de son étude en psychologie cognitive. Cette notion peut être représentée par trois codes différents : le code verbal (qui désigne les mots-nombres, p. ex. « *quatre* »), le code indo-arabe (les chiffres arabes, p. ex. « *4* ») et le code analogique (ou iconique, qui consiste en des représentations non verbales et perceptives de la quantité, p. ex. la représentation de 4 jetons ou « *••••* »). Classiquement, on distingue deux systèmes de représentation de la quantité : un système non symbolique (qui repose uniquement sur le code analogique des quantités) et un système symbolique (qui repose à la fois sur le code verbal et le code indo-arabe).

1.1. Les compétences non symboliques

Depuis la remise en question de la théorie piagétienne, il a été proposé que les enfants de toutes les cultures, dès le plus jeune âge et avant toute acquisition du langage, posséderaient déjà des compétences numériques non symboliques (Von Aster & Shalev, 2007). Ces compétences non symboliques permettraient d'accéder à une représentation de la quantité via deux systèmes : un système d'individuation parallèle des quantités et un système approximatif des quantités. En préambule, il faut néanmoins signaler qu'il n'existe pas de véritable consensus sur le fonctionnement de ce système non symbolique (pour certains, il reposerait davantage sur une sensibilité à des variables continues comme la surface ou la densité plutôt que sur la véritable numérosité ; p. ex. Gebuis, Kadosh, & Gevers, 2017; Hurewitz, Gelman, & Schnitzer, 2006; Szűcs, Nobes, Devine, Gabriel, & Gebuis, 2013; pour une revue, voir Wilkey & Ansari, 2020).

1.1.1. Un système d'individuation parallèle

Il a été proposé que le système d'individuation parallèle des quantités, appelé aussi *subitizing* (Kaufman, Lord, Reese, & Volkman, 1949), permette d'accéder à la représentation exacte des petites quantités (uniquement celles inférieures à quatre). Cette compétence reposerait sur des propriétés perceptives (Ferrand, Riggs, & Castronovo, 2010; Mandler & Shebo, 1982) et attentionnelles (Burr, Turi, & Anobile, 2010).

Ainsi, il a par exemple été montré que les enfants, dès l'âge de deux ans, sont capables d'identifier de façon exacte une petite quantité d'éléments qui leur est présentée (Starkey & Cooper, 1995). Cette identification se réalise sur un temps très court (Trick & Pylyshyn, 1994) et serait indépendante de la disposition spatiale des items (Starkey & Cooper, 1995). La mesure du temps de regard chez le bébé (notamment via l'utilisation de paradigmes d'habituation visuelle) a permis de proposer que le système de *subitizing* puisse être disponible de façon tout à fait précoce chez le bébé avant même l'apparition du langage (Antell & Keating, 1983; Strauss & Curtis, 1981; Van Loosbroek & Smitsman, 1990). Enfin, ce processus a aussi pu être mis en

évidence à travers d'autres modalités sensorielles que celle de la vision (K. E. Jordan & Brannon, 2006; Plaisier, Tiest, & Kappers, 2009; Wynn, 1996).

Il a aussi été proposé que ce système d'individuation parallèle permette la détection d'ajout ou de retrait de petites quantités d'objets (inférieures à quatre) chez les jeunes enfants (Starkey, Spelke, & Gelman, 1990), mais aussi chez les nourrissons (Kobayashi, Hiraki, & Hasegawa, 2005; Koechlin, 1997; Wynn, 1992a; Fei Xu, 2003). Dans une étude princeps, le procédé expérimental employé consistait à présenter à des enfants de neuf mois une mise en scène de stimuli adaptés pour capturer leur attention (deux figures de Mickey ; Wynn, 1992a). Les stimuli présentés étaient, dans un second temps, masqués par un cache et les enfants assistaient à une manipulation correspondant à un retrait ou un ajout de ces objets par un adulte (p. ex. ajout d'une figure de Mickey). Lorsque le cache était retiré, le nombre d'objets présentés pouvait être congruent ou incongruent par rapport à la manipulation effectuée. Le temps de regard des enfants devant la scène alors dévoilée permet d'inférer leur degré de surprise. Une fois le cache retiré, les bébés passaient significativement plus de temps à regarder la scène incongruente, indépendamment du nombre d'objets alors présentés (pour poursuivre notre exemple, les enfants regardaient alors plus longtemps une situation où deux mickeys étaient dévoilés par rapport à une situation où trois mickeys étaient dévoilés). Pour les auteurs, ces résultats étaient en faveur d'une compétence innée non seulement à percevoir de façon exacte les petites quantités, mais aussi à discriminer avec précision les ajouts et retraits au sein de ces petites quantités.

1.1.2. Un système numérique approximatif

Par ailleurs, il a été proposé qu'une part importante des compétences numériques non symboliques repose sur un second système : le système approximatif des quantités. Ce système approximatif, aussi appelé *Système Numérique Approximatif* (SAN), prendrait finalement le relais du système de subitizing pour le traitement de l'ensemble des quantités analogiques supérieures à quatre. Il permettrait l'estimation ou la comparaison de ces quantités, mais exclusivement de façon approximative (Feigenson, Dehaene, & Spelke, 2004; Whalen, Gallistel, & Gelman, 1999). De façon similaire au subitizing, il existe de nombreux éléments de preuves comportementales suggérant l'existence d'un tel système de façon très précoce chez le jeune enfant (p. ex. Barth, Mont, Lipton, & Spelke, 2005; Halberda & Feigenson, 2008; Huntley-Fenner & Cannon, 2000). Sur la base d'une représentation analogique des quantités, les enfants pourraient donc accéder à une représentation figurative de l'ordre de grandeur d'une collection (Kaufman et al., 1949) et cela leur permettrait dès le plus jeune âge de réaliser des opérations approximatives (McCrink & Wynn, 2004).

- *Caractère inné du système approximatif*

Grâce à des données reposant sur des procédés expérimentaux ingénieux (tels que l'utilisation du temps de regard des bébés, leur taux de succion ou encore leur rythme cardiaque) a été proposée l'existence d'un système approximatif de traitement des quantités analogiques dès le plus jeune âge (Izard et al., 2009; Lipton & Spelke, 2003; Wood & Spelke, 2005; F. Xu

2006). De façon épisodique, un stimulus *déviant* était présenté, c'est-à-dire que ce stimulus pouvait varier des précédents soit par le nombre de points présentés à l'écran (*number deviant*) soit par la forme des éléments présentés (*shape deviants*). Pour maintenir l'attention des enfants sur l'écran, il leur était simplement demandé de réaliser une tâche de détection de cible (ils avaient pour consigne d'appuyer sur le bouton d'une manette lorsque la croix centrale de l'écran changeait de couleur). Le paradigme mis en jeu dans cette tâche se basait sur « l'adaptation cérébrale passive ». Ce type de paradigme en IRMf repose sur l'idée que la présentation répétée d'un stimulus donné entraîne une diminution du signal dans la région qui traite ce stimulus (parce que le taux d'activité de la population neuronale diminue ; Grill-Spector & Malach, 2001; Krekelberg, Boynton, & van Wezel, 2006). À l'aide de cette tâche et lors de la présentation de stimuli de *quantités* déviantes, les chercheurs ont montré qu'une région spécifique du cerveau, le sillon intra-pariétal (IPS), s'activait davantage (comparativement à la présentation de stimuli de *formes* déviantes). Autrement dit, dans le cadre du paradigme d'adaptation en IRMf, ce résultat indiquait que la population de neurones de l'IPS discriminait davantage les stimuli sur leurs paramètres de quantités que de formes (Cantlon et al., 2006; Naccache & Dehaene, 2001).

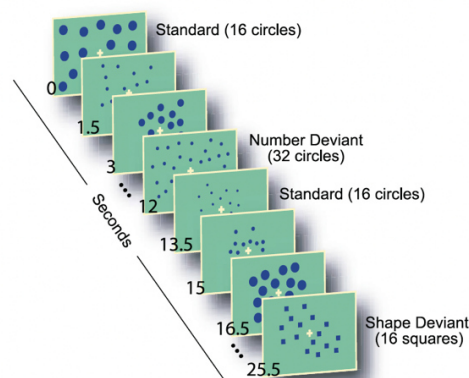


Figure 8 : Figure tirée de Cantlon et al. (2006) représentant le protocole de la tâche IRMf utilisée. L'attention des participants était maintenue sur l'écran en leur demandant d'appuyer sur le bouton d'une manette lorsque la croix de fixation centrale devenait rouge. Les nuages de points visualisés passivement à l'écran contenaient le même nombre d'éléments et ces éléments étaient de forme identique. Néanmoins, en tant que paramètres contrôles, la surface cumulée et la densité occupée par les éléments ainsi que leurs tailles et dispositions spatiales variaient à chaque occurrence. Ponctuellement, un stimulus déviant était présenté, soit parce que le nombre d'éléments était différent (number deviant, dans un rapport de 1/2), soit parce que la forme des éléments était différente (shape deviant).

Via ce même procédé expérimental d'adaptation cérébrale, il a également été montré que cette même région cérébrale (l'IPS) était aussi dédiée au traitement des quantités non symboliques chez l'adulte (Cantlon et al., 2006). L'étude de Cantlon et collaborateurs (2006) leur a donc permis de proposer que, quel que soit le niveau de développement mathématique des participants (enfants d'âge préscolaire ou adultes ayant été scolarisés), le traitement des quantités non symboliques était susceptible de recruter la même zone cérébrale. À l'aide de mesures de l'activité électrique à la surface du crâne (mesures d'électroencéphalographie), il a également été montré le recrutement de ce même système pariétal chez des bébés de 3 mois

(Izard, Dehaene-Lambertz, & Dehaene, 2008). Enfin, le rôle clé de l'IPS dans le traitement des quantités non symboliques a été montré à plusieurs reprises chez le sujet sain, adulte ou enfant (Ansari, Dhital, & Siong, 2006; Fias, Lammertyn, Reynvoet, Dupont, & Orban, 2003; Dehaene, Spelke, Pinel, Stanescu, & Tsivkin, 1999; Dehaene, Molko, Cohen, & Wilson, 2004; Piazza, Pinel, Le Bihan, & Dehaene, 2007; Piazza, Izard, Pinel, Bihan, & Dehaene, 2004; Temple & Posner, 1998) ou via l'étude de dissociations chez des patients cérébro-lésés (Dehaene & Cohen, 1997; Dehaene, Dehaene-Lambertz, & Cohen, 1998; Lemer, Dehaene, Spelke, & Cohen, 2003). L'analyse des réseaux cérébraux dédiés aux traitements des petites quantités analogiques, le processus de subitizing décrit dans la section précédente, a également conduit à identifier cette même région pariétale (Piazza, Mechelli, Butterworth, & Price, 2002), et cela indépendamment de la modalité sensorielle employée (Damarla, Cherkassky, & Just, 2016). De façon générale, l'IPS a fait l'objet de très nombreux travaux qui ont convergé à montrer son recrutement précoce pour le traitement de quantités non symboliques, chez l'humain, mais aussi chez l'animal (pour revues, voir Ansari, 2008; Nieder, 2016).

- *Approximation, développement et différences individuelles du système non symbolique*

Il est néanmoins essentiel de préciser que la capacité à distinguer des quantités non symboliques dépendrait du rapport qui sépare ces quantités. Ainsi, des quantités qui varient dans un rapport de 1/2 (p. ex. 12 points par rapport à 24 points ; mais aussi 6 points par rapport à 12) seront plus faciles à discriminer que celles qui varient dans un rapport de 3/4 (p. ex. 12 points par rapport à 16 points, mais aussi 9 points par rapport à 12). Ce rapport entre les quantités illustre le fait que, de manière générale, il est plus facile de discriminer des quantités numériquement éloignées, phénomène appelé « effet de distance » (p. ex. 6 points par rapport à 12 points, c.-à-d. un rapport de 1/2, sera plus simple à discriminer que 9 points par rapport à 12, c.-à-d. un rapport de 3/4). Mais aussi, à distance égale, il est plus facile de discriminer des collections de quantités lorsqu'elles sont petites, phénomène appelé « effet de taille » (p. ex. à distance égale de 5 points, il sera plus facile de discriminer 5 points par rapport à 10 points, c.-à-d. un rapport de 1/2, que 45 points par rapport à 50 points, c.-à-d. un rapport de 9/10). S'il a été proposé que la capacité à discriminer approximativement les quantités analogiques pouvait être partagée par tous dès la naissance (Dehaene, 2011; Dehaene & Changeux, 1993), ses caractéristiques ne seraient quant à elles pas prédéfinies de façon immuable. En effet, le degré d'*imprécision* (ou de *précision*) qui régit ce système non symbolique des « grandes » quantités analogiques (et, par nature, approximatif) ne serait pas fixé et pourrait s'améliorer au cours du développement.

En conséquence, la compétence d'approximation décrite précédemment chez les nouveau-nés de quelques heures ne s'exprimait en fait qu'à la condition que les quantités analogiques présentées soient suffisamment différentes (Izard et al., 2009). En effet, les capacités du nouveau-né à percevoir la congruence (ou l'incongruence) entre des séquences de sons et d'images dans cette étude dépendaient du rapport séparant les quantités présentées. Plus précisément, les capacités des nouveau-nés n'étaient objectivées qu'à la condition que les différences entre les quantités présentées soient suffisamment « grandes » (dans un rapport de 1/3). Si la différence entre les quantités présentées était plus petite, alors les nouveau-nés ne

semblaient plus parvenir à discriminer ces quantités « moins différentes » les unes des autres (présentées dans un rapport de 1/2). L'utilisation d'un paradigme de préférence pour la nouveauté chez des bébés âgés de 6 mois a cependant suggéré une modification rapide des caractéristiques limitatives de cette discrimination des quantités (c.-à-d. le rapport maximal de discrimination possible ; Libertus, Feigenson, & Halberda, 2013). Le paradigme de préférence pour la nouveauté chez le bébé consiste à utiliser son temps de regard comme une mesure indirecte de ses compétences : le bébé aurait tendance à regarder davantage un flux d'informations qu'il perçoit comme variées comparativement à un flux d'informations qu'il perçoit comme identiques. Autrement dit, cette mesure permet d'inférer sur la compétence du bébé à discriminer des stimuli présentés visuellement (Gentaz & Mazens, 2006). À l'aide de ce paradigme, il a été montré que des bébés âgés de 6 mois avaient déjà affiné leur capacité d'approximation des quantités, puisqu'ils étaient capables de discriminer les quantités dans un rapport plus complexe que les nouveau-nés (jusqu'à un rapport de 1/2 ; Libertus et al., 2013). De façon générale, il a été montré que cette capacité à discriminer les quantités non symboliques s'améliore avec l'âge (Halberda & Feigenson, 2008; Piazza et al., 2010), et cela même chez l'adulte (Halberda, Ly, Wilmer, Naiman, & Germine, 2012). À l'aide de différents paradigmes, chez l'enfant comme chez l'adulte, il est possible d'obtenir une mesure de l'acuité numérique, c'est-à-dire ce rapport minimal entre les quantités analogiques au-delà duquel il n'est plus possible de les discriminer. Une tâche couramment utilisée pour réaliser cette mesure consiste à présenter simultanément (et sur un temps très bref) deux ensembles de points de couleurs différentes et à demander au sujet de nommer la couleur de l'ensemble le plus grand des deux (comme la tâche *Panamath*, créée par Halberda et al., 2008, voir **Figure 9**). Au niveau cérébral, il a été proposé qu'il serait possible d'objectiver la mesure de la complexité du traitement analogique, autrement dit du rapport entre les quantités, par le degré du recrutement de l'IPS (Piazza et al., 2004).

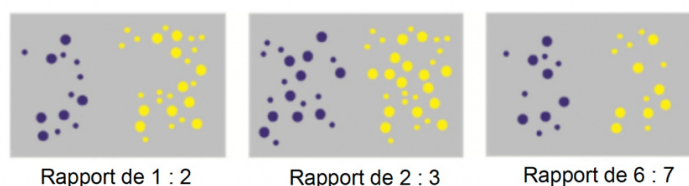


Figure 9 : Figure tirée de la ressource <https://panamath.org/> (Halberda et al., 2008) illustrant différents rapports (ou « ratios ») de quantités non symboliques (de gauche à droite, du moins précis au plus précis).

Pour expliquer que la capacité à distinguer des quantités non symboliques dépende du rapport entre ces quantités, il a été proposé que ces quantités pourraient être représentées de façon analogique le long d'une « ligne numérique mentale » (Restle & Greeno, 1970; Moyer & Landauer, 1967). Cette ligne mentale permettrait à chacun de figurer de manière « physique » l'approximation des grandeurs numériques selon son degré d'acuité numérique (Fias & Pesenti, 2004) : les quantités analogiques seraient ainsi représentées de façon orientée dans l'espace, à travers une ligne mentale présentant une compression croissante vers la droite (ligne dite « logarithmique » ; pour illustration voir **Figure 10.A** à gauche ; tirée de Dehaene et al., 2008).

Autrement dit, la ligne serait de moins en moins précise pour les grandes quantités. Mais cette compression signerait également le degré d'acuité numérique du sujet, plus cette dernière serait élevée plus la compression serait réduite (Feigenson et al., 2004). Par exemple, sur une tâche avec une ligne numérique non symbolique bornée de 1 à 10 points (pour illustration voir **Figure 10.B**; tirée de Dehaene et al., 2008), plus l'acuité numérique du sujet serait précise, plus la distance qu'il serait susceptible d'estimer entre deux « grandes » quantités (c.-à-d. des quantités proches de la borne numérique supérieure) serait similaire à la distance numérique exacte.

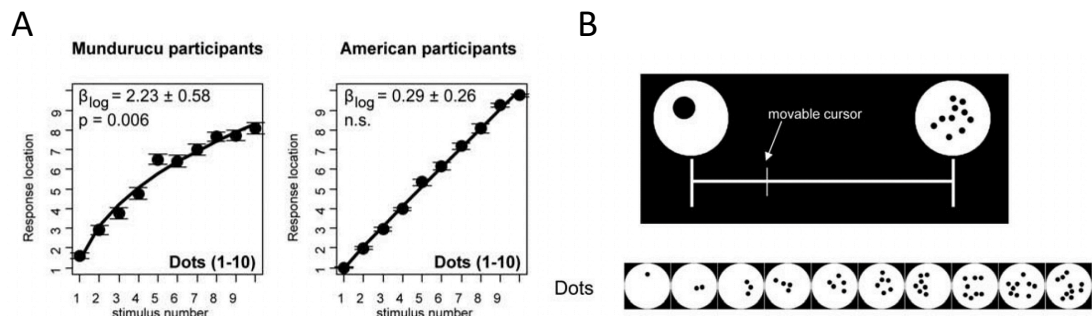


Figure 10 : Figures tirées de Dehaene et al. (2008). **A.** Illustration d'une représentation logarithmique des quantités non symboliques (à gauche chez les participants mundurucus) par rapport à une représentation linéaire des quantités non symboliques de 1 à 10 (à droite chez les participants américains). Pour la représentation linéaire : la distance estimée (en ordonnée) entre les quantités analogiques correspond à la distance numérique réelle (en abscisse). Pour la représentation logarithmique, plus les quantités sont « grandes », plus la distance estimée (en ordonnée) entre les quantités analogiques est réduite par rapport à leur distance numérique réelle (en abscisse, d'où l'aspect « logarithmique »). **B.** Illustration d'un exemple de tâche de ligne numérique non symbolique, celle-ci était proposée aux participants mundurucus et américains étudiés.

Il est important de noter que la description de ce système approximatif des quantités et son évolution au cours de la vie ne devrait pas amener à négliger les différences interindividuelles objectivables dès l'enfance. Ainsi, à un âge donné, tous les enfants n'auraient pas la même acuité numérique et ces différences interindividuelles auraient tendance à se maintenir au cours du développement (Libertus & Brannon, 2009; Libertus, Feigenson, & Halberda, 2011; Mazzocco, Feigenson, & Halberda, 2011). Il a été proposé que ces différences puissent prédire la réussite mathématique ultérieure (Halberda & Feigenson, 2008; Libertus et al., 2013; Mazzocco et al., 2011; Schneider et al., 2017; Wilson & Dehaene, 2007). Cependant ce lien a aussi été remis en question et fait l'objet de débats dans la littérature (Holloway & Ansari, 2009; Sasanguie, Bussche, & Reynvoet, 2012; Vanbinst, Ghesquiere, & De Smedt, 2012; pour une revue, voir De Smedt, Noël, Gilmore, & Ansari, 2013).

- *Langage et système non symbolique approximatif*

L'influence de la culture, et plus exactement l'acquisition d'un lexique numérique précis, pourraient influencer le système non symbolique approximatif. À ce sujet, de nombreuses études ont été menées auprès d'une population qui vivait de manière isolée dans la forêt Amazonienne du Brésil (les Mundurucus). En effet, lorsque ce peuple a été étudié, il avait

la particularité de posséder un système numérique symbolique très limité : les individus étudiés avaient peu de mots-nombres pour désigner les quantités et les utilisaient davantage comme des approximations (Pica et al., 2004; voir **Figure 11**).

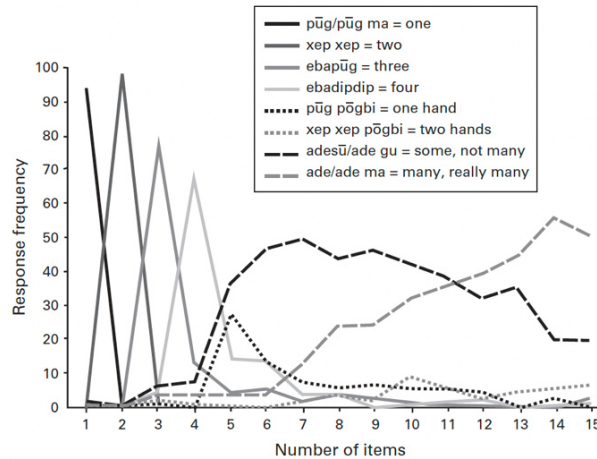


Figure 11 : Figure tirée de Pica et al. (2004) présentant le lexique numérique des Mundurucus. Pour établir ce lexique, il a été présenté aux sujets des ensembles de 1 à 15 points (dans un ordre aléatoire) et il leur a été demandé de nommer chacune des quantités. Pour chaque quantité exacte de points sur l'axe des x, le graphique montre le nombre de fois où cette quantité a été nommée avec un mot (ou une expression) donné. Ne sont présentées que les appellations produites dans plus de 2,5% de tous les essais. Pour les nombres supérieurs à 5, les fréquences ne totalisent pas 100%, car de nombreux participants ont produit des expressions rares ou idiosyncrasiques (p. ex. « tous mes orteils »).

Les études réalisées auprès de ce peuple ont permis de montrer qu'il possédait un système numérique approximatif similaire à celui mis en évidence chez les sujets occidentaux, suggérant à nouveau le caractère inné et universel de ce système (Dehaene et al., 2008; Pica et al., 2004). Néanmoins, à l'aide de tâches impliquant la comparaison des quantités analogiques (Pica et al., 2004) ou des tâches de ligne numérique (Dehaene et al., 2008), l'acuité numérique objectivée chez les Mundurucus était bien inférieure à celle de leurs pairs occidentaux. Par conséquent, il a été proposé que l'évolution de la précision de ce système inné du traitement des quantités analogiques pourrait entretenir des liens étroits avec l'acquisition et l'élaboration culturelles du système symbolique (et donc verbal) des quantités (Piazza, Pica, Izard, Spelke, & Dehaene, 2013). Autrement dit, si le système non symbolique des quantités semble bien revêtir un caractère inné, l'évolution de son degré d'imprécision décrite chez l'enfant occidental pourrait ne pas dépendre du seul aspect maturationnel, mais davantage de sa « culture numérique » (notamment de son apprentissage d'un lexique symbolique précis ; Dehaene et al., 2008).

1.2. Les compétences symboliques

L'apprentissage des mathématiques symboliques permet de dépasser l'approximation inhérente aux compétences non symboliques en associant à chaque quantité une seule et unique dénomination. Cet apprentissage nécessite donc la compréhension du principe suivant lequel le langage ou le symbole encode la quantité exacte (appelée aussi cardinalité). L'acquisition de ces compétences symboliques repose sur un apprentissage culturel complexe et met en jeu deux grands systèmes : le système auditivo-verbal et le système indo-arabe.

1.2.1. La chaîne numérique verbale

Le système numérique symbolique verbal français comprend un lexique plutôt restreint (les mots-nombres de « un » à « seize », les noms des dizaines et certaines dénominations de « puissance dix », comme « cent » ou « mille »). Ce lexique est ensuite organisé selon une syntaxe combinatoire qui permet de créer une infinité de dénominations selon des relations à la fois additives et multiplicatives. Si cette syntaxe combinatoire est assez régulière, elle comprend néanmoins plusieurs irrégularités (comme les termes « douze » ou « quatre-vingt-onze »).

De façon générale, les différentes étapes de ce processus d'acquisition, long et compliqué, démarrent vers l'âge de 2 ans et se poursuivent jusqu'à l'âge de 6 ou 7 ans (Fuson, Richards, & Briars, 1982). Des jalons du développement « normal » attendu ont été proposés (Fuson et al., 1982). Entre 2 et 4 ans, la chaîne numérique verbale serait d'abord apprise lentement comme une suite d'étiquettes verbales insécables. En d'autres termes, cette chaîne serait d'abord apprise comme une sorte de comptine dépourvue de tout sens numérique (Fuson & Mierkiewicz, 1980). Vers 4 ans, l'enfant commencerait à individualiser les mots-nombres comme des entités distinctes, mais ne saurait les réciter qu'en commençant par le début (par « un », Fuson et al., 1982). Par la suite l'enfant apprendrait graduellement à manipuler cette chaîne numérique verbale avec plus de liberté (p. ex. compter de x à y entre 4 et 6 ans ou encore compter à l'envers vers 6 ou 7 ans ; Case, Kurland, & Goldberg, 1982; Secada, Fuson, & Hall, 1983). Peu à peu, ces manipulations lui permettraient de comprendre les mots-nombres comme des unités numériques qui entretiennent des rapports mathématiques particuliers (Sarnecka & Carey, 2008), lui permettant par la suite d'appréhender efficacement le calcul mental (Krajewski & Schneider, 2009a; Nguyen et al., 2016; Passolunghi, Vercelloni, & Schadee, 2007).

La première étape de cet apprentissage consiste donc à apprendre par cœur les mots-nombres comme autant de mots nouveaux. Sollicitant fortement les capacités mnésiques et langagières (Majerus et al., 2020), cette étape indispensable est néanmoins lente et difficile et peut à ce titre faire émerger des différences interindividuelles. Néanmoins, c'est l'étape de la compréhension et de l'utilisation de la syntaxe combinatoire qui pourrait accroître ces disparités interindividuelles (Fuson et al., 1982). L'écart se creuserait entre les enfants qui maîtrisent la syntaxe et vont pouvoir produire la séquence numérique verbale de façon étendue, à moindre coût cognitif, et ceux pour lesquels la chaîne numérique verbale continuerait à reposer uniquement sur un apprentissage sériel extrêmement coûteux (Camos, Fayol, Lacert, Bardi, &

Laquière, 1998; Fazio, 1996, 1999). Des variations dans les compétences phonologiques des enfants pourraient d'ailleurs être associées aux variations dans leurs compétences précoces de comptage (Koponen, Salmi, Eklund, & Aro, 2013; Krajewski & Schneider, 2009b; Soto-Calvo, Simmons, Willis, & Adams, 2015). En effet, les compétences phonologiques chez l'enfant faciliteraient non seulement l'acquisition du vocabulaire général (Bowey, 1996), mais également l'acquisition du lexique numérique (Soto-Calvo et al., 2015).

Des études portant sur la comparaison des lexiques français (ou anglais) et chinois et leurs acquisitions ont aussi mis l'accent sur le rôle des processus langagiers lors de l'acquisition du code symbolique verbal. Le lexique numérique chinois se caractérise en effet par des mots-nombres plus courts et une syntaxe combinatoire transparente en base 10 (Miller, Smith, Zhu, & Zhang, 1995). Comparativement, les enfants francophones (et anglophones) seraient ainsi désavantagés non seulement en raison de la longueur lexicale plus importante de leurs mots-nombres (ce qui influencerait leur vitesse de prononciation ainsi que leur mémorisation), mais aussi du fait de l'opacité de leur syntaxe combinatoire (Hurford, 2011). Ces différences seraient telles qu'elles pourraient rendre l'acquisition de la chaîne numérique verbale plus complexe pour les enfants francophones ou anglophones et justifier, dès l'âge de 3 ans, de meilleures performances des enfants chinois dans la maîtrise de chaîne numérique verbale (ils seraient capables de compter « plus loin » ; Miller et al., 1995). Ces différences précoces dans la maîtrise du lexique numérique seraient par ailleurs susceptibles de jouer un rôle important dans les processus d'acquisition ultérieurs (Miller et al., 1995; Stevenson, Lee, & Stigler, 1986).

1.2.2. *Dénombrement et cardinalité*

L'acquisition de la chaîne numérique verbale par l'enfant va lui permettre de quantifier un ensemble analogique de façon exacte, en dépassant sa capacité d'approximation innée. Néanmoins si la compétence de dénombrement ne saurait se réaliser sans la maîtrise de cette chaîne numérique verbale (ou principe d'« *ordre stable du comptage* », selon la terminologie employée par Gelman & Gallistel, 1978), elle requiert également d'autres compétences bien spécifiques (Wynn, 1992b). En plus de ce premier principe « *d'ordre stable du comptage* », Gelman et Gallistel (1978) ont listé quatre principes supplémentaires nécessaires à la maîtrise du dénombrement. Le principe de « *stricte correspondance terme à terme* » suppose qu'à chaque élément dénombré corresponde une seule étiquette verbale. Autrement dit, il faut que l'enfant possède une chaîne numérique verbale suffisamment élaborée pour être capable d'utiliser chaque mot-nombre comme une unité sécable à associer à son geste de pointage (avant cette maîtrise, l'enfant pourrait souvent « simuler » un dénombrement en récitant la chaîne numérique verbale et pointant les objets à dénombrer, mais sans stricte correspondance terme à terme ; Camos, 2003a). Le principe de « *non-pertinence de l'ordre* » indique que l'ordre du dénombrement des éléments est sans conséquence et celui « *d'abstraction* » précise que les caractéristiques des objets à dénombrer n'ont pas d'importance (dénombrer une collection homogène ou hétérogène suppose la même procédure). Des pseudo-principes ont également été décrits, c'est-à-dire des régularités observées par l'enfant dans l'activité de dénombrement et qu'il peut interpréter, à tort, comme nécessaires pour un dénombrement correct. Enfin, le dernier des cinq principes (« *principe de cardinalité* ») stipule que le dernier mot-nombre

énoncé pour dénombrer le dernier item correspond aussi à la quantité totale exacte de l'ensemble, autrement dit le cardinal de la collection. Le défaut d'acquisition de ce dernier principe peut être masqué par un dénombrement terme à terme réussi sans pour autant que l'enfant comprenne que le dernier mot encode la quantité (Brissiaud, 2011; Knudsen, Fischer, & Aschersleben, 2015; Le Corre & Carey, 2007). Marquée par de grandes disparités interindividuelles (Sarnecka & Lee, 2009), cette étape n'en est pas moins essentielle, car la précocité de son acquisition (Geary et al., 2018) ainsi que sa compréhension pourraient participer à prédire les compétences mathématiques ultérieures (Marle, Chu, Li, & Geary, 2014; Watts et al., 2014).

Pour évaluer la maîtrise du dénombrement, il est possible d'observer l'enfant dénombrer une quantité d'items ou de lui demander de constituer un ensemble d'un nombre précis d'items parmi un ensemble mis à sa disposition (la très classique « *Give-a-Number task* » utilisée depuis plusieurs dizaines d'années ; Wynn, 1990, 1992b). Pour évaluer plus précisément la compréhension des principes du dénombrement susmentionnés, il est possible d'utiliser une procédure indirecte où les enfants, après avoir observé une action de dénombrement réalisée par une marionnette (qui respecte ou non chacun des principes ou pseudo-principes), doivent juger de la validité de ce dénombrement (Briars & Siegler, 1984).

De façon générale, une fois maîtrisée, la procédure de dénombrement pourrait aussi s'améliorer grâce à la mise en place de stratégies moins coûteuses, déployées au cours du développement de l'enfant et selon les situations (p. ex. passage du dénombrement l par l au dénombrement n par n , ou encore par l'utilisation progressive des connaissances arithmétiques, via le recours à des regroupements additifs ou multiplicatifs ; Camos, 2003b). Autrement dit, par la maîtrise du dénombrement, se jouent également les prémices du calcul mental (Geary et al., 2018; Moore & Geary, 2016; Nguyen et al., 2016).

1.2.3. Symboles numériques indo-arabes

Le code symbolique indo-arabe se fonde sur un lexique très restreint (10 éléments seulement : les chiffres de 0 à 9) auquel s'ajoute le principe de notation positionnelle de l'ordre en base 10. Ce principe implique que la position relative du chiffre au sein de la séquence numérique code strictement sa valeur. Un même symbole n'aura pas la même valeur selon qu'il est placé en première (centaine) ou dernière (unité) position d'un nombre à trois chiffres par exemple. Par la suite, la maîtrise de ce code indo-arabe est une condition nécessaire à la pose et la résolution d'opérations arithmétiques complexes.

Bien que la question du tracé des chiffres puisse être source de difficultés chez certains enfants (problématique d'écriture en miroir notamment ; Fischer, 2011), l'acquisition de ce lexique symbolique en lui-même est souvent une étape relativement aisée. Toutefois, l'acquisition du principe de notation positionnelle serait quant à elle particulièrement complexe (Fayol, 2018a). Cette complexité pourrait être d'autant plus renforcée du fait de l'incongruence de cette notation positionnelle avec la syntaxe combinatoire du code verbal (que l'enfant maîtrise souvent en premier). Une façon simple de rendre compte de ces difficultés consiste à évaluer les compétences de transcoding chez l'enfant, c'est-à-dire la capacité à passer d'un code symbolique à un autre (indo-arabe à verbal, ou inversement). Le type d'erreurs commises

va souvent dans le sens d'une médiation par le langage (p. ex. écrire « 6010 » pour le mot-nombre « soixante-dix » ; Seron & Fayol, 1994). La maîtrise de ce système indo-arabe par l'enfant serait également un prédicteur de sa réussite ultérieure en mathématiques (Göbel, Watson, Lervåg, & Hulme, 2014).

Enfin, une tâche souvent utilisée pour évaluer la maîtrise du système symbolique indo-arabe consiste à présenter au sujet deux quantités symboliques (en chiffres) et lui demander d'indiquer la plus grande de ces quantités (Schneider et al., 2017; Xenidou-Dervou, Molenaar, Ansari, van der Schoot, & van Lieshout, 2017). La réussite de l'enfant à cette tâche vers 4 ou 5 ans pourrait également prédire ses performances ultérieures en mathématiques (Kolkman, Kroesbergen, & Leseman, 2013; Scalise & Ramani, 2021).

2. Liens entre compétences symboliques et non symboliques

Comme l'illustre la question du transcodage entre mots-nombres et chiffres arabes, ces différents codes symboliques ne fonctionnent pas isolément et il peut être nécessaire de comprendre leurs relations. Mais la problématique n'est pas uniquement celle du lien entre ces deux codes symboliques, elle concerne aussi leur articulation avec les représentations quantitatives non symboliques (analogiques) dont l'enfant est doté au préalable (voir section 1.1 de ce chapitre). Dans cette section, seront présentés les travaux ayant visé à étudier les liens entre systèmes symboliques et non symboliques, au niveau comportemental et cérébral.

2.1. Liens entre compétences symboliques exactes et précision des représentations non symboliques

Certaines théories postulent que les représentations symboliques de la magnitude numérique seraient acquises par leur mise en correspondance avec les représentations non symboliques préexistantes (Ansari, 2008). De nombreuses études ont ainsi visé à illustrer les similitudes entre ces différents systèmes numériques (Arsalidou & Taylor, 2011; Cantlon, Platt, & Brannon, 2009; Cohen Kadosh, Lammertyn, & Izard, 2008; Dehaene, Piazza, Pinel, & Cohen, 2003; Kaufmann, Wood, Rubinsten, & Henik, 2011).

Cette section vise à présenter les travaux ayant établi des liens entre performances comportementales symboliques et non symboliques, puis dans un second temps les travaux ayant explicité des influences entre système non symbolique et symbolique (influences unidirectionnelle et bidirectionnelle).

2.1.1. Des liens entre performances comportementales symboliques et non symboliques

Tout d'abord, de nombreux liens ont pu être décrits entre compétences symboliques et non symboliques. Par exemple, l'existence d'une relation entre l'acuité numérique des nourrissons à 3 mois et leurs scores en mathématiques 3 ans plus tard a été proposée (Starr, Libertus, & Brannon, 2013). Il a également été suggéré l'existence d'un lien significatif entre

acuité numérique (non symbolique) des enfants à 14 ans et leurs scores en mathématiques (symboliques) (Halberda et al., 2008). Certains travaux ont souligné le rôle potentiellement médiateur du code indo-arabe (Peng, Yang, & Meng, 2017; Price & Fuchs, 2016). Enfin, des méta-analyses ont également permis d'estimer la taille d'effet du lien entre performances symboliques et non symboliques (environ $r=.22$ d'après les méta-analyses de Chen & Li, 2014; Schneider et al., 2017).

2.1.2. *Systèmes symboliques construits à partir du système non symbolique*

Les représentations symboliques pourraient se développer *à partir* du système non symbolique (Kersey & Cantlon, 2017), autrement dit il existerait une relation unidirectionnelle allant des représentations analogiques (et surtout approximatives) vers les représentations symboliques des quantités. Différents types de travaux ont permis d'illustrer cette relation.

- *Résultats comportementaux*

Tout d'abord, ce postulat directionnel a motivé plusieurs études visant à entraîner le système non symbolique approximatif (c.-à-d. améliorer l'acuité numérique) afin d'en mesurer les bénéfices dans la maîtrise du système symbolique (Wang, Odic, Halberda, & Feigenson, 2016; Wang, Halberda, & Feigenson, 2021; Hyde, Khanum, & Spelke, 2014; Park & Brannon, 2013). Notons néanmoins que ce champ de recherche a mené à des résultats très hétérogènes et controversés (pour revue, voir Szűcs & Myers, 2017).

Par la mise en évidence de différents phénomènes mentaux, un autre champ de recherche a illustré ce postulat de construction des systèmes symboliques à partir des représentations non symboliques. A ainsi été suggérée l'existence d'un phénomène de conversion mentale, majoritairement automatique et inconscient, des représentations symboliques *exactes* des quantités vers leurs représentations analogiques *approximatives* (Dehaene, 2010). Autrement dit, en dépit de sa nature *exacte*, le sens donné au système symbolique pourrait rester fortement dépendant des racines approximatives innées de l'intuition numérique. Dehaene a ainsi proposé que « la perception approximative du nombre s'impose immédiatement, automatiquement et sans effort conscient » (Dehaene, 2010, p. 280). Ainsi tout un champ de recherche s'est attaché à montrer comment ces caractéristiques approximatives et spatiales du système non symbolique s'exprimaient au sein des systèmes symboliques. Il a par exemple été suggéré l'existence d'un phénomène d'approximation inhérente au système approximatif (non symbolique) lors de la manipulation des symboles pendant la réalisation d'une tâche de comparaison symbolique (décrit dans la section 1.2.3). Lors de la réalisation de cette tâche symbolique, chez l'adulte et chez l'enfant dès 5 ans, pourrait s'observer un effet de distance similaire à celui observé pour le système non symbolique (voir section 1.1.2) : plus les quantités symboliques sont éloignées, plus les sujets sont performants pour les comparer (réponse plus rapide ; Dehaene, Dupoux, & Mehler, 1990; Moyer & Landauer, 1967; Sekuler & Mierkiewicz, 1977). Ce type de résultats pourrait indiquer que, lors du traitement des quantités symboliques (les chiffres), les sujets se référaient inconsciemment à leur système approximatif des quantités.

Par ailleurs, un phénomène d'« approximation » pour le traitement des quantités symboliques exactes a aussi été mis en évidence via des études portant sur le concept de « ligne numérique mentale » appliqué aux symboles. Cette représentation mentale des quantités analogiques (pour une description de ce phénomène de « ligne numérique mentale », voir section 1.1.2) peut être mesurée en demandant au sujet de positionner un nombre symbolique précis sur une ligne numérique bornée, mais non graduée. Il a été proposé que cette tâche puisse permettre d'illustrer l'influence de la dimension spatiale inhérente aux représentations analogiques *approximatives* dans la manipulation des quantités symboliques *exactes*. Autrement dit, des caractéristiques spatiales pourraient être ainsi mises en évidence pour les symboles numériques, notamment le caractère d'approximation dans l'espace (c.-à-d. la représentation « logarithmique » des grands nombres sur la ligne, le degré de compression vers la droite étant dépendant de l'acuité numérique du sujet).

- *Résultats neurocognitifs*

En plus de ces résultats comportementaux, a été étudiée la possibilité de mécanismes cérébraux communs aux processus de comparaison des quantités symboliques ou non symboliques. De nombreuses études ont montré le recrutement de la région pariétale, et plus particulièrement de l'IPS lors du traitement symbolique (Ansari, Garcia, Lucas, Hamon, & Dhital, 2005; Eger, Sterzer, Russ, Giraud, & Kleinschmidt, 2003; Fias et al., 2003; Holloway & Ansari, 2010; Pinel, Piazza, Le Bihan, & Dehaene, 2004; Sandrini, Rossini, & Miniussi, 2004; Temple & Posner, 1998). Autrement dit, cette région déjà identifiée pour son rôle dans le traitement des quantités non symboliques (voir section 1.1.2 de ce chapitre) serait également recrutée dans le traitement des quantités symboliques (pour des revues, voir également Arsalidou & Taylor, 2011; Sokolowski, Fias, Bosah Ononye, & Ansari, 2017). Le recrutement de l'IPS pour la comparaison de grandeurs pourrait survenir quel que soit le format de présentation des quantités (codes indo-arabes ; Fias et al., 2003; Pinel, Dehaene, Rivière, & LeBihan, 2001; ou mots-nombres ; Ansari, Fugelsang, Dhital, & Venkatraman, 2006). Néanmoins, si les premières analyses ont d'abord été centrées sur l'IPS, il a également été montré que des régions frontales seraient aussi recrutées lors de la comparaison de quantités symboliques ou non symboliques (Ansari et al., 2005; Kaufmann et al., 2006; Piazza et al., 2007; Pinel et al., 2001). Plus exactement, il a été proposé un modèle développemental selon lequel l'IPS serait davantage recruté chez l'adulte que chez l'enfant lors de la comparaison des grandeurs, indépendamment de leur format (Holloway & Ansari, 2010) tandis que le réseau frontal s'activerait davantage chez l'enfant (à 10 ans, Ansari et al., 2005; ou à 9 ans, Cantlon et al., 2009; Kaufmann et al., 2006).

Les résultats concernant l'IPS ont également été retrouvés via l'utilisation d'un paradigme IRMf d'adaptation passive (Notebaert, Nelis, & Reynvoet, 2011; Piazza et al., 2007; Sokolowski, Hawes, Peters, & Ansari, 2021; Vogel, Goffin, & Ansari, 2015; Vogel et al., 2017), comme celui décrit pour l'étude de Cantlon et al. (2006) pour le traitement des quantités non symboliques chez le jeune enfant et l'adulte (voir section 1.1.2 de ce chapitre). L'utilisation de ce type de paradigme en IRMf présente l'avantage d'éviter de potentiels effets confondants de la performance du sujet à la tâche, comparativement aux performances du sujet lors d'une tâche

« active », par exemple de comparaison de quantités. Ces études d'adaptation IRMF ont répliqué et étendu l'étude de Cantlon et al. (2006). Quel que soit le code numérique utilisé (symbolique ou non symbolique) et après avoir adapté les sujets à une quantité donnée, la présentation d'une nouvelle quantité (différente) entraînait le recrutement de l'IPS (Notebaert et al., 2011; Piazza et al., 2007). De façon générale, les études de neuro-imagerie présentées ici pourraient étayer l'hypothèse selon laquelle, au niveau cérébral, il existerait un codage abstrait de la quantité approximative, commun à tous les formats numériques (analogiques, chiffres ou mots-nombres). Néanmoins, comme cela sera présenté dans la section suivante (1.5), cette proposition doit être nuancée.

2.1.3. Une relation bidirectionnelle entre systèmes symbolique et non symbolique

En plus de montrer comment les caractéristiques approximatives du système non symbolique pourraient se manifester lors de certaines manipulations symboliques, l'hypothèse de l'existence d'une influence inverse a également été proposée. Plus encore, l'hypothèse d'interactions bidirectionnelles entre systèmes symbolique et non symbolique est étayée par différents résultats.

Ainsi, certains travaux ont proposé des interprétations alternatives des performances objectivées à partir de la tâche de ligne numérique (Berteletti, Lucangeli, Piazza, Dehaene, & Zorzi, 2010; J. L. Booth & Siegler, 2006; Siegler & Booth, 2004; Siegler & Opfer, 2003). Le phénomène de conversion spatiale « approximative » des quantités symboliques sur la « ligne numérique mentale » pourrait en effet donner à voir une influence inverse entre systèmes symbolique et non symbolique. Plus exactement, au fur et à mesure du développement de la cognition numérique chez l'enfant, l'acquisition des symboles associés aux représentations exactes des quantités pourrait participer à la réduction du degré d'approximation des représentations analogiques (c.-à-d. améliorer l'acuité numérique) et donc réduire le caractère d'approximation spatiale objectivée sur la ligne numérique (c.-à-d. son caractère « logarithmique »).

Pour étayer cette hypothèse, plusieurs études ont visé à mesurer l'évolution de la représentation spatiale des quantités chez les enfants, à différents âges, en leur demandant de positionner un nombre symbolique précis sur une ligne numérique bornée, mais non graduée (voir **Figure 12.A**, tirée de Fayol, 2018a). Chez l'enfant, la représentation spatiale des quantités symboliques serait d'abord logarithmique : à distance numérique égale, la « distance mentale » reproduite sur la ligne entre de « grands » symboles numériques est plus « petite » que celle qui sépare les « petits » symboles (pour une illustration d'une telle représentation logarithmique entre les symboles 1 et 1000 chez des enfants de 7-8 ans, voir **Figure 12.B** ; tirée de Siegler & Opfer, 2003).

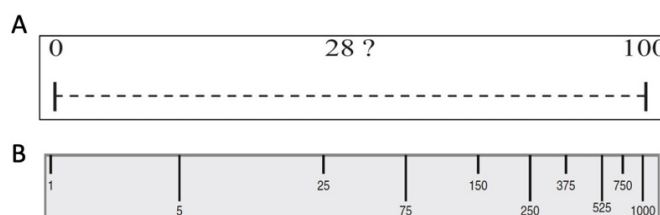


Figure 12 : Figures représentant la tâche de ligne numérique symbolique

- A.** Exemple d'une épreuve de placement d'une quantité (28) sur une ligne numérique bornée de 0 à 100 (tiré de Fayol, 2018a, p. 46). **B.** Exemple de représentation logarithmique de la position des nombres vers 7-8 sur une ligne numérique bornée de 0 à 1000 (tiré de Siegler & Opfer, 2003).

Mais il a surtout été illustré, au fur et à mesure de l'avancée dans la scolarisation, la mise en place d'un phénomène de linéarisation progressive de cette représentation spatiale des quantités symboliques (Berteletti et al., 2010; J. L. Booth & Siegler, 2006; Siegler & Booth, 2004; Siegler & Opfer, 2003), autrement dit « distance mentale » et « distance mathématique réelle » coïncideraient davantage. Il est toutefois important de préciser que ce phénomène de linéarisation dépendrait de l'intervalle considéré (il pourrait concerner dans un premier temps un intervalle numérique de 0 à 10, tandis que la représentation resterait logarithmique sur un intervalle numérique de 0 à 100 ; Berteletti et al., 2010). Chez un même enfant, à un âge donné, coexisteraient des représentations linéaires et logarithmiques. Une hypothèse est que ce phénomène de linéarisation, directement en lien avec l'acuité numérique de l'enfant (c.-à-d. son degré d'approximation dans la discrimination des quantités analogiques), dépende de l'expertise des enfants dans la maîtrise et la manipulation des symboles correspondants. Les performances à cette tâche de représentation spatiale des quantités symboliques pourraient donc illustrer un phénomène d'influences bidirectionnelles entre un système analogique « inné » d'approximation spatiale des quantités et un système symbolique culturel : l'acquisition et la maîtrise progressives du second modifieraient les caractéristiques approximatives du premier. Par ailleurs, il a été suggéré que ce phénomène de linéarisation soit un élément clé du développement de la cognition numérique. À l'aide de la tâche de ligne numérique symbolique, il a été montré l'existence de fortes différences interindividuelles qui avaient tendance à persister et à être corrélées à l'apprentissage de l'arithmétique de façon concurrente (J. L. Booth & Siegler, 2006; Siegler & Booth, 2004) ou ultérieure (Gunderson, Ramirez, Beilock, & Levine, 2012).

Par ailleurs, de façon tout à fait intéressante, si le phénomène de représentation spatiale des quantités avait également été décrit au sein de la population de Mundurucus (ce peuple d'Amazonie déjà décrit en première partie de ce chapitre, sans système symbolique exact des quantités au-delà de 5, voir section 1.1.2 ; Pica et al., 2004), il a aussi été souligné que cette représentation spatiale conservait un caractère logarithmique dans cette population, y compris chez l'adulte sur des intervalles numériques impliquant des petites quantités (Dehaene et al., 2008). Ces résultats ont donc permis de renouveler l'hypothèse selon laquelle le passage d'une représentation logarithmique à une représentation linéaire ne relèverait pas d'un processus maturationnel, mais davantage de l'effet de la scolarisation, de l'apprentissage ou de la manipulation du système symbolique des quantités exactes (Matejko & Ansari, 2016; Piazza et al., 2013). Pour souligner le poids de l'expérimentation et de la manipulation du système

symbolique dans ce phénomène de linéarisation, il est intéressant de noter que, même chez des adultes occidentaux « normalement scolarisés », l'aspect logarithmique pourrait être conservé sur la représentation des très grands nombres (p. ex. d'ordre 10^9 et donc probablement très peu manipulés ; Dehaene, 2010). Les racines innées approximatives du système symbolique pourraient lui conférer cette caractéristique spatiale, néanmoins la forme de celle-ci ou plutôt sa linéarisation pourrait dépendre directement de l'acquisition du système symbolique et de sa manipulation (Feigenson et al., 2004; Gallistel & Gelman, 1992).

Au niveau cérébral, une étude récente soutient également cette idée. Chez des enfants de 10 ans, Suárez-Pellicioni et Booth ont, dans un premier temps, mesuré les performances mathématiques symboliques (via une tâche de résolution d'opérations arithmétiques chronométrée) ainsi que leur activité cérébrale en IRMf lors de la comparaison de quantités analogiques (Suárez-Pellicioni & Booth, 2018). Ils ont ensuite répété ces mesures chez ces mêmes enfants deux ans plus tard. En utilisant des modèles visant à tester la direction des relations entre mesures symboliques et non symboliques, ils ont montré que leurs résultats étaient davantage en faveur d'une influence de la maîtrise symbolique sur la compétence d'approximation non symbolique. Autrement dit, plus le niveau initial en mathématiques symboliques était élevé à 10 ans, plus le recrutement de l'IPS était accru deux ans plus tard, témoignant d'une meilleure acuité numérique analogique. Pour les auteurs, le degré d'expertise dans la manipulation symbolique pourrait donc affiner la représentation neuronale initiale des quantités approximatives (Suárez-Pellicioni & Booth, 2018).

L'ensemble des résultats exposés dans cette section suggèrent que les systèmes non symboliques et symboliques seraient en lien, mais que ce lien serait davantage bidirectionnel que ne le suppose leur seul « décours développemental ». Le système symbolique serait certes une acquisition culturelle, ultérieure au système non symbolique inné, mais pourrait rester lié à cette représentation approximative innée. Néanmoins, la forme de cette approximation dépendrait, en retour, de la maîtrise et de la manipulation du système symbolique.

Quelle que soit la direction de la relation entre systèmes symbolique et non symbolique, ce modèle conforte l'idée d'un apprentissage incrémental. Mais cette relation pourrait ne pas être unidirectionnelle et l'acquisition des symboles numériques affinerait également le degré d'approximation inhérente au système non symbolique (Mussolin, Nys, Leybaert, & Content, 2016; Piazza et al., 2013; Suárez-Pellicioni & Booth, 2018).

2.2. Des différences entre représentations symboliques exactes et représentations non symboliques approximatives

De façon additionnelle aux travaux venant d'être présentés et ayant montré l'engagement de l'IPS dans les tâches symboliques et non symboliques, l'existence de différences spécifiques à chacun des systèmes numériques a été suggérée (Cohen Kadosh et al., 2008; Pinel et al., 2001). Sans remettre en question l'existence d'un substrat cérébral commun, différents mécanismes cérébraux pourraient être impliqués dans le traitement des quantités selon le format numérique employé (pour une méta-analyse, voir Sokolowski, Fias, Mousa, et al., 2017).

2.2.1. Des différences au sein de l'IPS, du cortex pariétal et du cortex frontal

L'activité de l'IPS pourrait être plus ou moins latéralisée selon le format numérique des quantités. Ainsi il a été proposé que la latéralisation droite de l'activité de l'IPS puisse être en lien avec le traitement des quantités tous formats confondus (Holloway & Ansari, 2010), tandis que la latéralisation gauche du recrutement de l'IPS puisse être spécifique au traitement des quantités exclusivement symboliques (Cohen Kadosh, Cohen Kadosh, Kaas, Henik, & Goebel, 2007; Holloway, Battista, Vogel, & Ansari, 2013; Notebaert et al., 2011; Piazza et al., 2007). Cette dissociation de la latéralisation du recrutement de l'IPS a aussi été rapportée par une méta-analyse qui visait à déterminer la convergence des résultats d'imagerie (*activation likelihood estimation*) de 93 études différentes (Sokolowski, Fias, Bosah Ononye, et al., 2017).

Une autre méta-analyse réalisée par le même groupe de chercheurs a aussi permis de montrer que les différences de réseaux cérébraux recrutés pourraient ne pas se limiter à l'IPS, mais être davantage distribuées au sein des régions pariétales et frontales (voir **Figure 13**, tirée de Sokolowski, Fias, Mousa, et al., 2017). Le gyrus supramarginal droit, le lobule pariétal inférieur droit et le gyrus angulaire gauche pourraient être davantage recrutés pour les stimuli symboliques (par rapport aux stimuli non symboliques, en orange sur **Figure 13**) ; le lobule pariétal inférieur gauche serait quant à lui recruté de façon spécifique pour le traitement des nombres arabes. Par ailleurs, un réseau fronto-pariétal droit (incluant le lobule pariétal supérieur droit, le lobule pariétal inférieur droit, le précuneus, le gyrus frontal supérieur, l'insula) pourrait être spécialisé pour le traitement des stimuli non symboliques (par rapport aux stimuli symboliques, en vert sur **Figure 13**).

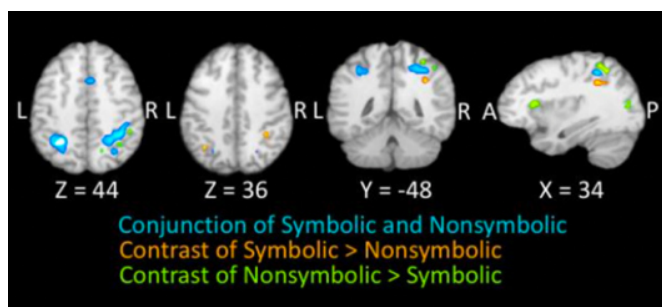


Figure 13 : Figure tirée de Sokolowski et al. (2017) présentant des cartes de conjonction (en bleu) et de contraste (en orange et vert) de l'activité cérébrale dédiée aux quantités symboliques et non symboliques (issues de l'analyse par Activation likelihood estimation). En bleu, les régions mises en évidence par l'analyse de conjonction pour le traitement des quantités symboliques et non symboliques. En orange, les régions mises en évidence par l'analyse de contraste (symboliques > non symboliques) et en vert les régions mises en évidence par l'analyse de contraste inverse (non symboliques > symboliques). Analyses de conjonction et de contraste effectuées au seuil $p < 0.01$ non corrigé et volume minimum de 50mm³, coordonnées (x, y, z) dans l'espace de Talairach.

2.2.2. Des différences cérébrales davantage distribuées

Enfin, certains travaux ont montré l'existence de différences d'activité cérébrale plus largement distribuées au sein du cortex cérébral, selon le format des quantités numériques

présentées. Par exemple, le traitement des quantités symboliques pourrait recruter également les régions temporales (Holloway & Ansari, 2010). Schématiquement, c'est déjà ce que supposait le modèle du « triple code » proposé par Dehaene et Cohen (Dehaene & Cohen, 1997; Dehaene et al., 2003) : le code symbolique verbal serait davantage supporté par les aires du langage dans l'hémisphère gauche (Roux, Lubrano, Lauwers-Cances, Giussani, & Démonet, 2008; Shum et al., 2013; Starrfelt & Behrmann, 2011) tandis que le code indo-arabe solliciterait plutôt les régions visuelles occipito-temporales de façon bilatérale (Pinel et al., 2001). Notons cependant qu'il n'existe pas de réel consensus sur les régions cérébrales dédiées au traitement de chacun des codes numériques. Une méta-analyse récente a d'ailleurs souligné l'existence de résultats hétérogènes sur l'identification des régions cérébrales susceptibles d'être dédiées aux traitements numériques symboliques (Yeo, Wilkey, & Price, 2017). L'hétérogénéité des résultats pourrait notamment s'expliquer par les différents types de tâches IRMf employés, mais aussi par les différentes tâches cognitives utilisées comme « contraste » de la tâche IRMf d'intérêt (Yeo et al., 2017).

Enfin pour terminer cette section, il est important de signaler l'existence de travaux qui mettent en doute la vision dominante d'un code commun aux différents formats numériques (pour revue, voir Wilkey & Ansari, 2020). Certaines données suggèrent que le traitement des quantités symboliques pourrait ne partager aucun réseau cérébral commun avec le traitement des quantités non symboliques (Buck, De Smedt, & Op de Beeck, 2014; Bulthé, De Smedt, & Op de Beeck, 2015; Lyons & Beilock, 2018) et, de façon plus générale, que le système symbolique pourrait être un système se développant totalement indépendamment du système non symbolique (Reynvoet & Sasanguie, 2016).

3. Calculs et opérations arithmétiques élémentaires

Comme nous l'avons souligné tout au long de la première partie de ce chapitre, les premières habiletés numériques chez l'enfant sont nombreuses et variées. L'acquisition de certaines compétences symboliques pourrait représenter de véritables défis pour l'enfant et les différentes habiletés numériques seraient susceptibles d'entretenir des liens étroits. Ces disparités interindividuelles pourraient par ailleurs être en lien avec les premières compétences ultérieures de calcul (p. ex. Dowker, 2008; Geary et al., 2018) ainsi qu'avec les acquisitions mathématiques plus complexes du secondaire et au-delà (p. ex. Claessens, Duncan, & Engel, 2009; mais ces acquisitions ultérieures ne seront pas présentées dans le cadre de cette thèse). Dans cette deuxième partie, nous exposerons les différents mécanismes d'apprentissage du calcul. L'entrée de l'enfant dans le calcul va supposer bien sûr une composante incrémentale de la maîtrise du système symbolique, mais peut également être objectivée comme plusieurs apprentissages supplémentaires, individualisables et susceptibles de représenter des difficultés indépendamment des apprentissages précédents.

Nous présenterons dans un premier temps les travaux qui suggèrent un phénomène d'intuition arithmétique chez l'enfant sur la base de sa capacité à approximer les quantités. Dans

un second temps, nous présenterons les différentes étapes permettant à l'enfant d'entrer progressivement dans le calcul mental puis de maîtriser cette compétence, notamment par la mise en place de différentes stratégies que nous détaillerons.

3.1. Compétences quantitatives approximatives et intuition arithmétique

En première partie de ce chapitre, nous avons montré que, sur la base du système non symbolique, les bébés pourraient posséder une intuition précoce de la manière dont des transformations (ajout ou retrait) peuvent affecter la quantité (p. ex. l'étude de Wynn, 1992a précédemment citée dans la section 1.1.1 ; mais aussi; Levine, Jordan, & Huttenlocher, 1992; Starkey, 1992). Une étude réalisée avec des enfants de 5 ans sur la résolution de problèmes arithmétiques symboliques (additions et soustractions, formats verbal et indo-arabe) a également permis d'illustrer l'influence intuitive du système approximatif des quantités pour la résolution d'opérations (Gilmore et al., 2007). Dans cette expérience, les étapes de chaque problème étaient présentées aux enfants à la fois avec un énoncé visuel indo-arabe et avec un énoncé symbolique verbal. Il n'était pas demandé aux enfants de fournir le résultat exact de l'opération, mais de décider si celui-ci était plus grand ou plus petit que le référentiel proposé. En fait, le procédé supposait de demander aux enfants d'additionner (ou de soustraire) des « bonbons » d'un personnage (p. ex. « Sarah a 21 bonbons, elle en obtient 30 de plus ») et d'indiquer ensuite si le nombre final de bonbons de ce personnage était supérieur ou inférieur à celui d'un autre personnage « référentiel » (dans notre exemple « John a 34 bonbons. Qui en a le plus ? » voir **Figure 14** pour illustration de cet énoncé). La particularité de cet exercice est que la taille des quantités symboliques correspondant aux résultats des opérations demandées était trop grande (jusqu'à 98) pour que les enfants de 5 ans puissent calculer l'opération de façon exacte. Pourtant, les résultats de l'étude ont montré que les enfants étaient capables de trouver la réponse correcte au-delà du niveau de chance. Sans pour autant fournir le résultat exact du calcul demandé, ils parvenaient à situer le résultat par rapport au référentiel proposé (dans notre exemple, l'enfant n'avait pas à répondre « Sarah a 51 bonbons », mais seulement à indiquer qu'elle en possédait plus que le référentiel, c.-à-d. « Sarah a plus de bonbons »). Selon les auteurs, ces résultats pourraient témoigner de la capacité spontanée des enfants, alors au seuil de l'apprentissage formel de l'arithmétique, à raisonner sur des opérations en convertissant intuitivement les quantités symboliques présentées en quantités approximatives non symboliques (Gilmore et al., 2007).

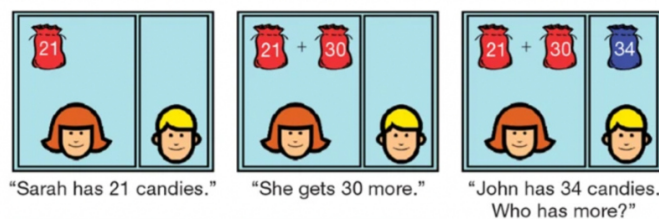


Figure 14 : Figure tirée de Gilmore et al. (2007) illustrant un exemple de problème additif présenté à l'enfant, l'énoncé verbal étant également lu par l'examinateur.

3.2. Calcul mental et transformations arithmétiques

De façon générale, l'entrée dans le calcul mental exact serait très dépendante des compétences alors en cours d'acquisition, concernant la chaîne numérique verbale (notamment sa manipulation : « compter à partir de n », « compter à rebours », etc.) et le dénombrement. Au départ, les stratégies utilisées par les enfants pourraient varier énormément (Groen & Resnick, 1977; Shrager & Siegler, 1998). Au niveau comportemental, il existe plusieurs façons d'identifier le type de stratégie utilisée par l'enfant : par exemple, observer son comportement (notamment lors de la manipulation d'items), demander son rapport verbal sur le type de stratégie utilisée (subjectif) ou encore utiliser des mesures de chronométrie. Les mesures d'activités cérébrales peuvent permettre également d'informer sur les procédures utilisées pour résoudre le calcul.

3.2.1. Aides externes : visualisables et/ou manipulables

Pour commencer à résoudre des calculs, les enfants vont majoritairement recourir à des aides externes (c.-à-d. des objets manipulables ou à défaut leurs doigts) afin de visualiser les quantités à dénombrer pour résoudre le calcul demandé (Baroody & Tiilikainen, 2003; Carpenter & Moser, 1984; N. C. Jordan, Kaplan, Ramineni, & Locuniak, 2008). Ensuite, selon leur degré d'expertise et selon le type de calcul demandé (addition ou soustraction), les enfants pourraient optimiser les stratégies de comptage/dénombrement utilisées (p. ex. en partant d'une stratégie qui consiste à « compter tout » pour arriver à une stratégie qui consiste à ne compter plus « qu'à partir du plus grand opérande » ; Baroody, 1987; Maclellan, 1995).

3.2.2. Intériorisation progressive

Peu à peu, les enfants apprendraient à se passer des supports de comptage objectivables en les internalisant progressivement grâce au comptage verbal (Briars & Larkin, 1984; Carpenter & Moser, 1984; Fuson, 1982; N. C. Jordan et al., 2008; Resnick, 1989). Néanmoins résoudre un calcul sans support externe visualisable et manipulable demanderait à l'enfant un coût cognitif supplémentaire. Cela suppose en effet qu'il puisse parcourir mentalement la chaîne numérique verbale tout en maintenant les opérandes de l'énoncé en mémoire de travail (Noël, 2009; Siegler, 1987). Il serait donc possible que cette transition vers le calcul uniquement verbal se réalise via une étape intermédiaire consistant à se représenter mentalement chacun des items à dénombrer (notamment en mobilisant une représentation mentale de leurs doigts à dénombrer ; Domahs, Krinzinger, & Willmes, 2008).

Au niveau comportemental, cette phase d'intériorisation du calcul va, au départ, se manifester par un temps de réponse allongé, notamment du fait d'un effort attentionnel soutenu. Il a été proposé d'utiliser cette mesure du temps de réponse comme indicateur indirect de la procédure intériorisée utilisée par l'enfant (Groen & Parkman, 1972). Chez les enfants de 4-5 ans, il a été observé que le temps de réponse était, en moyenne, lié à la taille de la somme des deux opérandes (incrément de 400 ms environ par itération supplémentaire ; Groen & Parkman, 1972). Cette « taille » du temps de réponse pourrait signifier que l'enfant utiliserait la stratégie

de « compter tout » (Briars & Siegler, 1984). Chez les enfants plus âgés (de 6 à 8 ans environ), le temps de résolution serait ensuite davantage prédit par la taille du plus petit des deux opérandes. Cela pourrait signifier que l'enfant utiliserait alors la stratégie du « minimum à compter » (Ashcraft & Fierman, 1982; Groen & Parkman, 1972; Shrager & Siegler, 1998).

Par la suite, à force de répétition et d'entraînement, la résolution de calculs chez l'enfant serait non seulement plus exacte, mais aussi plus rapide. En effet, cette réduction du temps de réponse indiquerait une diminution du recours aux stratégies attentionnelles et exécutives de soutien (Siegler & Shrager, 1984). Une façon robuste de mesurer cette évolution est d'utiliser une tâche arithmétique chronométrée (dite de « fluence mathématique »). La réussite à cette tâche serait un indicateur particulièrement fiable de la performance en mathématiques concurrente ou ultérieure (Fuchs et al., 2006; N. C. Jordan, Hanich, & Kaplan, 2003; Nunes, Bryant, Barros, & Sylva, 2012; Russell, 2000). L'acquisition de cette fluence ne serait donc pas anecdotique et il importe d'identifier les stratégies qui la soutiennent.

Au niveau cérébral, lors des premières étapes de la résolution intériorisée du calcul mental, l'effort attentionnel déployé par l'enfant pourrait se traduire par le recrutement des régions préfrontales. Par exemple, en comparant l'activité cérébrale associée à la résolution d'additions simples (opérande à un chiffre) chez des enfants âgés de 7 et 9 ans, Qin et collaborateurs (2014) ont montré que les enfants les plus jeunes activaient davantage des régions du cortex préfrontal que leurs aînés plus expérimentés. Une autre étude a conduit à des conclusions similaires sur des sujets d'âges encore plus variés (de 8 à 19 ans) : la comparaison de l'activité cérébrale selon l'âge des sujets est en faveur d'un recrutement plus important des régions préfrontales chez les enfants les plus jeunes (Rivera et al., 2005). Dans une méta-analyse de 17 études d'IRMf portant sur la résolution de calcul chez des groupes d'enfants (âgés en moyenne de 9 ans), Arsalidou et collaborateurs (2018) ont également souligné le rôle du cortex préfrontal lors de la résolution intériorisée du calcul mental (voir aussi, Ansari, 2008; Zamarian, Ischebeck, & Delazer, 2009). Enfin, le recrutement de ces régions frontales a également été objectivé chez des sujets plus « experts », mais spécifiquement lors de la résolution de calculs complexes requérant potentiellement davantage d'effort attentionnel de leur part (De Smedt, Holloway, & Ansari, 2011; Gruber, Indefrey, Steinmetz, & Kleinschmidt, 2001; Kong et al., 2005). De façon générale, de nombreux travaux ont montré le recrutement de ces régions cérébrales dédiées aux fonctions exécutives (ou attentionnelles¹) dites « de plus haut niveau » (voir aussi Dehaene & Cohen, 1997; Dehaene et al., 2003).

La méta-analyse de Arsalidou et collaborateurs (2018), évoquée précédemment, avait aussi souligné le recrutement des régions pariétales, et notamment l'IPS, pour la résolution de calcul mental chez des enfants de 9 ans en moyenne. Plusieurs travaux portant sur la résolution arithmétique chez l'adulte et/ou chez l'enfant ont également montré le recrutement de l'IPS (Bugden, Price, McLean, & Ansari, 2012; Kong et al., 2005; Prado, Mutreja, & Booth, 2014; Venkatraman, Ansari, & Chee, 2005). Le degré de recrutement de cette région pendant la

¹ Voir section A2.2 de l'**annexe 2** pour une clarification sur les différentes composantes des fonctions exécutives, selon le modèle proposé par Diamond (2013).

résolution de calcul pourrait d'ailleurs être en lien avec les performances comportementales (Amalric & Dehaene, 2016; Rivera et al., 2005). Au niveau interindividuel, il a même pu être objectivé que le degré de superposition entre la section de l'IPS recrutée pendant la résolution de soustraction et celle recrutée pendant la comparaison des quantités non symboliques était lié aux performances de calcul (Prado et al., 2011). Le postulat du caractère fortement incrémental de l'apprentissage des mathématiques pourrait donc ne pas se limiter à la mise en évidence de liens entre capacités comportementales précoces et ultérieures, rapportés tout au long de ce chapitre. Les caractéristiques de l'activité cérébrale inhérente à la résolution élaborée de calcul pourraient étayer cette hypothèse et être interprétées comme un phénomène de réutilisation d'une région cérébrale initialement dédiée à l'approximation des quantités analogiques (cohérent avec la théorie de « *recyclage neuronal* » de Dehaene & Cohen, 2007).

De façon un peu plus générale, un modèle de transition « antéro-postérieur » du réseau cérébral dédié au calcul mental permet d'illustrer les corrélats cérébraux de l'évolution de la compétence dans la résolution du calcul mental (**Figure 15**, tirée de Kucian & Von Aster, 2015). La **Figure 15** illustre le recrutement des régions cérébrales antérieures lors de l'utilisation d'une stratégie de résolution de calcul plutôt immature chez l'enfant¹. Chez l'adulte, à l'inverse, le cortex pariétal serait davantage spécialisé pour l'arithmétique, libérant ainsi les régions antérieures impliquées dans les ressources attentionnelles et la mémoire de travail. Ce modèle développemental pourrait ne pas représenter la seule dissociation entre adultes et enfants, mais pourrait aussi s'appliquer aux trajectoires développementales selon le développement des compétences arithmétiques des enfants. Ainsi un phénomène de désengagement des régions préfrontales lors de la résolution de calculs serait déjà objectivable chez les enfants lorsqu'ils améliorent leurs performances arithmétiques (Prado et al., 2014; Qin et al., 2014; Rivera et al., 2005) ou lors de la comparaison avec des adultes (Kawashima et al., 2004; Kucian, Aster, Loenneker, Dietrich, & Martin, 2008).

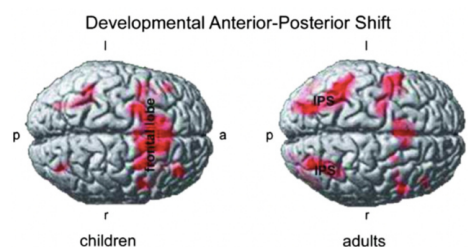


Figure 15 : Figure tirée de Kucian et von Aster (2015) représentant le réseau d'activation fronto-pariétal typique du traitement numérique chez l'enfant (à gauche) et chez l'adulte (à droite) : déplacement « ontogénétique » du recrutement des régions majoritairement frontales (exécutives et attentionnelles) à des régions plus « spécifiques » aux tâches numériques dans le sulcus intra-pariétal (IPS) (a : antérieur, p : postérieur, l : gauche, r : droite).

¹ Même si on note également que l'IPS pourrait déjà être recruté lors de la résolution immature du calcul chez l'enfant (de façon cohérente avec Bugden, Price, McLean, & Ansari, 2012).

3.2.3. Récupération des résultats en mémoire à long terme

Une première façon d'expliciter le gain d'efficacité pour la résolution de calcul, observé au cours du développement, serait de considérer qu'à force de manipulations les résultats des opérations seraient stockés en mémoire à long terme sous forme de codes verbaux (Dehaene et al., 2003). Dès lors, résoudre un calcul consisterait à récupérer la réponse associée en mémoire (Ashcraft, 1982, 1992).

Notons ici le cas particulier de la résolution des multiplications et divisions. La résolution de multiplications (Campbell & Penner-Wilger, 2006; notamment celle impliquant des « petits » opérands ; Campbell & Xue, 2001) revêt un caractère spécifique du fait de la stratégie d'enseignement à dominante déclarative de cette opération spécifique. Dit autrement, l'apprentissage des multiplications se réalise le plus souvent par un apprentissage « par cœur » qui résulterait en la construction mentale d'un réseau de faits arithmétiques (Ashcraft, 1992; Lépine, Roussel, & Fayol, 2003). Du fait de cet apprentissage, les multiplications simples seraient ensuite quasi exclusivement résolues par récupération en mémoire (Campbell & Xue, 2001; LeFevre et al., 1996). Étant donnée la sollicitation importante du système mnésique, tous les enfants ne seraient pas égaux dans la mise en place de cette stratégie d'encodage et récupération en mémoire (certains enfants pouvant présenter un encodage laborieux, mais aussi un défaut de récupération). En ce qui concerne la résolution des divisions, elle consisterait avant tout à recourir à des additions itérées (donc lentes et coûteuses en attention) ou à la récupération en mémoire via une multiplication inversée (Fayol, 2018b).

Au niveau comportemental, la première façon d'identifier l'usage de la stratégie de récupération en mémoire serait de se baser sur le report subjectif du sujet (Dowker, 1996; Geary, Frensch, & Wiley, 1993; LeFevre et al., 1996; Svenson, 1985). Une seconde façon pourrait consister à évaluer la chronométrie de la résolution du calcul. De façon générale, comme nous l'avons précisé dans la section précédente (2.2.2), la réduction du temps de réponse atteste de l'usage d'une stratégie de calcul élaborée par rapport aux premières étapes de calcul intériorisé. Néanmoins, la différenciation précise de ces temps de réponse « rapides » pourrait informer sur la stratégie utilisée. Lors de ces résolutions « rapides », il serait ainsi possible d'objectiver un effet de taille, néanmoins bien plus court que celui précédemment décrit (incrément régulier de 20 ms ; Groen & Parkman, 1972). Il a été proposé que cet effet serait trop court pour soutenir une stratégie de comptage intériorisée et qu'il indiquerait plutôt un phénomène de récupération en mémoire (Groen & Parkman, 1972)¹. L'incrément du temps de réponse, très court, mais régulier, pourrait s'expliquer par un effet de fréquence (p. ex. la force des associations en mémoire selon la fréquence d'apparition des problèmes ; Ashcraft, 1992) ou par le temps nécessaire au parcours du réseau de faits arithmétiques en mémoire (Siegler & Shrager, 1984). En raison de l'encodage des résultats en mémoire à long terme sous formats verbaux (Dehaene et al., 2003), l'usage de la stratégie de récupération en mémoire a aussi été suggéré par la mise en évidence d'un lien de corrélation entre performances aux calculs

¹ Une interprétation alternative à cet effet a également pu être proposée et sera exposée dans la section suivante 2.2.4).

résolus par récupération en mémoire et compétences phonologiques (De Smedt, Taylor, Archibald, & Ansari, 2010; Dirks, Spyer, van Lieshout, & de Sonneville, 2008; Koponen et al., 2013; Simmons & Singleton, 2008; Vukovic, Roberts, & Green Wright, 2013).

Au niveau cérébral, étant donné l'importance de la région hippocampique dans la mémoire déclarative (Eichenbaum, 2000; Eichenbaum & Cohen, 2014; Tulving & Markowitsch, 1998), la mise en évidence du rôle de cette région pour la résolution de calcul a été suggérée comme argument supplémentaire en faveur de l'usage de la procédure de résolution par récupération en mémoire. Deux études précédemment citées de Rivera et Qin (2005) ont montré que, chez l'enfant, le désengagement du cortex préfrontal pourrait être concomitant avec une augmentation de l'activation de l'hippocampe. Une étude longitudinale portant sur des enfants de 7 à 9 ans a également mis en évidence un lien entre recrutement des régions hippocampiques et parahippocampiques et performances comportementales de récupération en mémoire des enfants (Cho et al., 2012). Le volume de l'hippocampe chez des enfants de CE2 pourrait prédire positivement le bénéfice d'une intervention de 8 semaines portant sur les mathématiques (Supekar et al., 2013). Une autre étude interventionnelle portant sur la résolution de multiplications complexes chez des adultes a également souligné le rôle de l'hippocampe (via une augmentation significative de sa connectivité ; Klein, Willmes, Bieck, Bloechle, & Moeller, 2019).

D'avantage recruté chez l'enfant que chez l'adulte, le rôle de l'hippocampe dans le processus de récupération en mémoire pourrait être transitoire (De Smedt et al., 2011). Cette structure cérébrale pourrait jouer un rôle pivot dans l'encodage des faits arithmétiques nouveaux avant que leurs représentations soient transférées dans des régions temporales dédiées au langage (De Smedt et al., 2011). En effet, la relation entre efficacité de récupération en mémoire des faits arithmétiques et performances phonologiques pourrait se manifester au niveau cérébral par le recrutement des réseaux temporaux liés au langage lors de la résolution de calcul, notamment le gyrus angulaire (Arsalidou & Taylor, 2011; De Visscher, Berens, Keidel, Noël, & Bird, 2015; Duffau et al., 2002; T. M. Evans, Flowers, Napoliello, Olulade, & Eden, 2014; Grabner et al., 2009, 2007; Prado et al., 2014). Ces résultats sont cohérents avec un rôle attribué au gyrus angulaire de potentiel médiateur dans la récupération des faits arithmétiques stockés verbalement dans la mémoire à long terme (Dehaene et al., 2003). Ces résultats sont aussi cohérents avec l'implication du gyrus temporal moyen dans la représentation des informations lexico-sémantiques (Blumenfeld, Booth, & Burman, 2006; J. R. Booth et al., 2002).

Enfin, dans une méta-analyse récente, Pollack et Ashby (2018) ont souligné que la récupération des faits arithmétiques en mémoire pourrait aussi recruter une région dédiée au traitement phonologique (le gyrus fusiforme gauche ; A. Martin, Schurz, Kronbichler, & Richlan, 2015). D'un point de vue développemental, il a été montré que le recrutement des régions cérébrales dédiées au langage lors de la résolution de calculs récupérés en mémoire pourrait augmenter avec l'expertise des enfants (Ansari, 2008; Demir, Prado, & Booth, 2014; Prado et al., 2014; Zamarian et al., 2009), mais aussi chez les adultes bénéficiant d'un entraînement arithmétique (Ischebeck, Zamarian, Egger, Schocke, & Delazer, 2007). Cette augmentation de l'activité cérébrale pourrait ainsi refléter la force des associations sémantiques entre les problèmes arithmétiques et leurs résultats stockés en mémoire.

3.2.4. Automatisation de la procédure

Une seconde façon de comprendre le phénomène d'amélioration de la fluence de résolution arithmétique accompagné du désengagement progressif du contrôle exécutif lors de la résolution des calculs, est de considérer que l'utilisation répétée des procédures de résolution des calculs pourrait mener à leur automatisation (Chazoule & Thevenot, 2018; Fayol & Thevenot, 2012; Uittenhove, Thevenot, & Barrouillet, 2016). De la même manière qu'il a été spécifié, dans la section précédente, le statut particulier des multiplications vis-à-vis des procédures de stockage et récupération en mémoire (Campbell & Xue, 2001), la résolution de soustractions pourrait aussi être envisagée comme un cas spécifique de résolution arithmétique majoritairement centrée sur la procédure (du fait de leurs modalités d'enseignement et d'entraînement lors de la scolarisation ; Barrouillet, Mignon, & Thevenot, 2008; Seyler, Kirk, & Ashcraft, 2003).

Ces dernières années plusieurs travaux de recherche ont visé à distinguer la stratégie d'automatisation de la procédure de celle de récupération en mémoire. En effet, caractérisées par une diminution *a priori* équivalente du temps de réponse (une meilleure « fluence » arithmétique), ces deux stratégies sont de prime abord complexes à dissocier. Pour les différencier, il a d'abord été proposé d'étudier les reports subjectifs individuels sur le type de stratégie utilisée, mais la validité d'une telle mesure a été discutée. Des indices neurophysiologiques ont été obtenus en faveur de la validité de cette mesure de reports subjectifs (Grabner & De Smedt, 2011), mais son manque de fiabilité a aussi été souligné ; l'automatisation accélérant tant le processus de résolution que celui-ci pourrait ne plus être accessible à la conscience (Ericsson & Simon, 1980; Uittenhove et al., 2016) ou la stratégie rapportée pourrait être influencée par le type de consigne donnée au sujet (Kirk & Ashcraft, 2001). Pour différencier les deux types de stratégies, une précision accrue dans l'étude des temps de réponse a été recommandée. L'existence d'un effet de taille, bien que réduit, lors de la résolution élaborée de calculs avec des petits opérands, a déjà été discutée dans la section précédente suggérant une procédure de récupération en mémoire (Groen & Parkman, 1972). Néanmoins, ces résultats ont été remis en question car certaines caractéristiques de cet effet de taille rapide pourraient, au contraire, témoigner de l'automatisation de la procédure. Les temps de réponse de participants adultes pour la résolution de très petites additions (opérands de 1 à 4) ont ainsi été analysés en détail et cela a permis de montrer une augmentation linéaire constante des temps de réponse en fonction de la taille de chacun des deux opérands respectivement (Barrouillet & Thevenot, 2013). D'après Barrouillet et Thevenot (2013), de tels résultats ne seraient pas cohérents avec l'hypothèse d'une récupération en mémoire (l'effet de taille observé ne pourrait s'expliquer ni par la fréquence d'exposition ni par un effet d'interférence en mémoire) et soutiendraient davantage l'hypothèse d'une automatisation de la procédure pour la résolution de ces petites additions.

Enfin, de nouveaux paradigmes ont été mis au point afin de discriminer le type de stratégie de résolution de calcul utilisé. Par exemple, le paradigme d'amorçage par le signe permet de tester si le fait de présenter un signe arithmétique, en amorce avant la présentation de l'opération à résoudre, peut affecter la vitesse de résolution de celle-ci. Autrement dit, si la

résolution de l'opération mobilise une composante procédurale, ce paradigme suppose que, celle-ci devrait être activée dès l'identification de la tâche à réaliser (Roussel, Fayol, & Barrouillet, 2002) et donc la résolution de l'opération devrait être accélérée en conséquence. Auprès de sujets adultes, Fayol et Thevenot (2012) ont ainsi montré que la présentation d'un signe arithmétique 200 ms avant la présentation de l'opération à résoudre diminuait le temps de réponse pour les additions et les soustractions, mais pas pour les multiplications. Ces résultats étaient en faveur de l'existence de procédures automatisées.

D'un point de vue développemental, il a été proposé que le recours à l'automatisation de la procédure nécessiterait que les enfants soient suffisamment avancés dans leurs compétences mathématiques (autrement dit, cette stratégie ne serait pas disponible dès le début de l'apprentissage de l'arithmétique). Une récente étude développementale a répliqué les résultats de l'étude précédente d'amorçage par le signe, mais uniquement chez les enfants les plus âgés de leur échantillon (la procédure d'automatisation de la procédure serait utilisée chez les enfants de plus de 13 ans ; mais pas chez ceux de 10 à 12 ans ; Poletti, Perez, Houillon, Prado, & Thevenot, 2021). Plus concrètement, il a été proposé que cette automatisation de la procédure puisse se réaliser via un phénomène d'orientation rapide (et inconsciente) des sujets dans leur représentation mentale ordonnée des nombres (le concept de « ligne numérique » décrit dans les sections 1.1.2 et 1.4.2 ; Mathieu, Gourjon, Couderc, Thevenot, & Prado, 2016; Yáñez et al., 2020).

Une étude de neuro-imagerie réalisée sur des enfants de niveaux scolaires très différents (scolarisés en début de primaire jusqu'au secondaire) a fourni des arguments supplémentaires en faveur de la coexistence de ces deux stratégies (automatisation et récupération), toutes deux hautement élaborées pour la résolution de calculs, mais néanmoins fondamentalement différentes dans les processus cérébraux recrutés (Prado et al., 2014). Cette étude consistait à évaluer les régions cérébrales recrutées lors de la résolution de soustractions ou de multiplications. Au niveau comportemental, comme attendu, les performances de résolution de calculs (fluence et précision) étaient liées au niveau scolaire. Les auteurs ont souligné qu'il n'était pas possible de déterminer, sur la base des seuls temps de réponse, le type de procédure utilisé pour chacun des deux types de calcul (soustraction ou multiplication). Pourtant, les mesures de l'activité cérébrale ont permis la mise en évidence d'une dissociation marquée. En effet, si l'activité cérébrale associée à la multiplication était cohérente avec les réseaux associés au processus de récupération en mémoire décrits dans la section précédente (notamment une augmentation du recrutement des régions dédiées au langage au cours de l'avancée dans la scolarité), les résultats associés à la résolution de soustractions donnaient à voir une activité cérébrale tout à fait différente. Plutôt qu'un recrutement des régions cérébrales dédiées au langage, la résolution des soustractions entraînait une activité de la région pariétale (le lobule pariétal droit) et cette activité était également proportionnelle à l'avancée dans la scolarité. Chez l'enfant et l'adulte, cette région cérébrale est connue pour être à la fois impliquée dans la manipulation des quantités numériques (Arsalidou & Taylor, 2011; Kaufmann et al., 2011), mais aussi dans l'attention visuo-spatiale non numérique (Krinzinger et al., 2011; Simon, Mangin, Cohen, Le Bihan, & Dehaene, 2002). Les procédures impliquées dans la résolution des soustractions pourraient donc se baser sur des mécanismes spatiaux et attentionnels « recyclés » pour l'arithmétique (Prado et al., 2014).

Une autre étude a permis d'apporter des arguments cérébraux supplémentaires au phénomène d'automatisation des procédures arithmétiques (Mathieu et al., 2018). Chez des enfants scolarisés de la primaire au lycée, l'hippocampe pourrait être un corrélat cérébral de l'effet d'amorçage par le signe (déjà mis en évidence au niveau comportemental ; Fayol & Thevenot, 2012). Chez les enfants les plus âgés, la simple perception du signe « + » entraînait une augmentation du recrutement de l'hippocampe, et cela d'autant plus que la présentation de cette amorce se traduisait par un bénéfice comportemental (c.-à-d. une augmentation de leurs performances de calcul). De façon cruciale, cet effet ne se produisait pas pour l'amorçage par le signe de la multiplication (de façon cohérente avec l'usage préférentiel de la stratégie de récupération en mémoire pour ce type de calcul). Par conséquent, une interprétation alternative du rôle de l'hippocampe dans la résolution de calcul pourrait être envisagée. Étant donné le rôle de cette structure dans les procédures d'orientation spatiale (Burgess, Maguire, & O'Keefe, 2002), mais aussi lors de la consolidation de connaissances procédurales (Albouy, King, Maquet, & Doyon, 2013), Mathieu et collaborateurs (2018) ont proposé un rôle davantage spatial du recrutement hippocampique, notamment via la création d'associations entre certains opérateurs arithmétiques et l'espace mental numérique. Cette proposition pourrait donc complexifier l'interprétation de certaines études (présentées dans la section 2.2.3 ; p. ex. De Smedt et al., 2011; Rivera et al., 2005) qui avaient conduit à montrer une augmentation de l'activité cérébrale hippocampique au fur et à mesure du développement arithmétique ; l'interprétation de cette activité cérébrale reposant alors exclusivement sur une possible mise en correspondance entre problèmes arithmétiques et faits arithmétiques stockés en mémoire.

Dans l'ensemble, les différentes études neurocognitives sur la résolution arithmétique fournissent des résultats hétérogènes, mais non nécessairement exclusifs. Il est probable que les deux procédures les plus évoluées de résolution arithmétique que nous venons de décrire (récupération en mémoire et automatisation des procédures) coexistent, chez les enfants qui possèdent des compétences mathématiques suffisamment développées. Ces procédures pourraient être mobilisées de manière différentielle, et majoritairement inconsciente, selon le type de calcul à réaliser (taille des opérandes et type d'opération). Il a pu être proposé de considérer le développement des habiletés numériques comme hiérarchiquement organisé (Von Aster & Shalev, 2007), mais cette représentation a été largement questionnée (De Smedt et al., 2013). De façon globale, il importe de noter que la représentation générale du développement des stratégies de calcul s'inscrit plutôt dans un modèle de représentation de « vagues superposées » (Siegler, 1998). Autrement dit, les différentes stratégies de réalisation de calculs, plus ou moins élaborées, ne se succéderaient pas en disparaissant au cours du développement à la suite de l'élaboration d'une nouvelle stratégie plus élaborée. Chaque enfant disposerait d'un éventail de stratégies de résolution de calcul, plus ou moins large selon ses compétences, et celles-ci resteraient disponibles et mobilisables selon les situations arithmétiques (Fayol, 2018b).

4. Outils d'évaluations mathématiques utilisés auprès des enfants francophones

Les compétences en lien avec les mathématiques sont donc diverses et les différences interindividuelles particulièrement marquées. Pour mieux comprendre le phénomène de disparités socio-économiques des compétences scolaires en mathématiques (objectivé par les études de cohortes recensées dans le chapitre 1), il pourrait être nécessaire de caractériser de façon plus fine les compétences numériques des enfants. Les liens qu'entretiennent la plupart des habiletés numériques avec d'autres processus cognitifs pourraient aussi nécessiter leur évaluation (langagiers, mnésiques et exécutifs), et ce notamment dans une démarche clinique. Néanmoins, sans perdre de vue le rôle joué par ces facteurs cognitifs (qui seront par ailleurs développés dans le chapitre suivant), le travail de thèse présenté ici se veut résolument focalisé sur la compréhension des habiletés numériques.

Pour l'évaluation de ces capacités, il est souvent optimal de recourir à des batteries de tests préexistantes, documentées et validées scientifiquement. Celles-ci respectent des critères de qualités psychométriques (notamment la standardisation, la validité ou la fidélité ; Muneaux, 2018). L'utilisation d'une batterie cognitive d'évaluation des compétences numériques permet une estimation précise de chacune d'entre elles. L'objectif est notamment d'optimiser cette évaluation en tentant de la rendre la plus « isolée » possible, en séparant les différentes compétences numériques les unes des autres pour éviter tout effet confondant (qui serait susceptible d'être observé sur une évaluation « scolaire »). Par ailleurs, ces batteries, en optimisant la standardisation des conditions de passation et de cotation, permettent de réduire les biais de subjectivité de l'expérimentateur. La plupart du temps, elles autorisent également le calcul de scores dit « standardisés » pour chaque enfant, c'est-à-dire une classification des performances de l'enfant par rapport aux performances d'autres enfants aux caractéristiques comparables. Pour cela, les scores « bruts » de l'enfant aux épreuves du test sont transformés en scores « standardisés » : rangs percentiles, notes standards, scores composites ou encore scores T (Muneaux, 2018).

À l'échelle internationale, différents tests permettent d'évaluer avec précision les compétences des enfants aux différentes composantes des systèmes symboliques et non symboliques (section 1 de ce chapitre), mais aussi aux différentes composantes arithmétiques (section 2 de ce chapitre) (p. ex. TEAM, Clements, Sarama, & Wolfe, 2011; KeyMath 3, Connolly, 2007; TEMA-3, Ginsburg & Baroody, 2003; PENS-B, Purpura, Reid, Eiland, & Baroody, 2015).

Les batteries francophones normées et dédiées aux habiletés numériques, ne se limitant pas à la seule évaluation du calcul arithmétique, sont cependant assez peu nombreuses. Nous pouvons en citer six : B-LM (Métral, 2008), Examath (Lafay & Helloin, 2016), Numérical (Gaillard, 2000), Protocole du calcul élémentaire (Menissier, 2003), Tedi-MATH (« petits » ; Van Nieuwenhoven, Noël, & Grégoire, 2001; et « grands » ; Noël & Grégoire, 2015), Zareki-R (Von Aster & Dellatolas, 2005) (pour une revue sur la qualité psychométrique de ces batteries,

voir Lafay & Cattini, 2018). Le **Tableau 1** présente un descriptif des compétences évaluées par chacune de ces batteries.

Ce chapitre a permis la présentation, d'un point de vue neurocognitif, de la large diversité des composantes qui constituent le domaine des habiletés numériques, leur acquisition ainsi que les liens qu'elles sont susceptibles d'entretenir les unes avec les autres. Il a aussi été précisé les différentes procédures et compétences pouvant participer à la résolution de calculs arithmétiques.

Pour mieux comprendre les disparités socio-économiques de la réussite scolaire en mathématiques (mises en évidence à travers les nombreuses études de cohortes présentées dans le chapitre précédent), nous proposons à présent de rendre compte dans le chapitre suivant des études ayant examiné, à l'aide d'outils précis, les éventuelles relations entre caractéristiques socio-économiques familiales et caractéristiques neurocognitives des enfants, notamment dans le domaine de la numératie.

Tableau 1 : Descriptif synthétique des compétences évaluées par les batteries francophones normées et dédiées à l'évaluation de plusieurs compétences numériques (tableau adapté de Lafay & Cattini, 2018).

Niveaux scolaires ou âges		Caractéristiques des habiletés numériques évaluées					
		Estimation des quantités non symboliques	Maîtrise de la chaîne numérique verbale	Dénombrement et cardinalité	Manipulation des quantités symboliques (ligne numérique, comparaison de symboles)	Transcodage	Arithmétique
B-LM	De la grande section de maternelle au CE1	-	-	+	-	+	+
Examath	De 8 à 15 ans	+	+	+	+	+	+
Numerical	De 7 à 10 ans	-	-	+	+	+	+
Zareki-R	De 6 à 11 ans (CP au CM2 environ)	+	+	+	+	+	+
Tedi-MATH	De la moyenne section de maternelle au CE2	+	+	+	+	+	+
Tedi-MATH Grands	Du CE2 à la 5 ^e	+	-	-	+	+	+

Chapitre 3 : Aspects neurocognitifs des liens entre statut socio-économique familial et compétences mathématiques

Les nombreuses données issues de plusieurs dizaines de cohortes internationales ou françaises ont été présentées au chapitre 1. Elles convergent toutes à montrer l'existence de fortes disparités socio-économiques pesant sur la réussite scolaire des enfants, et cela notamment dans le domaine des mathématiques. Néanmoins, si cette littérature conséquente illustre l'importance du phénomène d'inégalités scolaires dans ce domaine, elle ne permet pas de comprendre les mécanismes neurocognitifs en jeu (Farah et al., 2006). Qu'il s'agisse des résultats scolaires ou des scores à des tests standardisés, les mesures utilisées sont souvent peu spécifiques et donc insuffisantes pour permettre l'identification de capacités cognitives précises (Noble et al., 2007). Pourtant, l'identification et la compréhension des habiletés numériques modifiées selon le gradient socio-économique chez l'enfant sont des enjeux cruciaux. Déterminer des composantes cognitives spécifiques, notamment au sein de la cognition numérique, pourrait permettre, dans un second temps, autant de cibles potentielles de remédiation pour court-circuiter la relation statistique *péjorative* entre SES et réussite mathématique scolaire (Crook & Evans, 2014; Noble et al., 2005).

Ces vingt dernières années, de nombreux travaux ont visé à améliorer la compréhension des disparités socio-économiques de réussite scolaire par la caractérisation précise de domaines cognitifs susceptibles d'expliquer ces disparités. Dans une première section, ce chapitre présente les études qui ont cherché à objectiver les domaines cognitifs susceptibles de covarier selon les caractéristiques socio-économiques familiales. Pour cela, seront d'abord rapportées les études comportementales supposant le moins d'*a priori* sur les domaines identifiés, c'est-à-dire celles ayant utilisé de larges batteries neurocognitives évaluant divers domaines de la cognition. Dans cette même optique, seront également présentés des travaux ayant cherché à évaluer les relations entre variations de la structure cérébrale et caractéristiques socio-économiques. Parallèlement aux disparités comportementales révélées par l'administration de larges batteries cognitives, les mesures de covariations potentielles entre structures cérébrales et SES seraient assez peu susceptibles d'être affectées par un *a priori* cognitif. De façon générale, les travaux présentés dans cette première section vont conduire à désigner les

domaines langagiers et exécutifs comme étant les plus sensibles aux variations socio-économiques¹.

Par la suite, nous présenterons dans une deuxième section les travaux qui ont proposé d'expliquer une part des disparités socio-économiques de réussite en mathématiques en utilisant des scores langagiers ou exécutifs comme médiateurs de ces relations.

Enfin, la troisième section sera consacrée à la présentation exhaustive des travaux ayant étudié les relations entre SES et différentes habiletés numériques, telles que décomposées au sein du chapitre 2. Dans cette dernière section, seront d'abord présentés les travaux dont les résultats sont cohérents avec un postulat selon lequel les disparités socio-économiques au sein des mathématiques s'expliqueraient uniquement par des composantes cognitives qui ne leur sont pas spécifiques (plus précisément par des composantes « verbales », pour reprendre la terminologie de N. C. Jordan & Levine, 2009). Seront ensuite présentées des études qui permettent d'interroger, voire de dépasser, cette distinction, en montrant notamment l'existence de disparités socio-économiques au sein d'habiletés numériques susceptibles de s'expliquer par des composantes numériques (des composantes « non verbales » ou « *domaine spécifique* »).

1. SES et scores cognitifs : langage et fonctions exécutives

1.1. Utilisation des batteries d'évaluation cognitive pour identifier l'existence de disparités socio-économiques au sein de différents domaines cognitifs

Depuis les années 2000, un grand nombre de travaux ont proposé de détailler les liens entre caractéristiques socio-économiques familiales et caractéristiques spécifiques du fonctionnement cognitif chez l'enfant à travers différents domaines. Dans une étude princeps conduite chez des enfants américains de 5 ans répartis en deux groupes de milieux socio-économiques différents (sur la base de l'index Hollingshead, voir section 1.1 du chapitre 1), Noble et collaborateurs (2005) ont utilisé une batterie neuropsychologique permettant d'évaluer plusieurs domaines cognitifs. Cinq domaines (visuel, visuo-spatial, mnésique, langagier et exécutif) ont ainsi été évalués de façon séparée, par l'administration d'au moins deux tâches cognitives différentes pour chacun d'entre eux. Les résultats ont permis de souligner que, comparativement à leurs pairs favorisés, les enfants issus des milieux les moins favorisés présentaient plus de difficultés dans les domaines langagiers et exécutifs.

Par la suite, une deuxième étude a permis de dresser le profil cognitif d'enfants plus âgés (enfants américains de 11 ans en moyenne) répartis, là aussi, en deux groupes socio-économiques (Farah et al., 2006). La batterie d'épreuves utilisée couvrait sept domaines cognitifs différents, chacun évalué à l'aide de deux tâches. Trois des domaines évalués correspondaient aux fonctions exécutives et les quatre autres domaines étaient ceux de la

¹ C'est pourquoi nous proposons, en **annexe 2** de ce manuscrit, une revue non exhaustive des travaux ayant visé spécifiquement à préciser les disparités socio-économiques au sein de ces deux domaines cognitifs. Pour cela, seront exposées les études comportementales et d'imagerie fonctionnelle ayant visé à étudier, chez l'enfant, les relations entre ces deux domaines avec les caractéristiques socio-économiques des familles.

cognition spatiale, de la vision, de la mémoire et du langage. Par ailleurs, afin d’isoler de façon optimale la relation entre facteurs socio-économiques et profils cognitifs, les chercheurs ont précisé avoir veillé à minimiser les potentiels facteurs confondants en matière de santé. Ils ont donc utilisé comme critères d’exclusion tous les problèmes médicaux susceptibles d’interagir avec les performances cognitives. Les résultats de cette étude ont d’abord montré une relation globale entre disparités socio-économiques et score total à la batterie cognitive utilisée. Les résultats plus détaillés ont néanmoins permis de préciser que cette relation était inégale selon les domaines cognitifs considérés. Les domaines du langage, de la mémoire et certains domaines des fonctions exécutives¹ sont apparus comme les plus susceptibles de covarier avec les caractéristiques socio-économiques familiales (voir **Figure 16** ; tirée de Farah et al., 2006).

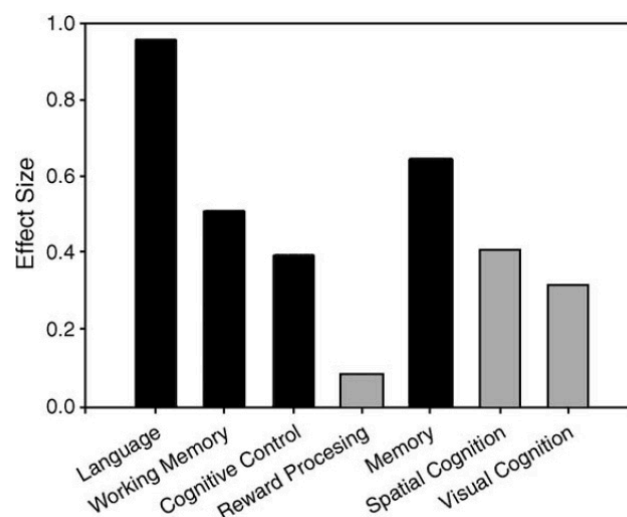


Figure 16 : Figure tirée de Farah et al. (2006) représentant les tailles d’effet (mesurées en déviations standards) des différences de performances entre groupes socio-économiques (favorisés et défavorisés) sur les mesures composites de chacun des 7 domaines cognitifs évalués dans l’étude. Les colonnes noires représentent les tailles d’effet significatives, tandis que les colonnes grises représentent les tailles d’effet pour les différences non significatives entre les deux groupes SES. N=30

Dans une autre étude, Noble et collaborateurs (2007) ont proposé d’augmenter la validité écologique de la mesure socio-économique employée pour identifier les variations dans le profil cognitif des enfants. Pour cela ils ont utilisé leur mesure SES comme un « gradient » (c.-à-d. une variable continue) susceptible d’influencer de façon progressive certains domaines cognitifs (et non plus en répartissant les enfants dans des groupes de statuts socio-économiques différents, « bas » et « haut »). Leur étude réalisée sur 150 enfants scolarisés en CP dans la région de New York a permis à la fois de renouveler et d’affiner leur précédent constat de covariations statistiques entre disparités socio-économiques et cognition langagière ainsi que, dans une moindre mesure, les domaines de cognitions spatiale, mnésique et exécutive (Noble et al., 2007).

¹ Ces résultats sont davantage détaillés en **annexe 2**.

L'utilisation de batteries cognitives a également permis d'appréhender l'aspect développemental de ces relations. Par exemple, dans une étude ultérieure, Noble et collaborateurs (2015) ont cette fois montré que les disparités socio-économiques existaient dès le plus jeune âge dans les domaines langagier et mnésique, avec toutefois des nuances selon les fonctions spécifiques évaluées au sein de ces domaines (p. ex. les disparités dans les épreuves de langage réceptif étaient détectables dès 15 mois, tandis que les disparités dans les épreuves évaluant le langage expressif étaient détectables dès 21 mois). Fernald et collaborateurs (2011) ont recruté un large échantillon d'enfants âgés de 3 à 6 ans vivant à Madagascar ($N = 1332$) et ont explicitement cherché à répliquer les études précédentes de Noble et Farah (2006; 2007). Via l'évaluation de sept tâches cognitives (traitement visuo-spatial, mémoire de travail, raisonnement fluide, attention soutenue, mémoire de phrases, contrôle inhibiteur et langage réceptif), l'existence d'un gradient socio-économique a été répliquée pour les domaines langagiers et exécutifs, chez des enfants vivant au sein d'une population bien plus défavorisée que celles évaluées lors des études précédentes (Fernald et al., 2011). Cette étude a également souligné que ces inégalités allaient croissant entre les enfants de 3 et 6 ans (notamment pour les épreuves de langage réceptif et d'attention soutenue ; Fernald et al., 2011). En utilisant une batterie neuropsychologique standardisée (tirée de Lezak, Howieson, Loring, & Fischer, 2004), permettant l'évaluation de sept domaines cognitifs différents, une autre étude réalisée sur près de 300 enfants équatoriens (répartis en trois groupes de 7, 9 et 11 ans) a également permis de répliquer l'identification de profils cognitifs différents selon les caractéristiques socio-économiques familiales (pour le langage et les fonctions exécutives, mais aussi la mémoire ; Burneo-Garcés et al., 2019). Les résultats de cette étude ont également montré une tendance à l'accentuation avec le temps des disparités socio-économiques des scores cognitifs (c.-à-d. que la part de variance expliquée était encore plus importante à l'âge de 11 ans qu'à l'âge de 7 ans ; Burneo-Garcés et al., 2019). De façon générale, les résultats des différentes études ayant pour objectif une évaluation « extensive » des domaines cognitifs susceptibles de varier selon les caractéristiques socio-économiques familiales ont permis d'illustrer un certain « déséquilibre ». Les domaines cognitifs ayant été majoritairement identifiés comme les plus affectés étaient ceux du langage, des fonctions exécutives, et dans une moindre mesure de la mémoire. Malgré cette visée « extensive » de l'évaluation, relevons toutefois que ces études n'incluaient pas de mesures de la cognition numérique.

Pour conclure cette section, il est néanmoins intéressant de faire référence à des données atypiques dans le cadre de l'étude du lien entre SES et domaines cognitifs. Celles-ci sont tirées des données de standardisation d'une batterie neurocognitive visant l'évaluation d'une pluralité de domaines (la batterie du Woodcock Johnson, WJ ; Woodcock, Mather, McGrew, & Wendling, 2001) et n'ont donc pas été collectées dans le but premier d'analyser les disparités socio-économiques. Néanmoins, ces données ont permis à Tucker-Drob de tester, pour chacune des épreuves et sur un très grand nombre de sujets, les liens entre compétences des enfants et SES familial (4810 sujets américains âgés de 4 à 21 ans ; Tucker-Drob, 2013). À cet égard, ces données ont permis une évaluation plus complète que les travaux précédents et ont notamment inclus le domaine de la cognition mathématique. Dans tous les domaines testés (à l'exception de la vitesse de traitement ; voir **Figure 17**, tirée de Tucker-Drob, 2013), il est apparu des

disparités socio-économiques qui s'accroissent avec l'âge des enfants. Les données présentées par Tucker-Drob (2013) avaient l'avantage d'intégrer le domaine de la cognition numérique, mais ne permettaient pas une décomposition des compétences mathématiques affectées par les variations de SES (score « mathématique » composite regroupant trois épreuves de calcul de formats différents).

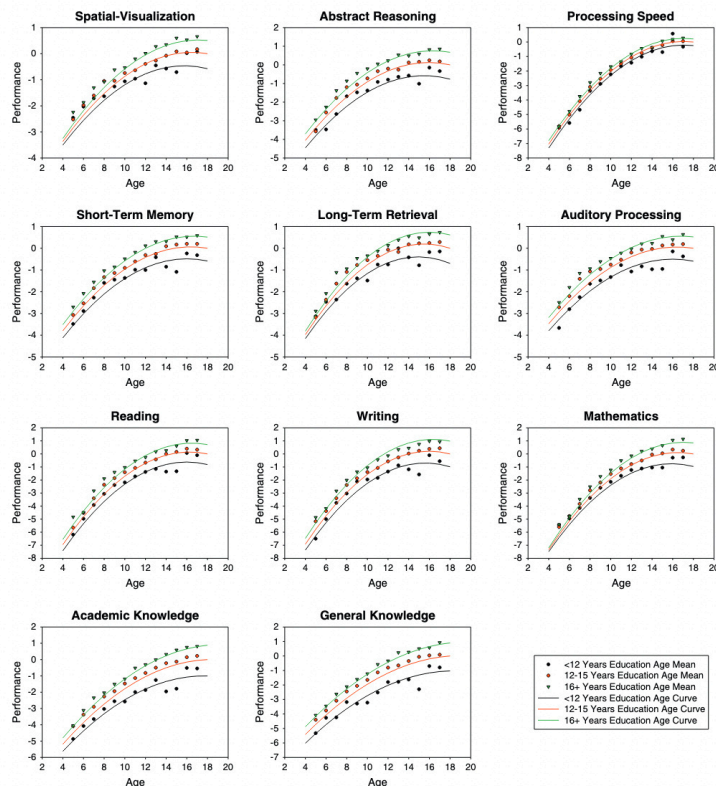


Figure 17 : Figures tirées de Tucker-Drob (2013) illustrant les trajectoires de développement pour chacun des 11 domaines évalués selon l'âge des enfants et le niveau du SES familial (niveau de diplôme en 3 points : faible, moyen, ou élevé). Pour chacun des domaines (à l'exception de la vitesse de traitement), le niveau SES était associé à des différences plus marquées avec l'âge. Pour faciliter l'interprétation, l'axe vertical a été converti en score z. Les points représentent les moyennes des données brutes. $N= 4810$

1.2. Relation entre SES et structures cérébrales susceptibles d'être impliquées dans la lecture et les fonctions exécutives

1.2.1. Identification des relations entre mesures cérébrales structurelles globales et SES

Dans cette nouvelle section sont présentés des travaux ayant permis l'identification de corrélats cérébraux du SES avec peu de postulat préalable précis. Autrement dit, nous construisons cette section comme relevant d'une démarche parallèle à la précédente (l'usage de larges batteries de tests plutôt que de tests spécifiques à un domaine cognitif) et présenterons donc des études ayant montré des disparités socio-économiques à partir de mesures cérébrales structurales. En effet, à l'inverse des mesures cérébrales de l'activité fonctionnelle, les mesures

structurales obtenues ne dépendraient pas de la réalisation d'une tâche spécifique par le sujet pendant l'acquisition des données de neuro-imagerie. Les résultats identifiés pourront néanmoins dépendre de l'échelle d'analyse employée (des analyses réalisées au niveau du « cerveau entier » ou, au contraire, des analyses réalisées par « région d'intérêt »).

Plusieurs articles de revues (Brito & Noble, 2014; Farah, 2017; Johnson, Riis, & Noble, 2016; Lawson et al., 2014; Noble & Giebler, 2020; Romeo, 2019; Yaple & Yu, 2019) démontrent que la question de l'identification des corrélats structurels du SES a été abordée par de nombreuses études ces dix dernières années. De façon générale, différentes mesures sont possibles lorsqu'il s'agit d'étudier la « structure » cérébrale (notamment en ce qui concerne la matière grise (c.-à-d. le cortex cérébral, qui permet le traitement des informations) : l'épaisseur corticale, la surface cérébrale ou encore le volume (le produit de l'épaisseur *et* de la surface).

De façon globale, pour chacune de ces caractéristiques structurelles, il a été identifié des modèles développementaux distincts. L'épaisseur corticale diminuerait au cours de l'enfance et de l'adolescence pour finalement atteindre un plateau au début de l'âge adulte (Raznahan et al., 2011; Sowell et al., 2003). À l'inverse, la surface corticale augmenterait pendant l'enfance et au début de l'adolescence, les augmentations les plus importantes se produisant d'abord dans les zones sensorielles (Brown & Jernigan, 2012; Schnack et al., 2015). Une majorité d'études a montré l'existence de disparités socio-économiques au sein des caractéristiques de volume cérébral (voir **Figure 18** ; Betancourt et al., 2016; Hair, Hanson, Wolfe, & Pollak, 2015; Hanson et al., 2013; McDermott et al., 2019; Noble, Houston, Kan, & Sowell, 2012). Mais des disparités socio-économiques ont aussi pu être mises en évidence à partir des autres caractéristiques structurales du cerveau : la surface corticale (Judd et al., 2020; McDermott et al., 2019; Noble, Houston, et al., 2015) et l'épaisseur corticale (Alnæs, Kaufmann, Marquand, Smith, & Westlye, 2020; Lawson, Duda, Avants, Wu, & Farah, 2013; Leonard et al., 2019; Mackey et al., 2015).

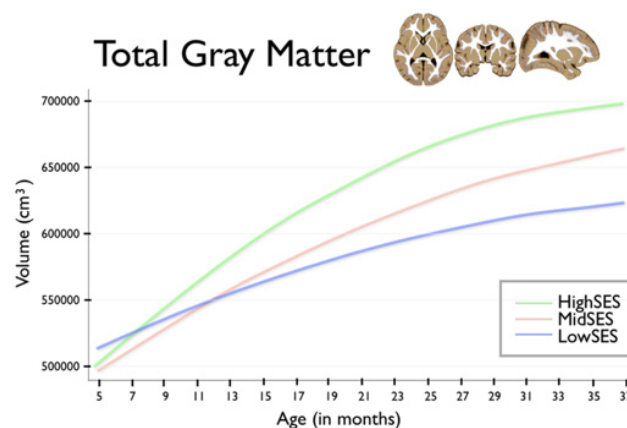


Figure 18 : Figure tirée de Hanson et al. (2013) illustrant le volume total de matière grise en fonction du SES et de l'âge à partir de données tirées de la cohorte National Institute of Health MRI Study of Normal Brain Development. L'âge en mois est indiqué sur l'axe horizontal, allant de 5 à 37 mois. Le volume total de matière grise est indiqué sur l'axe vertical. La ligne bleue représente les enfants issus de ménages de statut socio-économique faible ; les enfants issus de ménages de statut socio-économique moyen sont représentés en rouge. La ligne verte indique les enfants issus de ménages de statut socio-économique élevé. $N=77$

Il a été proposé que l'épaisseur réduite du cortex cérébral chez les enfants issus de milieux socio-économiques défavorisés puisse refléter soit un phénomène précoce conduisant à la formation de moins de matière grise (Hanson et al., 2013) soit un phénomène d'accélération du processus d'amincissement (Callaghan & Tottenham, 2016; pour revue, voir Tooley, Bassett, & Mackey, 2021). L'augmentation de la surface cérébrale pendant l'enfance pourrait quant à elle dépendre notamment des expériences de l'enfant (Schnack et al., 2015).

L'utilité de dissocier les indices utilisés pour les mesures socio-économiques a été soulignée (niveau de revenu versus niveau de diplôme). Il a ainsi été montré que les effets du revenu familial sur les caractéristiques structurales du cerveau étaient généralement plus importants chez les enfants issus des groupes socio-économiques les plus défavorisés. De petites différences de revenus pourraient être associées à des différences structurelles cérébrales relativement importantes au sein des milieux socio-économiques les plus défavorisés. Au contraire, des différences de revenu similaires au sein des familles les plus aisées auraient un impact réduit sur les mesures structurelles (une telle relation serait dite « logarithmique » ; Decker, Duncan, Finn, & Mabbott, 2020; Hair et al., 2015; Moriguchi & Shinohara, 2019; Noble, Houston, et al., 2015).

À l'inverse, la relation entre mesures cérébrales et différences de niveau d'étude pourrait être moins « disproportionnée » selon le groupe socio-économique considéré (cette relation serait davantage « linéaire » ; Noble, Houston, et al., 2015). De façon globale cependant, une revue de la littérature récente a montré une certaine similitude entre les zones cérébrales susceptibles de voir leurs caractéristiques structurales (d'épaisseur ou de surface) liées soit au niveau de revenu soit au niveau d'étude (voir **Figure 19** , tirée de Farah, 2017).

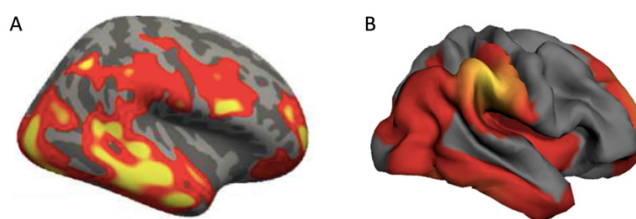


Figure 19 : Figures tirées de Farah (2017 et adaptées de Noble et al. 2015) permettant la visualisation des résultats reliant deux aspects du statut socio-économique (revenu et étude) à deux aspects de la structure cérébrale (épaisseur et surface). **A.** Représentation des zones cérébrales où l'épaisseur corticale chez l'enfant varie avec le revenu des parents. **B.** Représentation des zones cérébrales où la surface corticale chez l'enfant varie avec le niveau d'étude des parents.

Malgré cela, la revue de Farah (2017) a aussi souligné la complexité inhérente à l'usage de différentes mesures structurales pour permettre l'identification des potentiels corrélats cérébraux des disparités socio-économiques. Des disparités socio-économiques pourraient ainsi être liées aux mesures d'épaisseur corticale au sein d'une zone cérébrale donnée, sans pour autant qu'une telle relation soit retrouvée avec des mesures de surface corticale (p. ex. Mackey et al., 2015). Par conséquent, l'hétérogénéité des résultats obtenus pourrait être encore plus importante en ce qui concerne les disparités socio-économiques des mesures du volume

cortical¹. Pourtant, cette mesure est couramment utilisée dans la littérature neuroscientifique portant sur les inégalités socio-économiques (pour discussion ; voir Brito & Noble, 2014; Farah, 2017).

1.2.2. Relation entre caractéristiques cérébrales structurelles et SES : identification des corrélats cognitifs

Une méta-analyse de 19 études publiées ces 20 dernières années a proposé une synthèse des relations entre SES et développement cérébral pendant la petite enfance (Olson, Chen, & Fishman, 2021). Les analyses réalisées ont montré que les associations entre les mesures socio-économiques et neuronales seraient plus susceptibles de concerner certaines structures cérébrales spécifiques, notamment celles recrutées dans les processus langagiers (comme le gyrus frontal inférieur ou le gyrus temporal supérieur ; Binder & Desai, 2011; J. S. H. Taylor, Rastle, & Davis, 2013; et les fonctions exécutives, comme le cortex préfrontal). Nous détaillons ces régions ci-dessous.

En ce qui concerne les régions impliquées dans le langage, Raizada et collaborateurs (2008) ont montré, au sein d'un groupe de 14 enfants âgés de 5,3 ans en moyenne, une augmentation marginalement significative du volume du gyrus frontal inférieur (*inferior frontal gyrus*, IFG) gauche chez les enfants avec un SES élevé, comparativement à leurs pairs avec un SES faible. Noble et collaborateurs (2012) ont également montré chez 60 enfants américains âgés de 5 à 17 ans (âge moyen 11,4 ans) une différence marginale du volume du gyrus temporal inférieur gauche. Par ailleurs, une interaction entre facteurs socio-économiques et âge des enfants était observée dans le gyrus temporal supérieur gauche et l'IFG gauche. Autrement dit, plus les enfants étaient âgés, plus étaient accentuées les disparités socio-économiques dans le volume de ces régions cérébrales. Au sein d'un groupe d'enfants américains d'âges plus homogènes (6 à 9 ans), Romeo et collaborateurs (2018) ont également mis en relation le volume de l'IFG gauche et les disparités socio-économiques de performances en langage : le volume de cette région cérébrale permettait d'expliquer 37% de la relation entre SES et scores de vocabulaire chez ces enfants (Romeo, Christodoulou, et al., 2018). Au sein d'un groupe de 23 enfants français âgés de 9,7 ans, Jednoróg et collaborateurs (2012) ont montré que les enfants issus des milieux socio-économiques défavorisés présentaient un processus ralenti de gyrification des régions frontales antérieures gauches par rapport à leurs pairs favorisés, processus par ailleurs établi dans le processus de développement « normal » du langage. Jednoróg et collaborateurs (2012) ont également montré l'existence d'une relation entre SES et volume de matière grise chez les enfants au sein de la région occipito-temporale gauche. Il est intéressant de noter que ces résultats sont cohérents avec ceux d'une étude réalisée sur un groupe de 58 enfants américains plus âgés (13 à 15 ans ; Mackey et al., 2015). Il avait été montré que l'épaisseur corticale au sein de la région temporelle variait également selon le SES familial

¹ Pour rappel, la mesure du *volume* cortical est une mesure composite de l'épaisseur *et* de la surface corticale.

et pouvait même expliquer une partie des disparités socio-économiques de performances scolaires (Mackey et al., 2015). Concernant le volume du gyrus temporal gauche chez 60 enfants américains âgés de 11 ans, une étude réalisée par Noble et collaborateurs (2012) avait également permis de montrer une interaction entre âge et SES. Enfin, une analyse de Noble et collaborateurs (2015) portant sur un très grand nombre de données tirées de la cohorte Pediatric Imaging, Neurocognition and Genetics (PING ; 1000 enfants et jeunes adultes âgés de 3 à 20 ans) a permis de conforter l'existence d'une relation entre SES et surface corticale au sein de régions susceptibles de supporter la lecture ou le langage (Noble, Engelhardt, et al., 2015).

En ce qui concerne les régions impliquées dans les fonctions exécutives (Stuss, 2011), Noble et collaborateurs (2015) ont montré l'existence d'un lien entre disparités socio-économiques et différences de surface corticale au sein des régions préfrontales. Leurs analyses de médiation ont suggéré que les différences de surface corticale (mais pas celles concernant l'épaisseur du cortex) pouvaient expliquer, au moins en partie, les disparités socio-économiques des enfants dans le domaine des fonctions exécutives (évaluées via des tâches de mémoire de travail et de contrôle inhibiteur). Hanson et collaborateurs (2013) ont analysé les données de 77 enfants américains suivis depuis leurs 5 mois à leurs 4 ans. Ils ont montré que, comparativement à leurs pairs les plus favorisés, les enfants issus des milieux socio-économiques les plus défavorisés présentaient significativement moins de matière grise au sein du lobe frontal. Enfin, une analyse des données de 300 enfants américains âgés de 4 à 18 ans (âge moyen de 11,5 ans ; données tirées de la cohorte NIH MRI) a conduit à mettre en évidence une relation entre SES et épaisseur corticale dans des régions préfrontales spécifiques (gyrus frontal supérieur gauche et gyrus cingulaire antérieur droit ; Lawson et al., 2013).

Enfin, plusieurs études ont souligné des différences structurelles au niveau de l'hippocampe selon le SES familial (mais voir Farah, 2017). Cette région serait susceptible de jouer un rôle, entre autres, dans le domaine cognitif mnésique (Hanson, Chandra, Wolfe, & Pollak, 2011; Noble, Houston, et al., 2015; Noble et al., 2012). Dans l'étude précédemment citée de Jednoróg et collaborateurs (2012) avait aussi été montrée l'existence d'une relation entre SES et volume de matière grise au sein des structures hippocampiques. Decker et collaborateurs (2020), via l'analyse des données d'un large échantillon de 703 enfants et jeunes adultes américains âgés de 3 à 21 ans (âge moyen 12,3 ans ; données tirées de la cohorte PING), ont rendu compte d'une relation entre SES et volume hippocampique (mais seulement dans sa région antérieure ; Decker et al., 2020). Ils ont également montré que le volume de cette région hippocampique pouvait expliquer, en partie, la relation entre SES et compétences mnésiques (mesure de mémoire épisodique, Picture Sequence Memory Test ; Bauer et al., 2013) ou entre SES et compétences de vocabulaire (mesure de vocabulaire réceptif, Picture Vocabulary Task ; Gershon et al., 2014).

En identifiant des phénomènes de covariation des caractéristiques structurelles du cortex cérébral selon les caractéristiques SES familiales, les travaux présentés dans cette section ont conduit à l'identification de certaines régions cérébrales spécifiques. Ces régions cérébrales seraient susceptibles d'être davantage recrutées pour le traitement de certains processus

cognitifs : le langage, les fonctions exécutives et la mémoire. De façon générale, nous proposons donc de faire le lien entre les résultats des études qui viennent d'être présentées et ceux obtenus à partir des larges batteries d'évaluation cognitive (présentés dans la section précédente, voir notamment la **Figure 16** tirée de Farah et al., 2006).

2. Utilisation des indices cognitifs langagiers et/ou exécutifs pour éclairer la relation entre SES et réussite scolaire mathématique

Pris ensemble, les deux domaines cognitifs identifiés pour leurs liens avec les caractéristiques socio-économiques du foyer (langage et fonction exécutive) pourraient être considérés comme préalables à tout apprentissage scolaire¹. Pour que l'identification de ces composantes cognitives puisse participer à la compréhension des disparités socio-économiques en mathématiques, il semble pertinent d'en proposer l'analyse conjointe.

L'objectif de cette nouvelle section est donc de présenter différents travaux qui ont visé à mettre en lien caractéristiques socio-économiques familiales, compétences langagières et/ou exécutives spécifiques² et réussite scolaire mathématique. Dans un premier temps, nous présenterons les données qui ont proposé d'intégrer des mesures cognitives précoces pour expliquer la relation entre SES et compétences mathématiques, puis nous exposerons les travaux ayant souligné les limites de ces mesures précoces et l'intérêt des compétences cognitives ultérieures. Enfin, nous suggérerons via deux études la pertinence de la prise en compte d'autres médiateurs potentiels, notamment spécifiques aux mathématiques.

2.1. Rôle des mesures cognitives langagières et/ou exécutives précoces

Certaines cohortes (pour la plupart déjà évoquées dans la section 2 du chapitre 1) ont veillé à incorporer dans leur protocole expérimental des mesures spécifiques des fonctions exécutives et/ou des compétences langagières. Cet ajout de ces mesures cognitives spécifiques au sein de ces protocoles longitudinaux signe l'importance théorique donnée à ces domaines cognitifs comme susceptibles d'expliquer les disparités socio-économiques de réussite scolaire.

Une première cohorte particulièrement intéressante à ce titre est la cohorte américaine NICHD qui a donné lieu à plusieurs analyses proposant d'expliquer le lien entre caractéristiques socio-économiques familiales et réussite scolaire des enfants (Blums et al., 2017; Crook & Evans, 2014; Hackman, Gallop, Evans, & Farah, 2015; Sektnan, McClelland, Acock, & Morrison, 2010; Waters et al., 2021). Nous décrivons brièvement ici trois d'entre elles qui ont

¹ En **annexe 2** est proposée une présentation succincte des travaux ayant visé à explorer ces domaines cognitifs, avec des tâches ciblées au niveau comportemental ou en imagerie fonctionnelle.

² On note ici que, selon les études, les mesures de fluences verbales (sémantique ou phonémique) sont utilisées comme des indices des domaines langagiers ou exécutifs (p. ex. Albert et al., 2020; Ardila, Rosselli, Matute, & Guajardo, 2005; Stumm, Rimfeld, Dale, & Plomin, 2020).

surtout proposé d'utiliser certaines compétences exécutives comme potentiel.s médiateur.s des disparités socio-économiques dans la réussite en mathématiques des enfants à des âges variés.

Tout d'abord, Waters et collaborateurs (2021) ont proposé d'utiliser, chez l'enfant de 4,5 ans, différents indices des fonctions exécutives (inhibition, contrôle attentionnel et mémoire de travail) ainsi qu'un score général de réussite en mathématiques (Problèmes appliqués du WJ ; Woodcock et al., 2001). Ils ont également utilisé une mesure plus précoce du langage chez ces enfants (mesure de langage expressif à 3 ans). En montrant que le SES était corrélé avec l'ensemble de ces scores, ils ont tout d'abord confirmé les résultats précédemment exposés, mais ils ont surtout montré que la composante de mémoire de travail pourrait expliquer en partie la relation entre SES et scores mathématiques (et cela indépendamment du score de langage). Les autres scores des fonctions exécutives ne permettaient pas d'expliquer le lien entre SES et réussite mathématique. L'analyse de données issues d'une autre cohorte (Boston University Twin Project) avait également permis l'identification d'une composante exécutive comme permettant d'expliquer en partie les disparités socio-économiques en mathématiques à un âge similaire (Micalizzi et al., 2019). Néanmoins, cette fois, c'était la composante de flexibilité mentale qui était identifiée comme potentiel médiateur.

De façon générale, plusieurs études réalisées sur d'autres cohortes ou des groupes d'enfants ont répliqué ou étendu ces résultats en identifiant les scores précoces de certaines composantes exécutives (Albert et al., 2020; Dilworth-Bart, 2012; Fitzpatrick, McKinnon, Blair, & Willoughby, 2014; Nesbitt, Baker-Ward, & Willoughby, 2013), mais aussi de certaines composantes langagières (Durham, Farkas, Hammer, Bruce Tomblin, & Catts, 2007; Fitzpatrick et al., 2014; Stumm et al., 2020) comme autant de médiateurs potentiels des disparités socio-économiques de réussite en mathématiques lors de la scolarité au primaire.

2.2. Intérêt des mesures cognitives langagières et/ou exécutives plus tardives

En utilisant d'autres données issues de la cohorte NICHD, Crook et Evans (2014) ont quant à eux mis en évidence que le lien entre SES parental et réussite en mathématiques des enfants de CM2 pouvait s'expliquer par les compétences exécutives de plus haut niveau (mesurées de façon moins précoce, scores de planification en CE2). Enfin, l'utilisation de données plus tardives de cette cohorte NICHD a permis à Blums et collaborateurs (2017) d'identifier plusieurs facteurs successifs susceptibles d'expliquer la relation entre SES et compétences tardives en mathématiques (le niveau de « science, technologie, ingénierie et mathématiques » à la fin du collège). Pour cela, les auteurs ont à nouveau utilisé des mesures précoces de langage (identification des lettres et des mots et vocabulaire réceptif à 4,5 ans ; WJ, Woodcock et al., 2001) et de fonctions exécutives (composantes d'inhibition, tâches de Stroop et de délai de gratification ; de contrôle cognitif et d'attention, Continuous-Performance Task ; à 4,5 ans). Ils ont également utilisé les performances aux tâches de raisonnement, de cubes et matrices en CM1¹. L'analyse globale de ces différents scores a permis l'identification d'un

¹ Scores qu'il serait possible de qualifier de scores exécutifs « de plus haut niveau » selon la catégorisation suggérée par Diamond (2013).

modèle de médiateurs successifs des disparités socio-économiques de la réussite en mathématiques à la fin du collège. À 4,5 ans, les différences de SES seraient liées aux compétences exécutives (comme dans l'analyse de Crook & Evans, 2014, à partir des mêmes données), mais aussi aux compétences langagières. Ces compétences précoces seraient ensuite significativement liées aux compétences exécutives de « haut niveau » (en CM1), et ces dernières pourraient expliquer la réussite en mathématiques (en fin de collège). Cette étude a donc suggéré l'existence de plusieurs médiateurs successifs de la relation entre SES et compétences avancées en mathématiques, tout en donnant à voir le caractère incrémental des capacités cognitives mesurées aux différents stades développementaux chez l'enfant.

Il peut être intéressant de mettre ces résultats en regard avec les analyses réalisées récemment par Stumm et collaborateurs (2020) sur un ensemble de données tirées d'une cohorte anglaise et galloise (la Twins Early Development Study, Haworth, Davis, & Plomin, 2013). Ces données incluaient pour chaque enfant le score SES familial, un score annuel de réussite en mathématiques de 7 à 16 ans (évaluation réalisée par leurs enseignants) et un score verbal composite mesuré à l'âge de 4,5 ans (combinant des tâches de compréhension verbale ; de syntaxe ; de vocabulaire, British Ability Scale, Elliott et al., 1996 ; de connaissance de mots, McCarthy, 1972 ; de fluence verbale, McCarthy, 1972 ; de complétion de phrases, McCarthy, 1972 ; de conscience phonologique, Bird et al., 1995 ; et d'articulation ; Gathercole et al., 1994 ; Goldman & Fristoe, 1986). De façon concordante avec la littérature existante, l'ensemble des scores des enfants (les scores verbaux à l'entrée à l'école et les scores en mathématiques de 7 à 16 ans) étaient liés aux disparités de niveaux socio-économiques familiaux (Stumm et al., 2020). Les mesures verbales précoces permettaient d'expliquer partiellement la relation entre SES et réussite en mathématiques, mais cela uniquement à l'âge de 7 ans. Au-delà de 7 ans, les mesures verbales n'avaient plus de rôle médiateur (Stumm et al., 2020). Autrement dit, de façon cohérente avec l'étude de Crooks and Evans (2014), cela indique que certains scores cognitifs précoces pourraient participer à la compréhension des disparités socio-économiques, mais uniquement jusqu'à un certain niveau scolaire. Lors de la scolarisation au secondaire notamment, ces scores cognitifs précoces pourraient ne plus être suffisamment pertinents pour éclairer les mécanismes des disparités socio-économiques en mathématiques. Le caractère incrémental des médiateurs cognitifs paraît donc une hypothèse pertinente, leur identification pouvant mener à une meilleure compréhension des disparités cognitives sous-jacentes aux difficultés de réussite scolaire. Par exemple, pour Crook & Evans, l'identification plus tardive des scores aux fonctions exécutives (en CM1) permettait d'expliquer en partie les difficultés en mathématiques au secondaire (Crook & Evans, 2014).

2.3. Identification de médiateurs cognitifs de domaines cognitifs différents

Les données utilisées dans l'étude de Stumm et collaborateurs (2020) se démarquaient cependant des cohortes précédemment évoquées. En effet, comme médiateur potentiel supplémentaire, a également été mesuré un score cognitif composite dit « non verbal » (calculé

à l'aide de différentes tâches : construction de blocs, résolution d'énigmes, questions sur les nombres, tapping, dessin abstrait, dessin de personnage, mémoire numérique, comptage et tri et regroupement conceptuel ; McCarthy Scales of Children's Abilities, McCarthy, 1972). Ce score composite non verbal pourrait comporter une composante exécutive (les épreuves de constructions de blocs ou de regroupement), mais aussi une composante mathématique (les épreuves de « comptage » ou de « questions sur les nombres »). Ce score composite permettait d'expliquer la relation entre SES et réussite en mathématiques à 7 ans. Du fait de la significativité de cet indice non verbal dans l'explication des disparités socio-économiques académiques, les auteurs encourageaient de veiller, à l'avenir, à une meilleure prise en compte du rôle médiateur des domaines cognitifs autres que ceux du langage et des fonctions exécutives (et, notamment, celui de la cognition numérique ; Stumm et al., 2020).

Un parallèle pourrait être établi entre cette recommandation et l'analyse réalisée par Tucker-Drob (2013) des disparités socio-économiques aux scores de normalisation des épreuves du WJ (présentées dans la section 1.1 de ce chapitre). À l'aide d'analyses d'estimation du maximum de vraisemblance, Tucker-Drob a estimé qu'il était peu probable que les phénomènes de disparités socio-économiques observés dans la réussite aux différentes épreuves puissent être attribués à des différences dans un seul processus de développement (« *domain-general pathway* », **Figure 20** ; tirée de Tucker-Drob, 2013). En d'autres termes, l'auteur a suggéré une influence du statut socio-économique (et de l'âge) sur des aspects davantage spécifiques aux différents domaines évalués (« *domain-specific pathways* », **Figure 20** ; tirée de Tucker-Drob, 2013)¹. Les disparités socio-économiques aux scores mathématiques étaient plus importantes que ce qu'aurait pu prédire un modèle supposant un processus de développement issu d'un domaine unique (« *domain-general pathway* »). L'épreuve de connaissances académiques générales montrait un résultat similaire. Autrement dit, les disparités dans le domaine des mathématiques (ainsi que dans celui des connaissances scolaires) pourraient gagner à être expliquées via l'identification de mécanismes supplémentaires, inhérents à ces résultats.

¹ Notons cependant que l'auteur souligne que ce résultat semble être capturé par la variance aux scores d'épreuves mathématiques et de connaissances académiques générales. En excluant ces scores des analyses, il apparaît au contraire que la réussite aux épreuves du WJ pourrait être davantage médiée par une dimension très générale du fonctionnement cognitif commune à l'ensemble des épreuves.

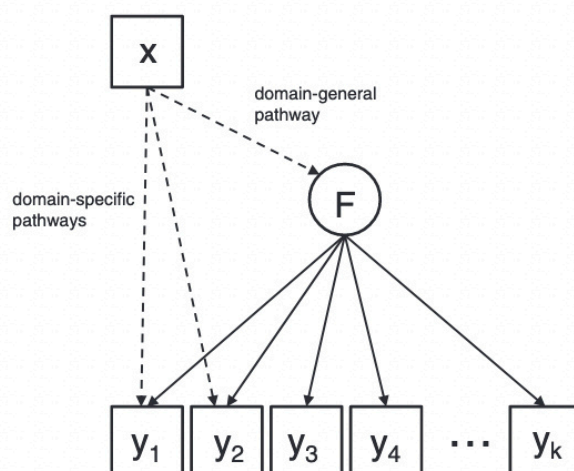


Figure 20 : Figure tirée de Tucker-Drob (2013) représentant l'approche de modélisation employée. Les voies générales et spécifiques au domaine sont représentées par des lignes pointillées (et les charges factorielles par des lignes pleines). Pour faciliter la présentation, seulement un domaine spécifique est représenté (x). Lorsque la voie générale aux domaines (« domain-general pathway ») est supprimée et que toutes les voies spécifiques au domaine (« domain-specific pathways ») sont estimées, alors ce modèle représente le modèle des voies indépendantes. Lorsque les voies spécifiques au domaine (« domain-specific pathways ») sont supprimées, ce modèle représente alors le modèle d'une voie générale (« domain-general pathway »).

Les différents travaux exposés à travers cette section sont cohérents avec certaines caractéristiques du développement neurocognitif des mathématiques chez l'enfant (voir chapitre 2). En effet, il est évident que les compétences langagières et exécutives ont un rôle important dans les compétences mathématiques (Cortés Pascual, Moyano Muñoz, & Quílez Robres, 2019; LeFevre, Fast, et al., 2010; Purpura & Reid, 2016) et cela dès l'acquisition des codes symboliques par l'enfant ou lors d'activités mathématiques peu complexes telles que le dénombrement, mais aussi pour des compétences arithmétiques plus élaborées (p. ex. lors de la manipulation mentale des opérandes ou de la récupération des faits arithmétiques stockés sous format verbal). Néanmoins, ces seuls domaines cognitifs du langage et des fonctions exécutives pourraient ne pas suffire à expliquer le phénomène de disparités socio-économiques de réussite en mathématiques. En conséquence, sans négliger le rôle important des domaines langagiers et exécutifs dans le développement des habiletés numériques, il est important de chercher également à identifier les composantes cognitives spécifiques au domaine des mathématiques et leur.s lien.s potentiel.s avec les disparités socio-économiques.

3. SES et mesures des différentes compétences numériques

Comparativement à la littérature conséquente détaillant les relations entre caractéristiques SES et scores cognitifs dans les domaines langagier et exécutif, il existe finalement peu d'études qui ont cherché à évaluer les sous-composantes numériques

susceptibles de varier selon les différences socio-économiques familiales¹. Les études, présentées en section 1.1 de ce chapitre, qui visaient explicitement à établir le profil des systèmes neurocognitifs susceptibles d'être affectés par le SES familial n'ont tout simplement pas intégré de tâche numérique (Noble, Engelhardt, et al., 2015; Noble et al., 2007, 2005). Cependant, cette tendance à l'« oubli » de la cognition mathématique ne s'est pas limitée pas à ces études pionnières. À titre d'illustration, un article de revue récent portant sur 14 méta-analyses publiées jusqu'en 2019 (traitant spécifiquement de ces liens entre SES et mesures de différents domaines cognitifs) n'évoque jamais le domaine de la cognition numérique (Korous et al., 2020). L'asymétrie concernant la quantité de travaux réalisés est d'autant plus saisissante lorsqu'on connaît les résultats des cohortes qui mettent pourtant en évidence l'existence d'un phénomène important de disparités socio-économiques dans la réussite en mathématiques. Comme le soulignent les dernières études présentées, le langage et les fonctions exécutives peuvent agir comme médiateurs de la relation entre SES et compétences mathématiques. Mais il est possible que ces facteurs soient insuffisants pour expliquer cette relation et qu'une relation plus directe existe.

Dans cette section, nous dressons un tableau exhaustif des travaux comportementaux qui ont évalué directement les différentes composantes de la cognition numérique chez l'enfant et leurs éventuelles disparités socio-économiques. À notre connaissance, un seul article de revue, publié en 2009 par Jordan et Levine, a proposé une synthèse dédiée à cette question. Pour comprendre les disparités mises en évidence dans ces travaux, les auteurs avaient proposé une distinction des difficultés en mathématiques selon leurs aspects « verbaux » par rapport à leurs aspects « non verbaux » (N. C. Jordan & Levine, 2009). Cette distinction est cohérente avec la littérature exposée dans la section précédente² puisque le postulat théorique défendu par Jordan et Levine (2009) était que seuls les aspects « verbaux » des mathématiques étaient impactés par les différences socio-économiques, tandis que leurs aspects « non verbaux » seraient davantage épargnés (sous-entendu, maîtrisés par les enfants indépendamment de leurs caractéristiques socio-économiques familiales)³.

Dans un premier temps, nous présenterons une revue des travaux cohérents avec cette distinction, notamment via la mise en évidence de liens entre disparités des compétences symboliques ou arithmétiques des enfants avec leurs milieux socio-économiques. Nous indiquerons également les résultats du seul protocole de neuro-imagerie fonctionnelle ayant analysé, à notre connaissance, les différences d'activités cérébrales pendant une tâche d'arithmétique selon le SES (Demir et al., 2015; Demir-Lira et al., 2016).

¹ Voir **annexe 2** pour un aperçu de ces travaux.

² Ainsi que celle présentée dans l'**annexe 2**.

³ La terminologie employée par Jordan et Levine (2009) « non verbal » versus « verbal » va être considérée comme correspondant à la distinction « non symbolique » versus « symbolique » détaillée dans le chapitre 2. Cependant nous soulignons que ces dernières dénominations ne sont pas utilisées à proprement parler dans les travaux de Jordan et Levine. Dans le cas de l'arithmétique, la distinction « verbal » versus « non verbal », telle que proposée par Jordan et Levine, correspond parfois à des caractéristiques différentes que nous détaillerons dans les parties concernées.

Dans un second temps, nous suggérerons des travaux susceptibles de remettre en question la distinction proposée par Jordan et Levine (2009). Nous exposerons d'abord les études qui ont permis d'évaluer les compétences non symboliques des enfants selon leurs caractéristiques socio-économiques. Nous soulignerons également l'hétérogénéité de certains résultats par rapport à la distinction des compétences « verbales » versus « non verbales ».

De façon plus générale, pour conclure, nous proposerons de dépasser cette dissociation des habiletés numériques pour considérer l'hypothèse d'une relation entre les caractéristiques socio-économiques des enfants et l'ensemble de leurs habiletés numériques. Les différentes études mobilisées tout au long de cette section font par ailleurs l'objet d'un inventaire dressé dans le **Tableau 2**. Ce tableau, organisé par ordre alphabétique des noms d'auteurs, permet une lecture détaillée de ces études en précisant, pour chacune d'entre elles, les caractéristiques des populations étudiées ainsi que les résultats obtenus, mais aussi les indices spécifiques utilisés pour les mesures de statut socio-économique familial et celles de cognition numérique chez l'enfant.

Tableau 2. Liste exhaustive des études permettant de rendre compte de diverses évaluations en cognition numérique selon les mesures SES familiales chez l'enfant

Références	Échantillons	Mesures SES	Mesures mathématiques	Résultats
Abedi & Lord, 2001	1174 enfants de 4 ^e (Los Angeles, USA)	SES « haut » ou « bas » Indicateurs : bénéficiaires du programme de repas gratuits ou bénéficiaires d'autres programmes d'aides aux familles ou non bénéficiaires	Problèmes arithmétiques verbaux : 20 problèmes classiques, 5 problèmes avec un risque minimal de défaut d'interprétation de l'énoncé	Effet du SES sur les compétences totales aux problèmes Effet réduit sur les items présentés avec un énoncé verbal simplifié
Bernabini et al., 2021	83 enfants de 9.7 ans (CM1 et CM2, Italie)	Gradient SES : index Hollingshead (2011, niveau d'étude et statut occupationnel)	<ul style="list-style-type: none"> Calculs écrits (BDE-2, Biancardi et al., 2016) Comparaison de grandeurs symboliques et non symboliques 	Effet uniquement sur la précision de la comparaison non symbolique (mais pas symbolique)
Cheung et al., 2018 Et Cheung et al., 2020	673 enfants de 51 mois (Cebu, Philippines)	Gradient SES : niveau d'étude et salaire familial	Identification de nombres symboliques, comptage d'objets, chaîne numérique verbale, nombre manquant, comparaison de quantités symbolique, addition	Effet du niveau d'étude du parent sur chaque épreuve.
De Keyser et al., 2020	353 enfants de 6 ans (Belgique)	Gradient SES : niveau d'étude	Score composite : Chaîne numérique verbale et ordinalité, calcul mental, cardinalité et dénombrement, lecture de nombre, calcul symbolique, comparaison symbolique, comparaison non symbolique	Effet du SES sur le score composite
Del Rio et al., 2017	180 enfants de 5.6 ans (Santiago, Chili)	Gradient SES : Indicateurs Montant des frais de scolarités	Problèmes arithmétiques verbaux (épreuve du WJ-III, Woodcock et al., 2001)	Effet sur la tâche de résolution de problèmes
Demir et al., 2015	48 enfants 11 ans (9 à 12 ans) (Chicago, USA)	Gradient SES : niveau d'étude du parent	Connaissance des procédures arithmétiques (addition, soustraction, multiplication, division)	Aucun effet du SES

				Fluence mathématique (Woodcock et al., 2001) Comparaison non symbolique (tâche IRMf)	
Demir et al., 2016	33 enfants de 11 ans (8 à 13 ans) à T1 et 13 ans (11 à 16 ans) à T2 (Chicago, USA)	Gradient SES : index Hollingshead (niveau d'étude et statut occupationnel)		Fluence mathématique (Woodcock et al., 2001) à T1 et T2	Pas d'effet du SES sur les mesures de fluence mathématique (ni T1, ni T2, ni changement)
Gilmore et al., 2010	41 enfants de 5.8 ans de GS (Expérience 1) et 108 enfants de 5.9 ans de GS (Expérience 2)	Salaire « bas » et salaire « moyen » : Indicateurs : bénéficiaires du programme de repas gratuits/à coûts réduits ou non bénéficiaires		• Tâches d'additions non symboliques et évaluation scolaire en mathématiques (évaluation de fin d'année portant sur des connaissances numériques symboliques et de géométrie) (Expérience 1 et 2)	• Pas d'effet sur la tâche cognitive d'additions non symboliques • Effet du SES uniquement sur l'évaluation scolaire
Ginsburg et Pappas 2004	102 enfants de 4.8 ans (New York, USA)	SES « bas » « moyen » et « haut » Indicateurs : informations fournies par les écoles • « bas » : si éligibles à crèches subventionnées • « moyen » : pas de subvention et un parent au moins travaille • « haut » : enfants scolarisés dans des centres très coûteux		Additions arithmétiques et problèmes arithmétiques verbaux, représentations symboliques	Meilleures performances du groupe SES « haut » sur toutes les épreuves (sauf opérations impliquant des représentations verbales complexes)
Glenn et al., 2017	66 enfants (42-50 mois, Chicago USA)	Gradient SES : niveau d'étude et revenu familial		Tâche « Point-to-X » (compréhension du principe de cardinalité)	Effet du SES sur la maîtrise du principe de cardinalité
Ivrendi, 2011	71 enfants de grande section de maternelle (6 ans, Turquie)	Gradient SES : niveau d'étude et revenu familial		Mesure sur 17 items (production et identification de nombre, comptage,	Effet du niveau d'étude de la mère sur le score mathématique composite (pas d'effet du

Jordan et al., 1992	84 enfants de 5.9 ans (New Brunswick, USA)	Salaire « bas » et salaire « moyen » : Indicateurs : bénéficiaires du programme de repas gratuits/à coûts réduits, logements subventionnés vs non bénéficiaires	dénombrement, conservation du nombre, opérations arithmétiques)	revenu ni du niveau d'étude du père)
Jordan et al., 1994 (étude 2)	48 enfants de 3 à 6 ans (New Jersey, USA)	Salaire « bas » et salaire « moyen » Indicateurs : Programmes scolaires des enfants (bas revenus : Centre « Head Start » / revenus moyens : école maternelle)	Calculs arithmétiques (additions et soustractions) sous différents formats (verbal et non verbal) et évaluation du comptage/cardinalité	Effet du salaire sur les calculs arithmétiques en format verbal uniquement et sur la tâche de cardinalité (mais pas sur le comptage).
Jordan et al., 2006	411 enfants d'un même arrondissement scolaire, Grande Section (Delaware, USA)	Salaire « bas » et salaire « moyen » : Indicateurs : bénéficiaires du programme de repas gratuits/à coûts réduits ou non bénéficiaires	3 scores obtenus à partir de la tâche de calculs arithmétiques présentés de façon non verbale (addition et soustraction) : score de réponse non verbale au calcul (réponse à l'aide de représentations analogiques), score de réponse verbale au calcul et un score de reconnaissance non verbale du résultat de l'opération (choisir parmi 4 collections analogiques différentes, le résultat du calcul)	Effets du SES uniquement sur le score de production verbale (pas d'effet sur production et reconnaissance non verbales)
			Trajectoires de développement (sur l'année scolaire) : comptage, connaissance des nombres, estimation approximative, calculs non verbaux, problèmes arithmétiques verbaux, « combinaisons de nombres » (c.-à-d. calcul verbal) (tests issus de la Batterie de Jordan et al., 2006)	<ul style="list-style-type: none"> • Effet du SES sur tous les scores de la batterie en début d'année • Mais courbe de progression équivalente pour les deux groupes au cours de l'année, à l'exception des deux épreuves « problèmes arithmétiques verbaux » et « combinaisons de nombres » (le groupe « bas salaire » progresse moins)

Jordan et al., 2007	277 enfants de CP, même arrondissement scolaire (Delaware, USA)	Salaire « bas » et salaire « moyen » Indicateurs : bénéficiaires du programme de repas gratuits/à coûts réduits ou non bénéficiaires	Trajectoires de développement : comptage, connaissance des nombres, calculs non verbaux, problèmes arithmétiques verbaux, « combinaisons de nombres » (c.-à-d. calcul verbal) (tests issus de la Batterie de Jordan et al., 2006)	Effet sur le score composite et sur son taux de progression.
Jordan et al., 2008	217 enfants suivis de façon longitudinale (du début de la GS jusqu'en fin de CE1) (Delaware, USA)	Salaire « bas » et salaire « moyen » Indicateurs : bénéficiaires du programme de repas gratuits/à coûts réduits ou non bénéficiaires	Tâche arithmétique (addition et soustraction) de difficulté croissante selon la classe : mesures de l'exactitude de la réponse et de l'usage des doigts	<ul style="list-style-type: none"> • Score arithmétique : Les enfants défavorisés ont plus de difficultés à la tâche arithmétique que leurs pairs favorisés • Utilisation des doigts : <ul style="list-style-type: none"> - En GS les enfants les plus favorisés utilisent plus leurs doigts que les enfants favorisés, mais leur utilisation diminue ensuite - De la GS au CE1, les enfants défavorisés utilisent de plus en plus leurs doigts • Corrélation entre utilisation des doigts et scores arithmétiques : <ul style="list-style-type: none"> - forte en début de GS ($r=.6$), - décroît du CP au CE1 (de $r=.47$ à $r=.17$) - négative en fin de CE1 ($r=-.15$)

Klibanoff et al., 2006	146 enfants de 4.8 ans (issus de 13 écoles maternelles de Chicago, USA)	SES « bas » « moyen » et « haut » Indicateurs : informations fournies par les écoles (niveau d'étude et salaire)	Évaluations en début et fin d'année : ordinalité, cardinalité, calcul, noms de formes géométriques, compréhension de la "moitié" et connaissances des nombres symboliques.	En fin et en début d'année, le groupe SES « bas » est moins performant sur l'ensemble des tâches que les groupes « moyen » et « haut » (ces deux groupes ne diffèrent pas entre eux).
Lehrl et al., 2020	554 enfants 5 ans scolarisés en dernière année de maternelle (Allemagne)	SES (pas d'information sur les mesures)	Épreuves d'arithmétique	Effet du SES sur le score aux épreuves d'arithmétique
Levine et al., 2010 Et Gunderson et Levine (2011)	44 enfants de 46 mois (Chicago, USA)	Gradient SES : Salaire et niveau d'étude fournis par le parent	Tâche « Point-to-X » (compréhension du principe de cardinalité)	Effet du SES sur la maîtrise du principe de cardinalité (24% de la variance).
Martí et al., 2016	76 enfants de 43 mois (Barcelone, Espagne)	SES « très bas » ou « moyen-haut » : selon les caractéristiques de l'école (centre-ville vs banlieues défavorisées)	Connaissances symboliques à propos du nombre 3 : exprimer son âge (en utilisant ses doigts ou le nombre 3), quantifier (indiquer le nombre de points sur la face d'un dé, en utilisant ses doigts ou le nombre 3), utiliser (avancer de 3 cases sur un jeu de plateau d'après l'information du dé), sélectionner (choisir la face du dé correspondant à un intervalle de 3 cases sur un plateau) et réciter chaîne numérique verbale (3 premiers nombres)	Différences SES sur l'ensemble des tâches (à l'exception de la tâche « sélection de nombres », échouée par les deux groupes).

Mutaf-Yildiz et al., 2018	128 enfants de 5.4 ans issus de 5 écoles maternelles (Flandres, Belgique)	SES : niveau d'étude de la mère	Tâches numériques évaluant la cardinalité, ligne numérique symbolique et calculs présentés sous format imagé ¹	Effet du niveau d'étude uniquement sur les épreuves de calculs imagés
Napoli et Purpura, 2017	114 maternelles de 4.1 ans (3 à 5 ans, USA)	Gradient SES : Salaire et niveau d'étude fournis par le parent	Batterie d'habiletés numériques (Purpura, et al., 2015) : comparaison, ordinalité, identification des nombres ...	Effet sur le score composite en début et fin d'année
Scalise et al., 2018	46 enfants de grande section maternelle de 4.8 ans (USA)	Salaire « bas » et salaire « moyen » Indicateurs : •Éligibilité au programme Head Start pour le groupe « salaire bas » • groupe « salaire moyen » : revenus annuels déclarés de plus de \$76 000	Comparaisons symboliques (chiffres 1 à 9) Comparaisons non symboliques (1 à 9 points)	•Effet sur les comparaisons symboliques • Pas de différence sur la tâche non symbolique
Scheuer et al., 2019	66 enfants de 33 à 47 mois (Barcelone, Espagne et San Carlos de Bariloche, Argentine)	SES « très bas » ou « moyen-haut » : selon les caractéristiques de l'école (École A Espagne vs École B Argentine)	Tâches évaluant les 5 premières valeurs cardinales (Quantification, Utilisation d'informations quantitatives du dé au plateau, puis du plateau au dé)	Enfants issus des milieux les plus favorisés réussissent mieux l'ensemble des tâches
Siegler et Ramani 2008	58 enfants de 4.7 ans	Salaire « bas » et salaire « moyen » Indicateurs : •Programme Head Start centres d'accueil pour enfants de quartiers défavorisés	Positionnement de nombres sur ligne numérique (0-10)	Effet du niveau salaire aux performances sur la ligne numérique (caractère linéaire)

¹ La relation entre SES et habiletés numériques n'est pas présentée pour l'ensemble des épreuves évaluées. Sont présentées dans ce tableau seulement les épreuves pour lesquelles la relation avec le SES est exprimée dans l'article.

Skwarchuk et al., 2004	121 enfants de CP (de 5 à 6 ans, Canada)	<ul style="list-style-type: none"> École maternelle universitaire Gradient SES (ou salaire moyen) : estimé à partir du code postal (et des données de recensement canadien de 2006) 	Arithmétique non symbolique (Huntlenocher & Levine, 1994) et connaissance des nombres symboliques (sous-test de numération du KeyMath-R, Connolly, 2000)	Effet sur l'arithmétique non symbolique et sur la connaissance des nombres symboliques
Slusser et al., 2018	143 enfants de 4.5 ans (testés à nouveau à 5.5 ans) (USA)	Gradient SES : niveau d'étude du parent	Cardinalité (« Give-a-Number task »), acuité du système numérique non symbolique (Panamath) et score composite (TEMA-3 ; chaîne numérique verbale, lecture de nombre, comparaison symbolique et calcul)	<ul style="list-style-type: none"> Effet du SES sur les compétences de cardinalité (à 4.5 ans) et le score composite de math (à 5.5 ans) Pas d'effet du SES sur l'acuité numérique non symbolique
Starkey et al., 2004	163 enfants entrant en GS (en Californie, USA) l'année suivante (4 ans)	Salaire « bas » et salaire « moyen » Indicateurs : Programmes scolaires des enfants (Bas revenus : Centre « Head Start » et école publique / revenus moyens : école maternelle privée et école maternelle universitaire)	16 tâches de connaissances mathématiques : dénombrement, ordinalité, comparaison symbolique, opérations arithmétiques (avec et sans objets), mesures liées à l'espace et à la géométrie	Effet sur le score composite global et sur 10 tâches spécifiques (dont comptage, ordinalité, comparaison symbolique, opérations arithmétiques avec objets (mais pas de différence pour les opérations sans objets))
Susperreguy et Davis Kean, 2016	40 enfants de 4.6 ans (3.10 ans à 5.9 ans) (USA)	Gradient du niveau d'étude : information fournie par les parents	Connaissances mathématiques formelles (arithmétiques, connaissances symboliques) et informelles (comptage, grandeurs non symboliques) (TEMA-3 ; Ginsburg & Baroody, 2003)	Effet sur score composite à la batterie
Susperreguy et al., 2020	368 enfants de 5 ans (suivis sur une année) (Chili)	Gradient SES : niveau d'étude	<ul style="list-style-type: none"> Compétences précoces (chaîne numérique verbale, dénombrement et lecture de mots), comparaison 	Effet du SES sur tous les scores, sauf ceux aux tâches de comparaisons non symboliques

Thomas, et al., 2021)	167 enfants de 5.2 ans (4.2 à 6.5 ans) (France)	Gradient SES : niveau d'étude et profession (des 2 parents), revenu familial	<p>symbolique, comparaison non symbolique, ligne numérique symbolique, problèmes arithmétiques verbaux et fluence arithmétique</p> <p>9 habiletés numériques spécifiques :</p> <ul style="list-style-type: none"> • Identification du symbole arabe (à partir de sa présente auditivo-verbale) • Lecture nombre symbole • Connaissance chaîne numérique verbale • Dénombrément un à un • Connaissance principe de cardinalité • Comparaison non symbolique • Estimation de petites quantités (subitizing) • Conversion symbolique vers analogique • Problèmes arithmétiques verbaux 	et de ligne numérique symbolique.
Valle-Lisboa et al., 2016	454 enfants de 7.3 ans (6.4 à 8.8 ans, 7 écoles de Montevideo, Uruguay)	Gradient SES : estimé à partir de la situation de l'école	<p>Évaluations des mathématiques formelles (PUMA) : connaissances des symboles, décomposition de nombres, ordinalité, placement sur ligne numérique et problèmes avec énoncés verbaux</p> <ul style="list-style-type: none"> • Acuité du système numérique non symbolique (Panamath) 	Effet du SES sur le score global en mathématiques formelles et sur la précision du système non symbolique.

3.1. Des disparités socio-économiques dans les composantes « verbales » des habiletés mathématiques : acquisition et maîtrise des systèmes symboliques et de l'arithmétique

3.1.1. Disparités socio-économiques dans l'acquisition et la manipulation du système symbolique (verbal et indo-arabe)

Des disparités socio-économiques ont été mises en évidence sur l'ensemble des compétences numériques dites « symboliques » (pour rappel sur la définition de ces compétences, voir chapitre 2 section 1.2). Certaines études ont utilisé des scores symboliques composites qui ne permettent pas l'identification d'un type d'habiletés spécifiquement modulées par le SES familial. Ces études soulignent néanmoins que les enfants issus des classes sociales les plus défavorisées semblent éprouver de plus grandes difficultés pour différentes tâches symboliques, avant *et* pendant la scolarisation formelle (De Keyser et al., 2020; N. C. Jordan, Kaplan, Locuniak, & Ramineni, 2007; Klibanoff, Levine, Huttenlocher, Vasilyeva, & Hedges, 2006; Valle-Lisboa et al., 2016).

De façon plus précise, certaines disparités socio-économiques ont été révélées dès l'acquisition du système symbolique verbal (les mots-nombres) et indo-arabe (les chiffres) (Cheung et al., 2020; Cheung, Yang, Dulay, & McBride, 2018), mais aussi lors de leur manipulation (Cheung et al., 2020, 2018; N. C. Jordan, Kaplan, Nabors Oláh, & Locuniak, 2006; Napoli & Purpura, 2017; Scalise, Daubert, & Ramani, 2018; Skwarchuk, Sowinski, & LeFevre, 2014; Slusser et al., 2018; Starkey, Klein, & Wakeley, 2004; Susperreguy, Burr, et al., 2020). Des tâches de comparaisons symboliques ont notamment été utilisées pour évaluer l'impact du SES (Bernabini, Tobia, & Bonifacci, 2021; Cheung et al., 2020, 2018; Scalise et al., 2018; Starkey et al., 2004; Susperreguy, Burr, et al., 2020). Par exemple, l'étude réalisée par Scalise et collaborateurs (2018) a permis de tester cette compétence chez des enfants de milieux socio-économiques variés, avant leur entrée à l'école primaire. Plus exactement, l'exercice demandé aux enfants consistait à résoudre des tâches de comparaisons de quantités (de 1 à 9), présentées dans un format symbolique (nombres arabes). Les enfants issus des milieux les plus défavorisés avaient significativement plus de difficultés que leurs pairs favorisés (Scalise et al., 2018).

3.1.2. Disparités socio-économiques dans l'acquisition du dénombrement et du principe de cardinalité

Des différences socio-économiques ont également été objectivées lors du développement d'habiletés numériques symboliques ultérieures, notamment pour les compétences de dénombrement et de compréhension du principe de cardinalité (voir section 1.2.2 du chapitre 2). L'existence de telles disparités socio-économiques a été mise en évidence dès le début de l'apprentissage de ces compétences (Cheung et al., 2020, 2018; Glenn, Demir-Lira, Gibson, Congdon, & Levine, 2017; Gunderson & Levine, 2011; Levine et al., 2010; Thomas et al., 2021). Ces disparités pourraient ensuite se modifier. Jordan et collaborateurs (1992) ont par exemple montré que des enfants plus âgés (6 ans) faisaient preuve de compétences de dénombrement équivalentes, quel que soit leur milieu socio-économique. Ces enfants continuaient par contre à présenter des disparités concernant la maîtrise du principe de

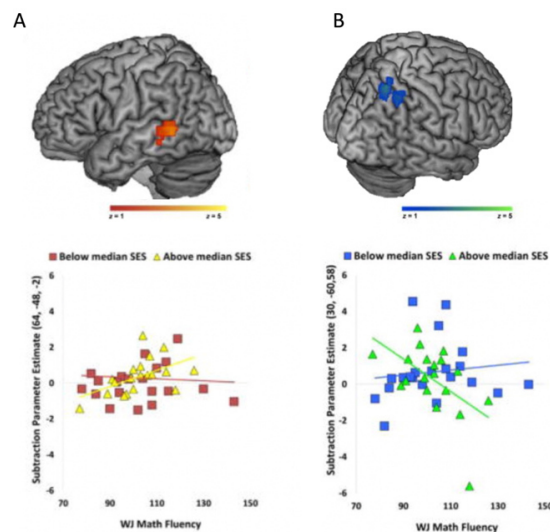
cardinalité (disparités en défaveur des enfants les plus défavorisés). Selon la lecture de ces résultats proposée par Jordan et Levine dans leur article de revue (2009), le retard dans l'acquisition des codes symboliques chez les enfants défavorisés pourrait entraîner par voie de conséquence des difficultés ultérieures dans les tâches de manipulation de ces symboles.

3.1.3. Disparités socio-économiques dans l'acquisition des compétences arithmétiques

À l'étude des disparités socio-économiques précoces dans l'acquisition des compétences symboliques, s'ajoute une majorité de travaux qui ont permis d'étudier ces disparités au sein des compétences arithmétiques chez l'enfant (Bernabini et al., 2021; Cheung et al., 2020, 2018; Ginsburg & Pappas, 2004; Ivrendi, 2011; N. C. Jordan et al., 1992, 2006; Starkey et al., 2004). De façon globale, des disparités socio-économiques ont été observées en ce qui concerne les compétences précoces de résolution de calculs simples (Cheung et al., 2020, 2018; Ginsburg & Pappas, 2004; N. C. Jordan et al., 2006; Starkey et al., 2004), sur le taux de progression de ces compétences au cours d'une année de grande section de maternelle (N. C. Jordan et al., 2006), ou encore sur les compétences de calcul après le début de la scolarisation formelle (Ivrendi, 2011; N. C. Jordan et al., 1992). Une étude réalisée par Jordan et collaborateurs (2008) a également montré l'existence de telles disparités socio-économiques dans la réussite arithmétique des enfants, mais a surtout proposé l'existence de disparités dans le type de stratégie de résolution arithmétique utilisée. Les auteurs ont en effet porté une attention particulière à l'usage des doigts lors de la résolution arithmétique, c'est-à-dire une stratégie de résolution arithmétique dite « non intériorisée » via l'usage de représentations manipulables (voir section 2.2.1 du chapitre 2). Les enfants les plus défavorisés pourraient mettre en place cette stratégie de façon plus tardive que leurs pairs plus favorisés. De surcroît, alors que les pairs favorisés abandonnaient progressivement cette stratégie pour d'autres, intériorisées et plus évoluées, les enfants défavorisés avaient tendance à conserver cette stratégie durablement (au moins jusqu'à la fin du CE1 ; N. C. Jordan et al., 2008). Les auteurs soulignaient que la mise en place précoce de cette stratégie (chez les enfants les plus favorisés) était corrélée aux bonnes performances mathématiques. Au contraire, son maintien en fin de CE1 (chez les enfants les plus défavorisés) était associé à de plus faibles compétences mathématiques. Les disparités socio-économiques des enfants en résolution arithmétique pourraient s'expliquer par l'usage de procédures de résolution de calcul différentes, plus ou moins évoluées et efficaces (N. C. Jordan et al., 2008).

Il peut être intéressant ici de faire une analogie avec les résultats d'une étude de neuro-imagerie réalisée sur 48 enfants américains de 11 ans en moyenne (Demir et al., 2015). Alors que leurs performances aux différentes épreuves de calcul arithmétique (chronométrée ou non) n'étaient pas liées aux disparités socio-économiques, l'activité cérébrale de ces enfants (pendant une tâche IRMF de résolution de soustractions) a montré l'existence d'un phénomène de dissociation socio-économique (voir **Figure 21**, tirée de Demir et al., 2015). Plus exactement, ces résultats ont révélé un effet d'interaction entre performances des enfants et SES pendant l'activité cérébrale dédiée à la résolution des soustractions. Parmi les enfants issus des milieux favorisés, ceux avec les meilleurs scores arithmétiques recrutaient davantage le gyrus temporal moyen gauche (et dans une moindre mesure recrutaient significativement moins l'IPS droit).

Parmi les enfants issus des milieux défavorisés, ceux avec les meilleurs scores arithmétiques recrutent davantage l'IPS droit. Dans une seconde étude, le même groupe d'auteurs a montré que cette dissociation cérébrale permettait de prédire les gains en mathématiques des enfants en moyenne 2.5 ans après l'évaluation initiale de leur activité cérébrale pendant la résolution de soustractions (Demir-Lira et al., 2016). Les gains des enfants issus des milieux les plus favorisés étaient davantage prédits par le recrutement initial de régions verbales (l'IFG) lors de la résolution de soustraction. Au contraire, les gains des enfants issus des milieux moins favorisés étaient davantage prédits par l'activité du cortex pariétal supérieur droit.



Figures 21 : Figures tirées de Demir et al. (2015) illustrant les interactions entre performances arithmétiques des enfants (score de fluence mathématique) et leur milieu socio-économique dans leur activité cérébrale lors de la résolution de soustractions. **A.** L'activité dans le gyrus temporal moyen gauche a montré une interaction entre niveau de SES et compétences en fluence arithmétique. En dessous, à des fins de visualisation, cette interaction a été représentée avec l'activité cérébrale en ordonnée, le score en fluence mathématique en abscisse et le niveau SES (carré rouge, SES défavorisé ; triangle jaune, SES favorisé). **B.** L'activité dans l'IPS droit a montré une interaction entre niveau de SES et compétences en fluence arithmétique. En dessous, à des fins de visualisation, cette interaction a été représentée avec l'activité cérébrale en ordonnée, le score en fluence mathématique en abscisse et le niveau SES (carré bleu, SES défavorisé ; triangle vert, SES favorisé). $N=40$

Les dissociations cérébrales objectivées par Demir et collaborateurs (2015) pourraient être interprétées comme indiquant des disparités socio-économiques dans le type de procédure de résolution arithmétique utilisée. Le soutien d'une région verbale (le gyrus temporal gauche) pour la résolution arithmétique chez les enfants issus des milieux plus favorisés pourrait indiquer l'usage d'une procédure élaborée orientée vers la récupération en mémoire (voir chapitre 2 section 2.2.3). À performances de fluence mathématique égales, le recrutement de l'IPS droit chez les enfants issus des milieux moins favorisés pourrait refléter davantage l'utilisation d'un second type de procédure élaborée pour la résolution de calcul (c.-à-d. l'automatisation de la procédure).

De façon plus générale, comme soulignées par Demir et collaborateurs (2015; 2016), ces différences socio-économiques dans les réseaux cérébraux recrutés pour l'arithmétique

seraient cohérentes avec la distinction de Jordan et Levine (2009) sur les aspects « verbaux » versus « non verbaux » des composantes mathématiques.

Il nous paraît néanmoins important de souligner que, même si ces résultats semblent bien indiquer que les enfants les plus défavorisés auraient tendance à moins recruter les réseaux cérébraux dédiés au langage lors de la résolution arithmétique, cela ne semble pas avoir été source de conséquences négatives dans leurs compétences arithmétiques (de façon concomitante, Demir et al., 2015; ou prédictive, Demir-Lira et al., 2016). Ces résultats suggèrent l'utilisation de procédures de résolution de calcul certes différentes selon les milieux socio-économiques, mais *a priori* autant efficaces (en tout cas, les différences cérébrales objectivées n'étaient pas liées à des difficultés comportementales plus marquées chez les enfants issus des milieux socio-économiques défavorisés ; Demir et al., 2015; Demir-Lira et al., 2016). Toutefois d'autres études sont nécessaires pour une meilleure compréhension du phénomène de dissociation socio-économique de l'activité cérébrale dédiée à l'arithmétique afin de mieux soutenir leur mise en place tout en veillant à ne pas les entraver.

Au niveau comportemental, pour mieux comprendre l'expression des disparités socio-économiques au sein des compétences arithmétiques et tenter d'identifier les procédures en jeu, une différenciation des différents formats arithmétiques peut être considérée : sous une forme symbolique, à l'oral (p. ex. « *cinq plus trois égalent* ») ou à l'écrit (p. ex. « $5+3 =$ »), sous une forme non symbolique¹ (en manipulant des quantités analogiques, p. ex. « 5 jetons et 3 jetons ») ou encore sous une forme « narrative », aussi nommée « problème arithmétique verbal ». Cette dernière forme consiste à présenter l'énoncé arithmétique via une courte histoire (p. ex. « Paul a cinq billes, il en gagne trois. Combien de billes a Paul ? »).

- *Problèmes arithmétiques verbaux*

Le cas des « problèmes arithmétiques verbaux » est une première façon de préciser les disparités socio-économiques pesant dans les compétences arithmétiques de l'enfant. Cet exercice exige avant tout que l'enfant soit capable d'identifier l'opération à réaliser. Il faut en effet qu'à travers la « petite histoire » qui lui est racontée, l'enfant soit capable d'extraire non seulement les opérands à manipuler, mais aussi le type d'opération à réaliser sur ces opérands. Indépendamment de la difficulté intrinsèque de l'opération arithmétique à effectuer, la première difficulté réside donc dans la complexité de la situation décrite verbalement (Gamo, Taabane, & Sander, 2011). Des études ont montré que les enfants issus des milieux socio-économiques défavorisés avaient de plus grandes difficultés à répondre correctement aux problèmes arithmétiques verbaux, même lorsque ces derniers impliquaient des calculs simples (Abedi & Lord, 2001; Ginsburg & Pappas, 2004; N. C. Jordan et al., 2006; Río, Susperreguy, Strasser, &

¹ On note cependant que, quel que soit le format employé, la tâche arithmétique attend ici une réponse exacte (et non pas approximative).

Salinas, 2017; Susperreguy, Burr, et al., 2020; Thomas et al., 2021)¹. La réduction de l’ambiguïté de ces énoncés (notamment par l’utilisation de la voie active plutôt que la voie passive) pourrait en conséquence permettre aux enfants issus des milieux socio-économiques défavorisés d’améliorer leurs performances (Abedi & Lord, 2001).

- *Tâches de calcul arithmétique avec support analogique*

Pour préciser la relation entre SES et calculs arithmétiques, d’autres travaux ont cherché à décomposer le processus de résolution arithmétique lui-même. Une première proposition a consisté à présenter les calculs symboliques à l’aide de supports imagés (voire manipulables), l’idée étant que si les difficultés des enfants résident avant tout dans leur maîtrise des symboles numériques, la représentation des quantités analogiques devrait alors faciliter leur résolution de calculs (Levine et al., 1992). Dans ce cas de figure, la tâche arithmétique exige toujours une réponse symbolique (p. ex. « 7 »), est toujours présentée comme une opération classique avec un énoncé symbolique (p. ex. de type « 3+4 »), mais fournit également une représentation analogique de chacun des opérandes (N. C. Jordan et al., 2006; Mutaf-Yıldız, Sasanguie, De Smedt, & Reynvoet, 2018a; Starkey et al., 2004)². Par exemple, dans l’étude de Mutaf-Yıldız et al. (2018a) a été utilisée la tâche « d’opérations avec supports imagés » du TediMath (Desoete & Grégoire, 2006) : l’expérimentateur devait lire le problème aux enfants en leur montrant pour chacun des opérandes une représentation visuelle (p. ex. « Tu vois ici deux ballons rouges et trois ballons bleus. Combien y a-t-il de ballons ensemble ? »). Cependant, les résultats des trois études ayant employé ce type de tâche ont montré que cette mise à disposition de la représentation analogique de l’opération symbolique n’était pas suffisante pour permettre aux enfants issus des milieux défavorisés de compenser leur retard : les enfants issus des milieux plus favorisés réussissaient davantage ces épreuves de calculs imagés (N. C. Jordan et al., 2006; Mutaf-Yıldız et al., 2018a; Starkey et al., 2004). Les auteurs de ces trois études n’ont pas discuté les causes potentielles de ce maintien des disparités sur ces tâches arithmétiques avec supports analogiques. Néanmoins le maintien des disparités pourrait s’expliquer, au moins en partie, par l’utilisation de procédures de résolution différentes (section 2.2 du chapitre 2). L’étude, précédemment exposée de Jordan et collaborateurs (2008), avait illustré que les difficultés arithmétiques des enfants défavorisés pourraient s’expliquer par l’utilisation de stratégies de calcul peu évoluées, comparativement à leurs pairs plus favorisés (notamment le fait de compter sur leurs doigts jusqu’à un âge plus tardif). Sur la base de ce résultat, il est possible de faire l’hypothèse selon laquelle la mise à disposition d’un support de quantités analogiques pour le calcul ne va pas fondamentalement changer les différences de stratégies utilisées selon le milieu social. Les enfants défavorisés ayant l’habitude d’utiliser leurs doigts comme représentations manipulables pourraient certes faire l’économie de la transposition,

¹ Notons que dans le cas des problèmes arithmétiques verbaux, la distinction des compétences « verbales versus non verbales » proposé par Jordan et Levine ne se rapporterait plus au format des quantités mais plutôt à l’énoncé lui-même.

² Pour Jordan et al. (2006), le format de réponse était laissé libre (analogique ou verbal), nous discutons ce point ci-dessous.

potentiellement coûteuse, des opérands symboliques en quantités analogiques, mais leur stratégie de résolution continuerait à reposer sur une stratégie peu évoluée de dénombrement d'items « matérialisés ». L'étude de Jordan et collaborateurs (2008) avait montré que les enfants issus de milieux économiques plus favorisés abandonnaient quant à eux rapidement l'usage des doigts tout en étant plus performants dans leurs calculs. En fin de compte, lors d'une tâche de calcul mettant à disposition des supports analogiques des quantités, ces enfants utilisant déjà des stratégies de résolution arithmétique plus efficaces n'utiliseraient pas ces supports et résoudre les calculs à partir du seul énoncé symbolique et conserveraient donc leur avance dans la performance arithmétique.

- *Tâches de calcul arithmétique sous format exclusivement analogique*

Une deuxième décomposition de l'étude du processus de résolution arithmétique a consisté à conserver l'usage des représentations analogiques des quantités, mais en supprimant cette fois toutes composantes symboliques¹. Autrement dit, l'énoncé arithmétique présenté, ainsi que la réponse attendue de l'enfant, étaient uniquement dans un format analogique (N. C. Jordan et al., 1992, 1994). Le procédé employé par Jordan et collaborateurs (1992, 1994) était directement basé sur celui qu'avaient proposé Levine et collaborateurs pour étudier les modalités non verbales de l'arithmétique (Levine et al., 1992). Il se déroulait de la façon suivante : après s'être assuré que l'enfant comprenait la consigne via le recours à des tâches simples d'appariement, l'expérimentateur présentait à l'enfant un premier ensemble de disques disposés en ligne horizontale. Ces disques (le premier opérande) étaient ensuite masqués par un tissu, puis l'expérimentateur présentait un nouvel ensemble de disques (le deuxième opérande) de la même manière avant de les ajouter, un à un, sous le tissu (transformation additive). Dans le cas d'une transformation analogique mimant une soustraction, un certain nombre de disques étaient retirés du tissu, un à un, et présentés en ligne horizontale devant l'enfant. Les deux termes de l'opération n'étaient jamais visibles simultanément par l'enfant (afin d'empêcher une résolution par simple dénombrement). Aucune étiquette symbolique verbale n'était fournie par l'examineur et la réponse de l'enfant était également attendue dans un format non verbal : il devait exprimer le résultat de la transformation en présentant un ensemble de disques de la quantité correspondante. À partir de cette tâche de transformation arithmétique non verbale, les résultats des deux études de Jordan et collaborateurs (1992, 1994) ont montré une absence de différence de compétences entre les enfants, quel que soit leur niveau socio-économique et quel que soit leur âge (de 3 à 5 ans pour N. C. Jordan et al., 1994, 6 ans pour Jordan et al., 1992). Autrement dit, les enfants issus des milieux les plus défavorisés, qui avaient par ailleurs plus de difficultés pour les tâches arithmétiques symboliques, réussissaient aussi bien que leurs pairs plus favorisés cette tâche de transformation arithmétique non symbolique (sans aucune

¹ Même si cela n'est pas discuté par Jordan et Levine dans leur revue (2009) on notera ici que les tâches d'arithmétique proposées sous format exclusivement analogique peuvent être considérées comme des tâches d'arithmétique non verbales ou non symboliques, mais attendent cependant un résultat exact. Ainsi, même sans « étiquette symbolique », ces calculs supposent malgré tout une représentation exacte des quantités (voir chapitre 2).

référence aux codes symboliques ; N. C. Jordan et al., 1992; mais voir Skwarchuk et al., 2014 dans la section 3.2.1).

Pour mieux interpréter l'absence de disparités socio-économiques lors d'une telle tâche arithmétique, Jordan et collaborateurs ont complété leur seconde étude (1994) avec deux modalités de réponses supplémentaires. En plus de la modalité précédemment décrite (uniquement non verbale, et requérant une manipulation des quantités analogiques), une deuxième modalité (« reconnaissance non verbale ») a consisté à demander à l'enfant de choisir parmi 4 propositions de quantités analogiques différentes celle qui correspondait à la transformation arithmétique visualisée (autrement dit, l'enfant n'avait pas à construire lui-même cette représentation analogique, mais devait l'identifier parmi un choix multiple), et une troisième modalité (« production verbale ») qui consistait à demander à l'enfant de donner la réponse sous forme symbolique à l'oral. Leurs résultats ont montré que les performances des enfants les plus favorisés du point de vue socio-économique n'étaient pas affectées par la modalité de réponse tandis que les enfants plus défavorisés voyaient leurs performances chuter avec la modalité de « production verbale » du format symbolique (voir **Figure 22**, tirée de N. C. Jordan et al., 1994).

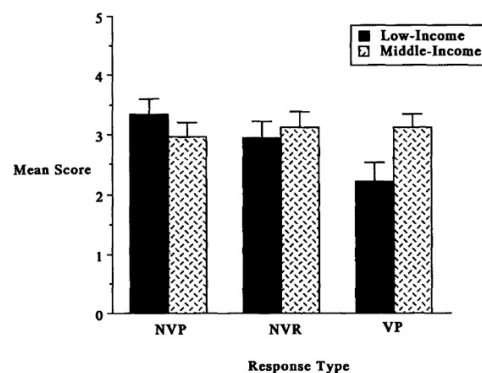


Figure 22 : Figure tirée de Jordan et al. (1994) représentant les scores moyens des enfants (en ordonné) aux différentes tâches arithmétiques (en abscisse) selon le revenu familial (« bas salaire » en noir et « salaire moyen » en blanc hachuré) et selon la modalité de réponse : production non verbale (NVP), reconnaissance non verbale (NVR) et production verbale (VP). Les barres d'erreurs indiquent l'écart-type. $N=48$

Notons ici que la tâche arithmétique avec supports visuels de Jordan et al. (2006), évoquée précédemment, avait la particularité de laisser libre le format de réponse. Cela signifiait que l'enfant pouvait fournir une réponse symbolique verbale ou indiquer la réponse en la représentant avec des jetons laissés à sa disposition. On rappelle que les enfants issus des milieux socio-économiques plus favorisés avaient de meilleurs résultats à cette tâche que leurs pairs défavorisés ; néanmoins les auteurs n'ont pas rapporté le format de réponse choisi par les sujets, ni si cela avait une influence sur leurs performances. D'après les résultats que nous venons de présenter, on peut cependant faire l'hypothèse que les enfants plus favorisés d'un point de vue socio-économique avaient conservé leur avance sur leurs pairs plus défavorisés en privilégiant certainement le format de réponse verbale, c'est-à-dire sans utiliser la représentation analogique des quantités que ce soit pour la compréhension de l'énoncé ou pour leurs réponses.

3.1.4. Hypothèses d'interprétation des disparités socio-économiques mises en évidence pour les différents types de manipulations symboliques

De façon générale, les travaux présentés ont mis en évidence des disparités socio-économiques dans les compétences symboliques chez les enfants, de leur acquisition à leur manipulation. De telles disparités s'exprimeraient également dans les tâches arithmétiques, qu'elles soient présentées indirectement (via un format « narratif », problème arithmétique verbal) ou plus directement (à l'aide d'un énoncé symbolique). Ces disparités se maintiendraient alors que les enfants disposent de représentations analogiques en plus de l'énoncé symbolique. Nous proposons deux hypothèses, non exclusives, afin d'interpréter ces différences : celle du rôle incrémental des compétences symboliques et celle du rôle des disparités dans la maîtrise des différentes procédures de résolution arithmétique.

La première hypothèse suppose que les enfants échouent pour les calculs arithmétiques verbaux du fait d'un défaut de la maîtrise du code symbolique ou de son usage pour dénombrer par exemple. Sans présenter de façon formelle les résultats de ces observations, Jordan et collaborateurs (1994) avaient décrit dans leur article le comportement de certains enfants, capables de lever le nombre correct de doigts par rapport au calcul à réaliser, mais qui indiquaient ensuite, à l'oral, un code symbolique erroné. Il est donc possible que les difficultés d'arithmétiques des enfants défavorisés socio-économiquement proviennent d'un défaut de compréhension du principe de cardinalité ou de maîtrise de la chaîne numérique verbale. Dans cette perspective, exprimer la réponse au calcul sous un format analogique leur permettrait d'améliorer leurs compétences en contournant cette difficulté.

Les disparités de réussite académique peuvent aussi indiquer le développement différentiel des procédures de résolution de calcul selon le milieu socio-économique des enfants. L'étude de Jordan et collaborateurs (2008) avait mis en évidence des schémas développementaux différents en ce qui concerne l'usage des doigts dans la résolution arithmétique. Les disparités de compétences arithmétiques soulignées dans cette section pourraient également signaler l'usage de stratégies de résolution plus élaborées chez les enfants les plus favorisés. Dans ce cas de figure, la suppression des disparités socio-économiques pour les tâches d'arithmétique exclusivement analogiques pourrait s'expliquer par l'obligation, pour tous les enfants, de recourir de façon « forcée » à une stratégie de résolution « peu élaborée » consistant à dénombrer des items. Autrement dit, les disparités socio-économiques s'effaceraient alors parce que les enfants les plus favorisés renonceraient, dans ce cas de figure, à l'utilisation de leurs stratégies plus élaborées.

La littérature qui vient d'être exposée dans cette section serait donc plutôt cohérente avec la distinction proposée par Jordan et Levine (2009) en montrant l'existence de disparités socio-économiques au sein des compétences numériques « verbales » (acquisition et utilisation du système symbolique) et les modalités verbales de l'arithmétique (consigne verbale des problèmes arithmétiques « narratifs », mais aussi format symbolique verbal de l'énoncé ou de la réponse). L'utilisation de procédures de calculs moins développées (comme la représentation sur les doigts) pourrait aussi indiquer un défaut de représentation verbale des quantités nécessaires à la mise en place de procédures plus évoluées.

De façon plus générale et en accord avec le postulat de Jordan et Levine (2009), les performances en lecture des enfants sont fortement corrélées à la réussite en mathématiques, que ce soit lors du développement normal (Duncan et al., 2007) ou lors de difficultés spécifiques d'apprentissage (Dirks et al., 2008; Rubinsten, 2009; Simmons & Singleton, 2008). Le rôle des aspects langagiers dans l'acquisition de la chaîne numérique verbale avait été souligné dans le chapitre 2 (section 1.2.1), ainsi que leur rôle dans la mise en place de procédure de calculs plus élaborés (notamment le rôle joué par les compétences phonologiques lors du calcul intériorisé ou de la récupération en mémoire, voir section 2.2.2 et 2.2.3).

3.2. Hypothèse de dépassement du clivage « verbal » / « non verbal » : hétérogénéité des résultats et études du système non symboliques

Les travaux présentés jusqu'à présent tendaient à confirmer un lien entre aspects verbaux des compétences mathématiques et caractéristiques socio-économiques de la famille. Néanmoins pour conclure que les variations socio-économiques n'affecteraient que ces seules habiletés numériques, il importe de considérer également les études ayant évalué les compétences mathématiques « non verbales » (ou « non symboliques », section 1.1 du chapitre 2) et leur relation avec le SES familial. Nous signalons également les résultats d'études qui révèlent des résultats plus hétérogènes que ne le supposent les résultats des études présentées dans la section précédente.

3.2.1. SES et scores aux tâches visant l'évaluation des compétences non symboliques

Un premier constat : comparativement aux travaux portant sur les aspects « verbaux » du nombre, ces études sont encore moins nombreuses (Bernabini et al., 2021; Gilmore et al., 2010; Scalise et al., 2018; Slusser et al., 2018; Susperreguy, Burr, et al., 2020; Thomas et al., 2021; Valle-Lisboa et al., 2016).

Parmi celles-ci, quatre ont obtenu des résultats en faveur d'une absence de relation des compétences non symboliques avec le SES familial (Gilmore et al., 2010; Scalise et al., 2018; Slusser et al., 2018; Susperreguy, Burr, et al., 2020). Les résultats obtenus par Scalise et collaborateurs (2018) ainsi que ceux de Susperreguy et collaborateurs (2020) sont en faveur d'une absence de lien entre SES et réussite des enfants de maternelle à une tâche de comparaison non symbolique (consistant à identifier le plus grand ensemble de points parmi deux ensembles présentés simultanément). Slusser et collaborateurs (2018) ont obtenu des résultats en faveur d'une absence de relation entre SES et acuité non symbolique des enfants (tâche *Panamath*, Halberda et al., 2008; pour description, voir section 1.1.2 du chapitre 2). Enfin, Gilmore et collaborateurs (2010) ont utilisé une tâche d'opérations non symboliques approximatives avec des enfants également scolarisés en grande section¹. Le procédé utilisé

¹ Dans cette tâche de Gilmore et al. (2010), la présentation et la réponse à cette transformation arithmétique n'impliquait pas de codes symboliques comme pour Jordan et collaborateurs (1992, 1994). Néanmoins cette tâche se différencie des études de Jordan et al., sur un aspect crucial puisqu'elle n'attendait pas cette fois de réponse exacte mais une réponse approximative.

pour cette tâche consistait à montrer une vidéo à l'enfant dans laquelle étaient mis en scène des ensembles de points : un premier ensemble de points d'une certaine couleur apparaissait puis se retrouvait masqué derrière un cache ; après cela, un deuxième ensemble de points de la même couleur apparaissait pour s'ajouter derrière le même cache (dans le cas d'une transformation additive ; voir **Figure 23**, tirée de Gilmore et al., 2010). Un troisième ensemble de points d'une nouvelle couleur était ensuite présenté à l'enfant en lui demandant de décider si ce nouvel ensemble de points était plus petit ou plus grand que les deux premiers ensembles de points additionnés derrière le cache (voir **Figure 23**). Les résultats ont montré que la réussite à cette approximation des quantités non symboliques n'était pas en lien avec les caractéristiques socio-économiques des enfants testés. Par ailleurs, on peut aussi évoquer les données comportementales tirées de l'étude de neuro-imagerie, précédemment mentionnée, de Demir et collaborateurs (2015) montrant une absence de relation entre SES et performances comportementales à une tâche IRMf de comparaison non symbolique (réalisée dans un contexte bien particulier qu'est celui de l'IRM).

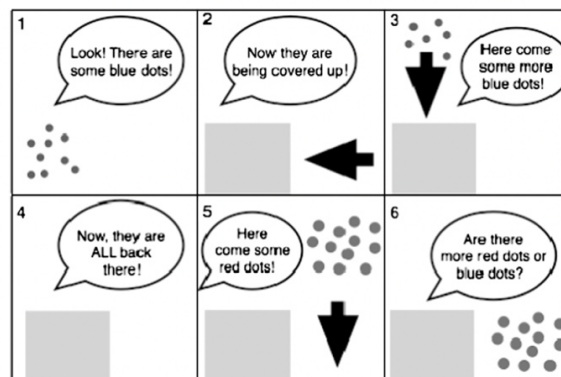


Fig. 1. The non-symbolic addition test for a sample problem in Experiment 1.

Figure 23 : Figure tirée de Gilmore et collaborateurs (2010) illustrant la mise en scène d'une transformation additive non symbolique.

À l'inverse de ces quatre premières études en faveur d'une absence de lien entre le SES et la précision du système non symbolique des quantités chez l'enfant, quatre autres études ont montré des résultats contraires (Bernabini et al., 2021; Skwarchuk et al., 2014; Thomas et al., 2021; Valle-Lisboa et al., 2016). Valle-Lisboa et collaborateurs (2016) ont aussi utilisé la tâche *Panamath* (Halberda et al., 2008), mais leurs résultats ont montré que les enfants issus des milieux socio-économiques les plus défavorisés avaient un système non symbolique des quantités moins précis que leurs pairs plus favorisés. Bernabini et collaborateurs (2021) ainsi que Thomas et collaborateurs (2021) ont utilisé une tâche de comparaison non symbolique similaire à celle de Scalise et al. (2018) mais ont obtenu des résultats inverses, cette fois en faveur de l'existence de disparités socio-économiques dans les performances non symboliques des enfants. L'étude de Thomas et collaborateurs (2021) comprenait également une tâche évaluant le système d'individuation parallèle des quantités (ou subitizing, voir section 1.1.1 du chapitre 2). Plus précisément, après avoir vu un ensemble de jetons (de 1 à 6) pendant une demi-seconde, les enfants devaient indiquer le nombre exact de jetons. Les performances des enfants

à cette tâche étaient également en faveur de l'existence de disparités socio-économiques. Enfin, Skwarchuk et collaborateurs (2014) ont utilisé une tâche de calcul arithmétique sous format exclusivement analogique (adaptée de Levine et al., 1992), mais ont montré des résultats opposés à ceux de Jordan et collaborateurs (1992, 1994; discutés précédemment dans la section 3.1.3.). Les enfants issus des milieux socio-économiques les plus favorisés réussissaient mieux cette tâche que leurs pairs défavorisés (Skwarchuk et al., 2014).

Au niveau cérébral, il peut être intéressant de faire référence dans cette section à une étude déjà évoquée (dans la section 1.2 du présent chapitre) pour avoir montré l'existence de disparités socio-économiques au sein des caractéristiques de volume cérébral (au niveau global, mais aussi dans les régions frontales). Hanson et collaborateurs (2013), via l'analyse longitudinale de données de 77 enfants américains de leurs 5 mois à leurs 4 ans, avaient également montré l'accroissement de disparités socio-économiques avec l'âge dans le volume du cortex pariétal (voir **Figure 24**, tirée de Hanson et al., 2013). Comparativement à leurs pairs les plus favorisés, les enfants issus des milieux socio-économiques les plus défavorisés présentaient une expansion significativement moindre du volume de matière grise au sein du lobe pariétal. Cette relation entre SES et volume du cortex pariétal au cours du développement chez l'enfant n'est bien sûr pas informative en soi d'une relation quelconque avec le traitement non symbolique des quantités. Néanmoins, nous suggérons que ces résultats méritent d'être mentionnés compte tenu de l'absence de travaux de neuro-imagerie sur cette question et quand on sait le rôle que cette région pariétale, notamment l'IPS, serait susceptible de jouer dans le traitement « fondamental » des quantités (voir section 1.4.2 du chapitre 2).

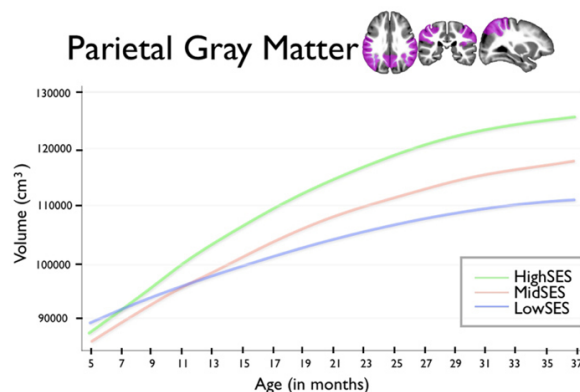


Figure 24 : Figure tirée de Hanson et al. (2013) illustrant le volume de matière grise du lobe pariétal (en ordonnée) en fonction de l'âge des enfants étudiés (de 5 à 37 mois, en abscisse). Chaque ligne représente un groupe socio-économique différent : la ligne bleue représente les foyers les plus défavorisés ; la ligne rouge représente les foyers de statut socio-économique moyen ; la ligne verte représente les foyers les plus favorisés. $N=77$

3.2.2. SES et scores aux tâches susceptibles de mêler systèmes symboliques et non symboliques

Les résultats de quatre autres études méritent d'être présentés ici pour leur lien avec l'évaluation du système non symbolique (N. C. Jordan et al., 2006; Mutaf-Yıldız et al., 2018a;

Siegler & Ramani, 2008; Susperreguy, Burr, et al., 2020). Les tâches utilisées dans ces quatre études, tâche de placement de symbole sur une ligne numérique et tâche d'estimation approximative des quantités, nécessitent néanmoins d'être discutées. Nous proposons pour cela de les replacer dans le cadre spécifique qui postule des influences développementales réciproques entre système non symbolique et système symbolique (postulat théorique développé dans section 1.4.3 du chapitre 2).

Tout d'abord, Jordan et collaborateurs (2006) ont montré que, chez des enfants scolarisés en grande section, il existait un lien entre SES familial et compétences d'approximation des quantités non symboliques. Il faut néanmoins préciser que si cette tâche était présentée dans un format non symbolique (ensemble de points), la réponse attendue était quant à elle symbolique. Les auteurs ont spécifié cependant le caractère « approximatif » de cette réponse symbolique attendue, ainsi il était précisé que les réponses étaient considérées comme correctes si l'estimation fournie était comprise dans un intervalle de 25% de la réponse exacte. Par exemple, « 3 » était la seule réponse acceptée pour un stimulus comportant 3 points, alors que tout nombre compris entre « 19 » et « 31 » était considéré comme une réponse correcte à un stimulus présentant une quantité de 25 points. Cette tâche supposait donc la connaissance du code symbolique (notamment la maîtrise de la chaîne numérique verbale), mais évaluait la compétence d'approximation, inhérente au système non symbolique.

Trois autres études (Mutaf-Yıldız et al., 2018a; Siegler & Ramani, 2008; Susperreguy, Burr, et al., 2020) ont utilisé une tâche de ligne numérique symbolique qui permet d'évaluer la précision de l'enfant dans sa représentation mentale (spatiale) des quantités symboliques (voir section 1.4.2 du chapitre 2). Les résultats étaient inconsistants entre les trois études : Siegler et Ramani (2008) ont montré une relation entre SES et degré de précision (linéarité) des enfants de 4.5 ans sur une ligne de 0 à 10, tandis que Mutaf-Yıldız et collaborateurs (2018a) ainsi que Susperreguy et collaborateurs (2020), sur une tâche pourtant identique, ont au contraire obtenu des résultats en faveur d'une absence de relation entre SES et précision des enfants à 5 ans.

Sur le postulat d'existence d'interactions réciproques au cours du développement entre système non symbolique et système symbolique (voir section 1.3 du chapitre 2), il paraît compliqué de démêler si la relation (ou l'absence de relation) pour ces trois dernières études, entre compétences mesurées et SES familial, serait davantage du fait d'un système numérique en particulier. À ce propos, il paraît également important de noter l'âge des participants pour deux des études ayant utilisé des tâches strictement non symboliques et ayant montré des résultats en faveur d'une relation entre SES et système non symbolique (Bernabini et al., 2021; Valle-Lisboa et al., 2016). En effet, ces enfants étaient plus âgés que dans la majorité des autres études présentées dans cette section (9,7 ans en moyenne pour l'étude Bernabini et al. et 7,3 ans en moyenne pour l'étude de Valle-Lisboa et al.). Il est donc tout à fait possible que la mesure de la plus grande précision du système non symbolique mesurée chez les enfants les plus favorisés puisse en réalité résulter de leurs meilleures compétences symboliques. Les deux autres études à avoir présenté des liens entre compétences non symboliques et SES avaient toutefois évalué des enfants plus jeunes (5 à 6 ans ; Skwarchuk et al., 2014; Thomas et al., 2021).

Pour tester la relation comportementale entre SES et système non symbolique de façon isolée de toutes influences développementales avec l'acquisition du système symbolique, il faudrait pouvoir tester les enfants avant toute acquisition du système symbolique du nombre. Cependant à notre connaissance aucune étude n'a visé à étudier la relation entre SES et précision du système non symbolique des quantités chez les tout-petits, avant l'acquisition des codes symboliques. Il est par ailleurs possible que les relations avec le statut socio-économique familial ne s'expriment pas à un âge si précoce. Rappelons néanmoins que dès le plus jeune âge certaines disparités interindividuelles dans la précision du système non symbolique pourraient être mises en évidence (Libertus & Brannon, 2009; Libertus et al., 2011; Mazzocco et al., 2011; voir section 1.1.2 du chapitre 2). De plus, l'étude du peuple de Mundurucus (ce peuple Amazonien alors sans véritable système symbolique des quantités) avait permis de préciser le rôle des expériences culturelles et éducatives dans le développement de l'acuité non symbolique (Dehaene et al., 2008; Piazza et al., 2013; Pica et al., 2004; voir section 1.1.2 du chapitre 2).

De façon générale, les résultats concernant les liens entre systèmes non symboliques et SES sont trop peu nombreux et hétérogènes pour permettre des conclusions. Sur la base de ces travaux, il paraît cependant pertinent de s'interroger sur l'existence d'un possible lien entre SES et système non symbolique. Pourrait aussi être questionné le modèle suggéré par Jordan et Levine (2009) qui supposait une absence de disparités socio-économiques au sein des compétences numériques « non verbales ».

3.2.3. SES et scores à des tâches numériques portant uniquement sur les petites quantités

Concernant cette possible remise en question du modèle de Jordan et Levine (2009), il est intéressant de détailler deux études qui ont utilisé les scores des enfants à des tâches originales pour tester leur lien avec les caractéristiques socio-économiques familiales. Dans une première étude, Marti et collaborateurs (2016) ont testé des enfants de 3,5 ans sur cinq tâches visant à évaluer leurs habiletés numériques, mais qui portaient toutes uniquement sur la valeur « 3 ». La première tâche faisait strictement appel au système symbolique (« réciter la série de nombres jusqu'à 3 »). Les deux suivantes (« exprimer son âge » et « exprimer la quantité présentée sur la face d'un dé ») pouvaient être résolues par l'enfant en utilisant, au choix, le mot-nombre (« trois ») ou leurs doigts pour montrer la quantité (en dressant « trois doigts »). Enfin, les deux dernières tâches impliquaient un plateau de jeu et demandaient à l'enfant de manipuler ou apparier des quantités analogiques (correspondant à « 3 »). Plus spécifiquement, la tâche « utilisation » demandait à l'enfant d'avancer un pion du nombre de cases correspondant à la quantité analogique indiquée sur la face du dé (« 3 cases »); la tâche « sélection » correspondait en quelque sorte à la situation inverse : l'enfant devait choisir la face du dé correspondant aux nombres de cases séparant son pion du point d'arrivée (face du dé avec « 3 points »). De façon globale, les résultats ont mis en évidence des performances très variables selon les tâches (l'expression de quantités de façon verbale étant mieux réussie alors que les manipulations analogiques étaient plus échouées). L'analyse des résultats en fonction du niveau socio-économique familial a montré des disparités de performance pour chacune des tâches (à l'exception de la tâche « sélection » qui était échouée par l'ensemble des enfants). Ces

différences de résultat selon le milieu socio-économique familial pourraient s'expliquer par des différences au niveau du système d'individuation parallèle des quantités (ou *subitizing*, voir section 1.1.1 du chapitre 2), mais aussi par des différences au niveau du dénombrement et de la maîtrise du principe de cardinalité.

Dans une deuxième étude, le même groupe de chercheurs a étudié des enfants âgés de 33 à 47 mois à l'aide de tâches impliquant également des manipulations sur un jeu de plateau, mais cette fois-ci pour des quantités allant de 1 à 5 exclusivement (Scheuer, Martí, Cavalcante, & Brizuela, 2019). Les enfants étaient évalués sur trois tâches différentes : une de quantification (indiquer la quantité de points inscrits sur différentes faces d'un dé, de 1 à 5) et deux de manipulation et appariement de quantités analogiques (« de la quantité analogique du dé au nombre de cases à parcourir sur le plateau », avancer un jeton sur plusieurs cases en fonction de la quantité indiquée sur le dé et « du nombre de cases à parcourir sur le plateau à la quantité sur le dé », choisir la face du dé correspondant au nombre de cases à parcourir sur le plateau pour atteindre un point d'arrivée). Pour l'ensemble des enfants, les résultats ont montré que la tâche de quantification (exprimer la quantité sous format symbolique) était plus réussie que celles portant sur la manipulation de quantités analogiques non symboliques. Bien que pouvant sembler contradictoires avec la littérature existante (d'un point de vue développemental, la compréhension symbolique succéderait à la compréhension non symbolique « innée », voir chapitre 2), les auteurs ont expliqué ces résultats par la plus grande complexité exécutive des tâches analogiques (supposant de maintenir en mémoire les informations contenues sur le dé, pour ensuite avancer du nombre de cases correspondant ou inversement). Par ailleurs, les résultats montraient un lien entre SES et performance à chacune des tâches. De plus, seuls les enfants issus des milieux les plus favorisés réussissaient les tâches impliquant les plus grandes quantités (4 et 5). Scheuer et collaborateurs (2019) ont suggéré que cette discontinuité des résultats pourrait s'expliquer par la différenciation du traitement des quantités analogiques inférieures ou supérieures à 4 (en raison du phénomène d'individuation parallèle des quantités versus leur traitement approximatif, voir section 1.1.1 du chapitre 2). De façon générale, ces deux études pourraient aussi étayer l'hypothèse d'une possible relation entre caractéristiques socio-économiques familiales et système non symbolique des quantités.

3.2.4. *Hétérogénéité des résultats symboliques ou arithmétiques*

Enfin pour conclure, il faut également noter l'existence de résultats hétérogènes concernant les liens entre SES et habiletés symboliques ou arithmétiques. Ainsi des résultats en faveur d'une absence de disparités socio-économiques entre les enfants ont parfois été obtenus pour les habiletés suivantes : la maîtrise de la chaîne numérique verbale ou du dénombrement terme à terme (Thomas et al., 2021), la maîtrise du principe de cardinalité (Mutaf-Yıldız et al., 2018a), la comparaison symbolique (Bernabini et al., 2021), ou l'arithmétique sans support visuel, (Starkey et al., 2004).

À l'inverse, les données de l'étude de Skwarchuk (2004) ont suggéré l'existence de disparités socio-économiques sur une tâche d'arithmétique non symbolique, pourtant équivalente à celle de Jordan et collaborateurs (1992, 1994).

Souligner une telle hétérogénéité des résultats nous semble important. Non pas pour remettre en question l'influence quasi indéniable des aspects verbaux dans les disparités socio-économiques des habiletés numériques, mais plutôt pour suggérer qu'il pourrait être également pertinent de prendre en considération certaines caractéristiques propres au domaine de la cognition numérique pour comprendre de façon plus large le phénomène d'inégalités de réussite en mathématiques.

4. Caractéristiques « proximales » du SES et conclusion

En résumé, un grand nombre de recherches, présentées tout au long de ce chapitre, ont permis de révéler des relations entre SES et aspects neurocognitifs du développement de l'enfant, évalués à l'aide de scores comportementaux ou de mesures cérébrales (structure ou activité). Ces associations ont majoritairement été mises en évidence et explorées dans les domaines cognitifs du langage et des fonctions exécutives. Certaines études ont indiqué que les disparités socio-économiques dans ces domaines langagiers et exécutifs pourraient expliquer, au moins en partie, le phénomène d'inégalités de réussite en mathématiques des enfants selon leur milieu socio-économique familial (décrit dans le chapitre 1). Cependant, malgré la susceptibilité de certains domaines cognitifs au gradient socio-économique, il importe de souligner qu'il serait prématuré de tirer de grandes généralisations sur une « signature cérébrale » de la pauvreté (Farah, 2017, 2018; Olson et al., 2021).

De plus, les études rapportées tout au long de ce chapitre étaient corrélationnelles et consistaient donc à mettre en relation (de façon simultanée ou longitudinale) les mesures SES familiales avec celles neurocognitives des enfants. Elles ne permettent donc pas de tirer des conclusions sur le plan de la causalité. Duncan et collaborateurs (2011), dans un article de revue, ont répertorié certaines études visant à évaluer les conséquences sur le développement des enfants de la survenue de circonstances exceptionnelles où des familles défavorisées bénéficiaient d'une augmentation de leurs revenus. De telles études ont suggéré un effet causal du niveau de revenu sur les compétences scolaires des enfants (en montrant leur amélioration chez les enfants vivant dans des familles ayant vu leurs revenus augmenter, comparativement à des enfants issus d'autres familles aux caractéristiques socio-économiques initiales similaires, mais n'ayant pas bénéficié pas d'une telle augmentation de revenus). À ce titre, soulignons le récent lancement d'un programme longitudinal d'intervention visant à étudier les potentiels effets causaux (via un protocole rigoureux randomisé) d'une augmentation des revenus familiaux pendant la petite enfance sur le développement neurocognitif des enfants au sein des classes sociales les plus défavorisées (Noble, 2017; Noble & Giebler, 2020).

Néanmoins, que la relation entre SES et développement neurocognitif soit corrélationnelle ou causale, cela n'informe pas sur les mécanismes permettant de comprendre comment surviennent de telles variations neurocognitives chez les enfants. Sans remettre en question la significativité de ce lien, il paraît nécessaire de préciser que plusieurs études ont néanmoins mesuré des disparités des mesures neurocognitives chez des enfants vivant pourtant

au sein d'un même milieu socio-économique. L'analyse réalisée par Noble et collaborateurs (2015) à partir des données de 1000 enfants et jeunes adultes (cohorte PING) peut nous servir d'illustration à ce titre : en dépit d'une relation significative entre surface corticale et SES, les auteurs avaient également rapporté l'existence d'une variabilité des mesures de structure cérébrale à tous les niveaux du SES, y compris chez les enfants les plus défavorisés (voir **Figure 25**, tirée de Noble, Houston, et al., 2015).

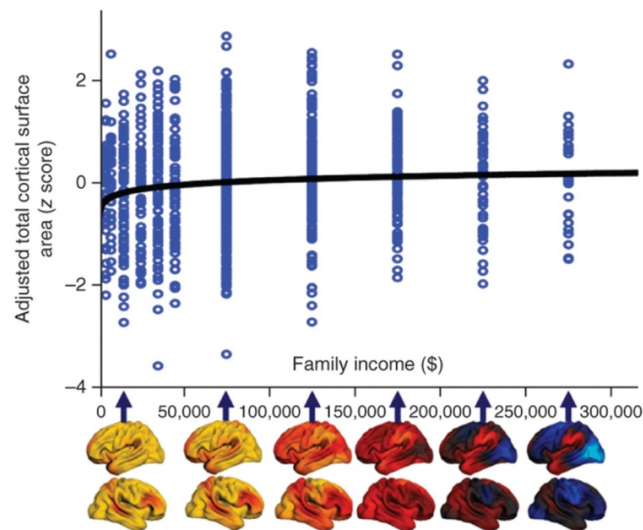


Figure 25 : Figure tirée de Noble et al. (2015) représentant la relation logarithmique entre niveau de revenu de la famille (en abscisse) et surface corticale totale des enfants (en z-scores) (gradient le plus marqué à l'extrémité basse des revenus). Malgré la relation significative, cette figure illustre également le phénomène important de variabilité de la structure cérébrale à tous les niveaux de revenu. Pour visualisation de la relation logarithmique, le taux de changement différentiel de la surface corticale peut être visualisé à l'aide des cartes corticales présentées en abscisse : les couleurs chaudes représentent les zones de changements de la surface corticale par unité de revenu les plus marqués ; les couleurs froides représentent les changements de surface corticale par unité de revenu les moins marqués. $N=1099$

La compréhension de ce « bruit » autour de la relation entre SES et développement cognitif pourrait gagner en compréhension grâce à l'identification des mécanismes intermédiaires liant les deux mesures. Les mesures conventionnelles du statut socio-économique (revenu, niveau de diplôme ou statut occupationnel) sont des facteurs distaux de l'environnement familial de l'enfant et pourraient exercer leurs effets sur le développement neurocognitif de l'enfant par le biais de facteurs plus proximaux. L'identification et la mesure de caractéristiques plus proximales de l'environnement familial de l'enfant pourraient participer à la compréhension du développement de ce dernier (voir **Figure 26** ; tirée de Farah, 2017).

Statistiquement, il a été établi que les enfants issus des milieux les plus défavorisés étaient susceptibles d'être confrontés à des expériences de vie très différentes de celles de leurs pairs plus favorisés, et cela notamment dans les domaines en lien avec la santé (p. ex. accès aux soins, nutrition, exposition aux toxines, activité physique ou sommeil ; Gilgoff, Singh, Koita,

Gentile, & Marques, 2020; Immordino-Yang, Darling-Hammond, & Krone, 2019; Johnson et al., 2016), en lien avec les stimulations ou l'attention parentales ou encore en lien avec le stress (pour revue de ces expériences, voir G. W. Evans, 2004).

Plusieurs travaux (majoritairement observationnels) ont suggéré que ces différentes expériences de vie pourraient agir comme des facteurs proximaux des disparités socio-économiques développementales (pour revues, voir Bradley & Corwyn, 2002; Farah, 2017). Dans leur article de 2007, Noble et collaborateurs précisait déjà que « la caractérisation des associations entre le SES et les différents systèmes neurocognitifs n'est pas une fin en soi, mais plutôt une étape intermédiaire vers des objectifs à plus long terme, notamment une compréhension plus mécaniste de la relation entre le SES et le développement neurocognitif » (Noble et al., 2007).

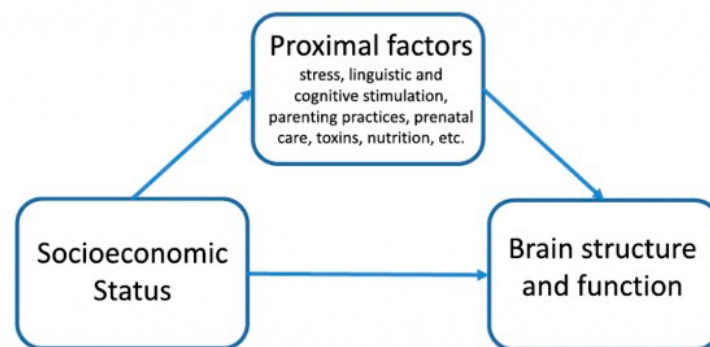


Figure 26 : Figure tirée de Farah (2017) proposant une représentation schématique de la médiation potentielle de la relation entre SES et disparités cérébrales (structurelles et fonctionnelles) par des facteurs proximaux associés avec le SES (comme le stress, les stimulations cognitives ou linguistiques, les pratiques parentales, les expériences prénatales, l'exposition aux toxines ou la nutrition).

En préambule des travaux réalisés chez l'humain, il peut être pertinent d'évoquer brièvement certaines études chez les animaux qui ont permis d'évaluer les effets comportementaux et cérébraux de certaines de ces expériences proximales, de façon causale et contrôlée (en réalisant des manipulations visant à isoler et tester l'effet de chacune de ces expériences proximales, séparément les unes des autres). Ces travaux ont notamment permis de souligner les conséquences importantes des expériences proximales du stress (Frodl & O'Keane, 2013; McEwen & Gianaros, 2010) et des stimulations cognitives (Kozorovitskiy et al., 2005; van Praag, Kempermann, & Gage, 2000) sur les caractéristiques comportementales et cérébrales des animaux. Si ces travaux ont participé à mettre l'accent sur ces deux expériences proximales spécifiques, la transposition de leurs conclusions à l'étude du développement humain reste cependant très limitée ; en particulier puisque les facteurs proximaux en question ont, chez l'humain, une composante sociale et culturelle importante. Dit autrement, il n'est pas possible d'associer un stress induit expérimentalement chez l'animal à celui vécu chez un humain face à des difficultés économiques ou d'associer des stimulations cognitives chez l'animal à celles vécues par les enfants au sein de leur famille (la transposition

est bien sûr d'autant plus limitée que les animaux sont dépourvus de caractéristiques socio-économiques ; Farah, 2017; Hackman, Farah, & Meaney, 2010).

Précisons que le facteur de stress fait l'objet d'un large champ d'études qui a permis de mesurer son impact sur le développement neurocognitif (Conger & Donnellan, 2007; Decker et al., 2020; Luby et al., 2013; McEwen, 2000). Néanmoins le chapitre suivant sera dédié de façon exclusive aux études portant sur les expériences d'apprentissage de l'enfant au sein de l'environnement familial, c'est-à-dire aux facteurs proximaux susceptibles d'être le plus directement en lien avec l'apprentissage chez l'enfant (autrement dit, des expériences les plus « domaines spécifiques » des apprentissages).

Chapitre 4 : Environnement familial d'apprentissage en numératie et compétences numériques de l'enfant

Dans le chapitre précédent, nous avons détaillé les résultats d'études permettant d'identifier les potentiels corrélats neurocognitifs des disparités socio-économiques chez l'enfant, notamment dans le domaine des mathématiques. Nous proposons à présent de déplacer la focale d'intérêt en présentant les études ayant cherché à identifier un certain type de mécanismes proximaux susceptibles d'expliquer ces disparités : ceux en lien avec l'environnement familial d'apprentissage en numératie.

Pour cela, dans un premier temps nous ferons l'exposé d'un historique des études ayant cherché à caractériser l'environnement familial d'apprentissage, d'abord dans sa définition la plus large puis dans sa première version dédiée à un domaine d'apprentissage spécifique : celui de la littératie. À ce titre, nous présenterons une synthèse des travaux portant sur l'étude des caractéristiques de l'environnement familial d'apprentissage en littératie, précurseurs des travaux dédiés à l'environnement familial en numératie. Nous exposerons également comment les expériences proximales de l'environnement familial pourraient ne pas être qu'un médiateur des effets distaux du SES, mais plutôt représenter un objet d'étude à part entière pour la compréhension du développement de l'enfant.

De façon plus générale, ce chapitre sera ensuite dédié aux études ayant cherché à définir et approfondir la compréhension des mécanismes de l'environnement familial d'apprentissage en numératie. Le modèle du « *Home Numeracy Environment* » sera d'abord présenté à travers la question de la mesure des stimulations susceptibles d'être vécues par les enfants au sein de leur famille (stimulations explorées par le type et la fréquence des activités familiales réalisées, mais également par certaines caractéristiques du langage en lien avec les mathématiques). Ce modèle sera ensuite complété par la prise en compte de diverses caractéristiques parentales. Enfin, étant donnée la grande hétérogénéité des résultats dans ce domaine de recherche une attention spécifique sera portée aux problématiques des modèles statistiques utilisés, à l'usage de diverses co-variables et à la temporalité des relations explorées, voire de leur causalité. Enfin, certaines limites des résultats actuels seront discutées.

1. La notion d'« environnement familial d'apprentissage »

Le concept d'« environnement familial d'apprentissage » (ou « Home Learning Environment ») offre un cadre d'analyse des facteurs familiaux susceptibles d'influencer, de façon plus ou moins directe, le développement des compétences cognitives chez l'enfant. En somme, les premières caractéristiques étudiées au sein de l'environnement familial d'apprentissage concernent avant tout la mesure des activités réalisées à domicile ou encore les questions d'accès au matériel d'apprentissage. Ces caractéristiques d'apprentissage familial sont à distinguer des caractéristiques d'implication des parents dans la scolarité de leur enfant (c.-à-d. l'aide portée aux devoirs à la maison demandés par l'école, ou encore l'implication au sein du milieu scolaire).

1.1. L'échelle « Home Observation Measure of the Environment », une première mesure permettant une mesure globale de l'environnement familial

Le premier instrument permettant de caractériser l'environnement familial a été élaboré dès le début des années 1980 : l'échelle Home Observation Measure of the Environment (HOME) développée par Bradley et Caldwell (Bradley & Caldwell, 1984a; Caldwell & Bradley, 1979) ; quatre versions différentes existent selon l'âge des enfants et une version abrégée a aussi été créée (la Home Observation for Measurement of the Environment-Short Form ; HOME-SF; Mott, 2004). Il existe également une version francophone (Palacio-Quintin & Lavoie, 1986; Tazouti, Prévot, & Constant, 2009). Cette échelle est prévue pour être administrée via un entretien structuré d'une heure et comprend également des observations au sein du domicile familial ; elle comporte 55 items en tout. Son objectif principal est de mesurer plusieurs aspects spécifiques de la vie de l'enfant au sein de sa famille (via différents sous-scores). Chaque sous-score composite comporte environ 5 items avec des réponses binaires (« oui » / « non » ; pour le détail des mesures, voir Bradley, Corwyn, McAdoo, & Coll, 2001; Totsika & Sylva, 2004) ; il existe notamment un sous-score dédié aux stimulations cognitives (évaluant à la fois la disponibilité de certains matériels « stimulants » et les interactions entre parents et enfant). Ce sous-score de « stimulations cognitives » comporte cependant peu d'items et ces derniers sont très spécifiques. Par exemple à 4 ans, l'ensemble des items sont : « l'enfant a des jouets qui lui apprennent la couleur », « au moins 10 livres sont visibles dans l'appartement », « l'enfant a des jouets qui l'aident à apprendre le nom des animaux », « l'enfant a un instrument de musique réel ou jouet » ; ou à 8 ans l'ensemble des items sont : « aller avec un membre de sa famille dans un musée scientifique, historique ou d'art au cours de l'année écoulée », « l'enfant a librement accès à au moins dix livres appropriés », « la famille possède une télévision, mais celle-ci n'est pas tout le temps allumée ». L'échelle HOME comprend également des sous-scores dédiés à la caractérisation des échanges entre parent et enfant (« *nurturance parentale* », couvrant des caractéristiques émotionnelles, mais aussi certains aspects liés à la « discipline ») ou à la mesure de certains aspects physiques de l'environnement (visant à évaluer notamment la propreté et l'organisation du foyer). L'échelle HOME a fait office de référence pendant plusieurs décennies (pour un état des lieux sur l'usage de cette

mesure il y a 15 ans, voir Bradley & Corwyn, 2006) et a permis d'établir des relations entre les scores à la batterie de tests et les caractéristiques socio-économiques des foyers évalués (Bradley et al., 2001; NICHD ECCRN, 1997, 2002). L'échelle HOME a aussi permis de mettre en évidence l'existence de relation entre différents sous-scores et performances cognitives des enfants avant l'entrée à l'école primaire (Bradley & Caldwell, 1980, 1984b; Bradley, Caldwell, Rock, Hamrick, & Harris, 1988; Elardo, Bradley, & Caldwell, 1977).

Cette mesure présente l'avantage d'avoir été incorporée aux protocoles expérimentaux d'un grand nombre de cohortes qui ont cherché à mesurer conjointement l'effet du SES et de mesures plus proximales de l'environnement familial sur le développement des enfants (comme les cohortes NICHD, Panel Study of Income Dynamics ou ECLS-K). La cohorte NICHD, déjà évoquée dans les chapitres 1 et 3, a ainsi mis en évidence de nombreuses relations entre les scores cognitifs des enfants à différents âges et les mesures obtenues grâce à l'échelle HOME (NICHD ECCRN, 2000, 2001, 2002; NICHD ECCRN & Duncan, 2003). La cohorte Panel Study of Income Dynamics avait permis de montrer l'existence d'un lien entre SES familial et la réussite en mathématiques de 753 enfants américains de 3 à 5 ans (rapporté dans le chapitre 1). Au sein de cette cohorte, Yeung et collaborateurs (2002) ont mis en évidence que les scores obtenus à certains items de l'échelle HOME (plus spécifiquement les sous-scores de stimulations cognitives) permettaient d'expliquer, en grande partie, les disparités socio-économiques dans la réussite des enfants. L'analyse des données de la cohorte ECLS-K (mentionnée dans le chapitre 1) a aussi permis de montrer que ce même sous-score HOME participait également à une partie de la variance entre SES et réussite académique des enfants à 6 ans (L. Elliott & Bachman, 2018b). Enfin, les données obtenues au sein d'une cohorte turque (Early Childhood Developmental Ecologies in Turkey) ont également permis d'indiquer que ce même sous-score HOME, évalué de façon précoce (lorsque les enfants étaient âgés de 3, 4 et 5 ans), était en lien avec les compétences en mathématiques ultérieures de ces enfants (à 7 ans, Özkan & Baydar, 2021).

Dilworth-Bart (2012), à partir de données obtenues auprès de familles d'enfants américains de 5 ans, a cherché à identifier plusieurs facteurs susceptibles d'améliorer la compréhension des différences socio-économiques dans la réussite en mathématiques. Cette étude, déjà citée dans le chapitre 3 section 2.1 pour avoir suggéré un rôle médiateur des compétences exécutives, a montré que le score à l'échelle HOME pouvait également expliquer une partie des disparités socio-économiques dans la réussite en mathématiques des enfants. Des résultats similaires ont été obtenus en utilisant certains sous-scores de l'échelle HOME administrés au sein d'une centaine de familles américaines (Lurie et al., 2021; Rosen et al., 2020).

Une étude récente suggère enfin que les scores à l'échelle HOME pourraient être également associés à des différences cérébrales chez l'enfant. À partir de mesures d'imagerie structurelle réalisées (53 enfants de 6 à 19 ans), Rosen et collaborateurs (2018) ont montré que les enfants qui présentaient le plus d'épaisseur du cortex cérébral au sein d'un réseau fronto-pariétal gauche (gyrus frontal moyen, lobule pariétal supérieur et IPS) étaient ceux doté d'un score plus élevé de stimulations cognitives familiales (sous-score HOME). Rosen et collaborateurs (2018) ont proposé que les stimulations cognitives parentales aient pu servir de médiateur à la relation entre SES et épaisseur corticale dans ce réseau fronto-pariétal gauche.

1.2. Décomposer les indicateurs de l'environnement familial : objectiver les caractéristiques susceptibles de soutenir le développement cognitif

1.2.1. Décomposition des sous-scores HOME

À grande échelle et à travers de nombreuses études, l'outil HOME a permis de fournir des éléments de preuves tangibles de l'importance des caractéristiques familiales proximales sur le développement cognitif des enfants. La plupart des données obtenues ont convergé à souligner la pertinence des sous-dimensions de cette échelle (notamment celle du sous-score de stimulations cognitives), plutôt que le seul score composite total. Par exemple, une étude précédemment mentionnée de Yeung et collaborateurs (2002) avait également étudié la relation entre l'échelle HOME et un score de problèmes comportementaux chez l'enfant (Behavior Problem Index). Cette étude avait conduit à mettre en évidence une dissociation entre deux sous-scores de l'échelle HOME (« stimulations d'apprentissage » et « réceptivité maternelle ») dans leur lien, soit avec le score cognitif de réussite mathématique (pour le premier), soit avec le score de problèmes comportementaux chez l'enfant (pour le second ; Yeung et al., 2002). Des analyses des données de la cohorte NICHD ont également renforcé la pertinence d'une telle décomposition des sous-scores de l'échelle HOME pour permettre de rendre compte des différences cognitives chez l'enfant (NICHD ECCRN, 2006).

Dans le contexte des travaux menés par l'équipe de Farah et Noble (à travers l'administration de larges batteries cognitives, voir chapitre 3 section 1.1), certains sous-scores de l'échelle HOME ont parfois été intégrés. Farah et collaborateurs (2008) ont ainsi montré une double dissociation chez des enfants américains de 12 ans entre sous-scores de l'échelle HOME (« réceptivité maternelle » et « stimulation cognitive ») et différents domaines cognitifs (mémoire pour le premier sous-score ; et langage pour le second).

De par son caractère historique et son intégration dans plusieurs cohortes longitudinales, l'échelle HOME est un outil important pour appréhender l'environnement familial de façon plus « proximale ». Néanmoins cet outil présente également plusieurs limites (voir Bradley & Corwyn, 2006, pour une discussion sur l'amplitude restreinte des mesures de stimulations cognitives possibles avec l'échelle HOME). En raison de leur faible nombre d'items et de leur grand degré de spécificité, les sous-scores HOME pourraient être insuffisants pour rendre compte de la variabilité des expériences d'apprentissage proximales de l'enfant dans sa famille (Siegel, 1982; Stevens & Bakeman, 1985).

1.2.2. Mesures des activités d'apprentissage plus nombreuses et variées

Étant donné la pertinence du sous-score HOME dédié aux stimulations cognitives, d'autres mesures ont été créées pour évaluer les activités familiales susceptibles de stimuler cognitivement les enfants, à partir d'items moins spécifiques, plus variés et plus nombreux. Il a aussi été proposé d'abandonner les scores binaires (réponse « oui »/ « non ») pour des mesures plus « nuancées » de la fréquence de réalisation des différentes activités.

À travers les données de la cohorte anglaise EPPE (mentionnée section 2.3 chapitre 1), Melhuish et collaborateurs (2008) avaient identifié le rôle important des caractéristiques socio-

économiques du foyer dans l'explication de la variance de réussite en mathématiques des enfants à 10 ans. Leurs analyses les avaient conduits à identifier également un facteur qualifié « d'environnement familial d'apprentissage » (voir **Figure 4** dans le chapitre 1 ; tirée de Melhuish et al., 2008). Cette mesure correspondait aux fréquences déclarées pour 14 activités différentes (7 activités qualifiées de « sociales » ou « routinières » : jeux avec les amis, visites aux parents/amis, courses, télévision, repas en famille, régularité des horaires du coucher ; et 7 activités offrant des « possibilités d'apprentissage » : activités de lecture, visites à la bibliothèque, jeux avec des chiffres, peinture et dessin, apprentissage des lettres, apprentissage des chiffres, chansons/poèmes/rythmes).

Un an et demi avant l'entrée à l'école de 920 enfants, la cohorte allemande School-ready child¹ a également proposé la mesure d'un tel score d'environnement familial d'apprentissage (fréquence de 11 activités, ainsi que mesure du nombre de livres possédés au domicile). À partir de batteries de mesures des habiletés numériques appropriées aux différents âges, étaient également évalués les scores en mathématiques des enfants de façon concurrente (soit 18 mois avant l'entrée à l'école), en début de CP et fin de CP, ainsi qu'en CM1 (équivalent à la dernière année d'école élémentaire dans le système allemand). Les analyses de Niklas et Schneider (2017) ont montré que les mesures d'environnement familial d'apprentissage précoce étaient liées aux compétences mathématiques aux différents âges, et ce même après prise en compte de leurs niveaux de compétences mathématiques précoces.

Des mesures d'activités familiales d'apprentissage, adaptées et enrichies à partir de l'échelle de stimulation HOME ont également été administrées au sein de la cohorte ECLS-K. Ces données ont permis à Galindo et Sonnenschein (2015) de montrer que ces activités familiales d'apprentissage pourraient expliquer les disparités socio-économiques dans la réussite mathématique des enfants. Ils avaient ainsi souligné la nécessaire dissociation des scores de l'environnement familial ; comme le fait de distinguer les activités d'apprentissage rapportées par les parents de leurs croyances sur l'apprentissage de leurs enfants. De façon générale, le calcul d'un score global pour l'environnement familial d'apprentissage pourrait masquer des différences spécifiques à certains domaines (domaines d'activités ou différences entre croyances et activités). Pourtant, au sein de l'environnement familial d'apprentissage, l'identification d'indicateurs spécifiques susceptibles d'être en lien avec les compétences mathématiques des enfants pourrait permettre d'élaborer autant de cibles potentielles d'enrichissement (Galindo & Sonnenschein, 2015).

¹ Cohorte aussi appelée « The school-prepared child » dans certains articles (p. ex. Niklas & Schneider, 2014).

2. Un précurseur de l'environnement familial d'apprentissage en numératie : l'environnement familial d'apprentissage en littératie

Les premières formalisations théoriques proposant un cadre d'étude et de compréhension spécifique de l'environnement familial d'apprentissage ont porté sur le domaine spécifique de la littératie. Dans cette section sera dressée une brève revue des travaux ayant permis la création du socle théorique aux travaux ultérieurs portant sur l'environnement familial d'apprentissage en numératie (présentés dans la section suivante)¹. Seront également présentés des travaux de neuro-imagerie ayant enrichi la compréhension des mécanismes de l'environnement familial d'apprentissage en littératie.

2.1. Un modèle d'identification des activités familiales en lien avec la littératie et de leurs relations avec les compétences langagières chez l'enfant

Le modèle de l'environnement familial d'apprentissage en littératie (ou « *Home Literacy Environment* ») a permis de proposer un premier cadre de compréhension, et de mesure, des caractéristiques de l'environnement familial susceptibles de contribuer au développement des compétences en langage de l'enfant. Formalisé pour la première fois par Sénéchal (2006b, voir **Figure 27**), ce modèle a permis de distinguer deux types d'activités impliquant le langage : celles *informelles* et celles *formelles*. Les activités de littératie dites « informelles » exposeraient l'enfant au langage écrit (ou oral) de manière fortuite et seraient ainsi susceptibles d'entraîner un apprentissage incident au cours d'activités de la vie quotidienne, notamment lors de lectures partagées. Les activités de littératie dites « formelles » impliqueraient une activité d'enseignement explicite de la part des parents. Ces activités formelles, par ailleurs, supposeraient un but davantage conscient et explicite de transmission ou d'enseignement de la part des parents en demandant à leur enfant un effort conscient sur certains aspects du langage.

Ces différentes activités pourraient être liées à différentes compétences langagières de l'enfant. Les activités formelles seraient en lien avec les connaissances du langage écrit tandis que les activités informelles favoriseraient avant tout les aspects sémantiques du langage (Bus, IJzendoorn, & Pellegrini, 2016; Fletcher & Reese, 2005; Sénéchal, 2015; Sénéchal & LeFevre, 2002; Sénéchal, LeFevre, Thomas, & Daley, 1998; Skwarchuk et al., 2014). De façon générale, l'ensemble des activités familiales de littératie pourraient être liées aux compétences de lecture chez l'enfant (Levy, Gong, Hessels, Evans, & Jared, 2006; Molfese, Modglin, & Molfese, 2016; Sénéchal, 2006b; Sénéchal & LeFevre, 2014; Sénéchal & Young, 2008).

Pour évaluer la fréquence de réalisation de ces différentes activités de littératie, le modèle proposé par Sénéchal est basé sur l'usage d'un questionnaire permettant aux parents de

¹ Une présentation plus complète des études portant sur l'environnement familial de littératie est proposée en **annexe 3**.

rapporter la fréquence de réalisation de diverses activités familiales de littératie (Sénéchal, 2006b; Sénéchal & LeFevre, 2002, 2014). La mesure des activités « informelles » a parfois été complétée par des mesures sur le nombre de livres disponibles au sein du foyer (Sénéchal, 2006b; Sénéchal & LeFevre, 2002, 2014) ou sur la familiarité des parents avec la littérature enfantine (c.-à-d. parmi une liste de titres de littérature enfantine, certains fictifs et d'autres réels, les parents devaient indiquer ceux qui leur étaient familiers ; Dilnot, Hamilton, Maughan, & Snowling, 2017; M. A. Evans, Shaw, & Bell, 2000; Farver, Xu, Eppe, & Lonigan, 2006; Foy & Mann, 2003; Hamilton, Hayiou-Thomas, Hulme, & Snowling, 2016; Hood, Conlon, & Andrews, 2008; Sénéchal & LeFevre, 2002; Sénéchal, LeFevre, Hudson, & Lawson, 1996; Sénéchal et al., 1998).

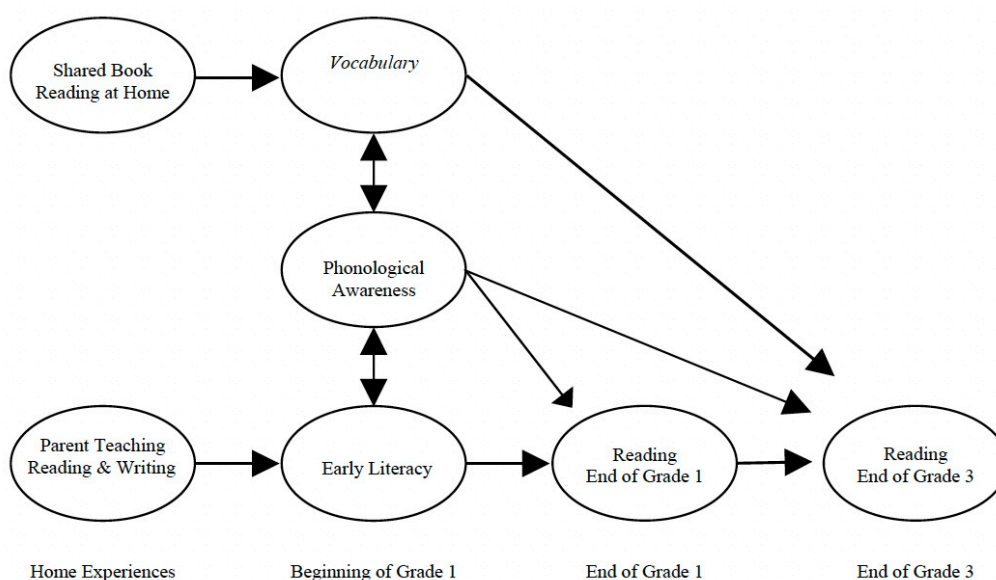


Figure 27 : Figure tirée de Sénéchal (2006a) illustrant les relations entre les différentes expériences familiales de littératie et les compétences langagières (d'après les résultats obtenus dans l'étude de Sénéchal & LeFevre, 2002).

2.2. Des relations entre les activités familiales de littératie et l'activité cérébrale dédiée au traitement du langage

Quelques études ont cherché à mesurer les relations entre les activités familiales de littératie et l'activité cérébrale dédiée au traitement du langage chez les enfants. Nous en présentons les résultats essentiels dans cette sous-section.

Hutton et collaborateurs (2015) ont évalué les pratiques informelles de littératie (lecture partagée et accès aux livres) au sein des familles de 19 enfants âgés de 3 à 5 ans ; l'activité cérébrale de ces enfants était par ailleurs mesurée pendant une tâche d'écoute d'histoire en IRMf (comparativement à une condition contrôle d'écoute de tonalités). Leurs résultats ont montré que les enfants bénéficiant le plus de pratiques familiales informelles de littératie engageraient davantage des circuits neuronaux au sein du cortex occipito-pariéto-temporal gauche comparativement à leurs pairs bénéficiant moins de ces pratiques. Pour Hutton et

collaborateurs, cela pourrait signifier que ces enfants plus « stimulés » engageraient de façon plus robuste les circuits neuronaux permettant la compréhension narrative, une composante fondamentale des compétences précoces de littératie.

Après avoir réalisé une mesure des activités familiales de littératie (à l'aide d'un score composite d'activités formelles et informelles), Powers et collaborateurs (2016) ont administré à 50 enfants américains de 5 ans une tâche IRMf d'appariement des sons (tirée de Raschle, Zuk, & Gaab, 2012). Plus précisément, cette tâche consistait à faire entendre aux enfants deux mots (tout en visualisant leurs représentations imagées) et à leur demander de décider si ces deux mots débutaient par le même son (comparativement à une condition contrôle qui consistait à appairer le genre de la voix entendue). Pendant la tâche d'appariement de sons, les enfants qui bénéficiaient le plus d'activités familiales de littératie avaient tendance à recruter davantage un réseau fronto-temporal (notamment l'IFG gauche et gyrus fusiforme bilatéral). Pour Powers et collaborateurs, le réseau recruté serait cohérent avec celui dédié à la lecture (Schlaggar & McCandliss, 2007) : l'IFG pouvant refléter le décodage phonologique (Raschle et al., 2012; Turkeltaub, Gareau, Flowers, Zeffiro, & Eden, 2003) tandis que l'activité du gyrus fusiforme serait susceptible d'indiquer un processus de représentation orthographique des mots entendus (Dehaene & Cohen, 2011).

Powers et collaborateurs ont par ailleurs souligné l'hétérogénéité de leurs résultats par rapport à ceux rapportés par Hutton et collaborateurs (2015) : différentes régions cérébrales étaient identifiées comme davantage recrutées selon la fréquence d'activités familiales de littératie. Selon Powers et collaborateurs (2016), deux différences principales entre les protocoles employés pourraient justifier cet écart : le type de tâche (phonologique dans le cas de Powers et al. ; sémantique dans le cas de Hutton et al.), mais aussi le type de mesures des activités de littératie (activités formelles et informelles pour Powers et al. ; activités exclusivement informelles pour Hutton et al.). Ces disparités pourraient traduire l'existence de corrélats cérébraux différents selon les aspects de l'environnement familial de littératie considérés (formels plutôt qu'informels ou inversement).

Par ailleurs, on peut également mentionner des analyses récentes de Su et collaborateurs (2020), réalisées auprès de 79 enfants chinois de 14 ans, qui ont conduit à identifier un lien entre précocité de l'exposition aux pratiques familiales de littératie et connectivité de la substance blanche (c.-à-d. des mesures d'anisotropie fractionnelle) au sein d'un segment du fascicule arqué gauche.

Dans l'ensemble, ces mesures cérébrales permettent de supposer que la fréquence des activités de littératie réalisées à domicile pourrait être liée au recrutement de différents réseaux cérébraux pendant des tâches langagières. Ces travaux complètent les travaux comportementaux (présentés dans la section précédente¹) en fournissant des pistes supplémentaires pour la compréhension de l'apport du soutien familial dans les activités de littératie (en montrant une différence de latéralisation des régions cérébrales recrutées pour la compréhension narrative ; Hutton et al., 2015; ou en mettant en évidence des différences d'activité au sein d'une région clé pour le traitement phonologique ; Powers et al., 2016).

¹ Ainsi que dans la section A.3.2.1 de l'**annexe 3**.

2.3. Relations entre les caractéristiques des échanges langagiers au sein de l'environnement familial et le développement neurocognitif langagier chez l'enfant

En plus des questionnaires, des mesures directes du langage échangé au sein de la famille ont également pu être utilisées pour caractériser l'environnement familial de littératie. Par exemple, une étude princeps de Hart et Risley (1995)¹ a permis d'estimer que, dès l'âge de 3 ans, les enfants issus des milieux les plus favorisés auraient d'ores et déjà entendu, en moyenne, 30 millions de mots de plus que les enfants issus de milieux moins favorisés et que les mots entendus présentaient une plus grande variété linguistique. Ces résultats ont par la suite été répliqués et étendus, suggérant que les différences dans la quantité et la qualité des expériences linguistiques précoces pourraient expliquer les différentes compétences langagières des enfants (pour revues, voir Hoff, 2006; Romeo, 2019; Rowe, 2018; Rowe & Zuckerman, 2016; Schwab & Lew-Williams, 2016).

Plus récemment, les progrès technologiques ont permis la réalisation d'enregistrements encore plus « écologiques ». Par exemple, un des dispositifs d'enregistrement le plus utilisé, le « Language Environment Analysis » (LENA), se caractérise par sa petite taille (peut être glissé dans une poche de vêtement) et son autonomie. Il permet d'enregistrer les interactions langagières de l'enfant sur une journée entière. Son usage a permis de montrer une corrélation positive entre SES et nombre de mots adressés à l'enfant par son parent ou nombre de tours conversationnels par heure² (Romeo, Leonard, et al., 2018). Ce dispositif a permis de répliquer l'existence de disparités socio-économiques substantielles dans les caractéristiques du langage adressé aux enfants dès le plus jeune âge (pour illustration, voir **Figure 28** tirée de Romeo, Leonard, et al., 2018).

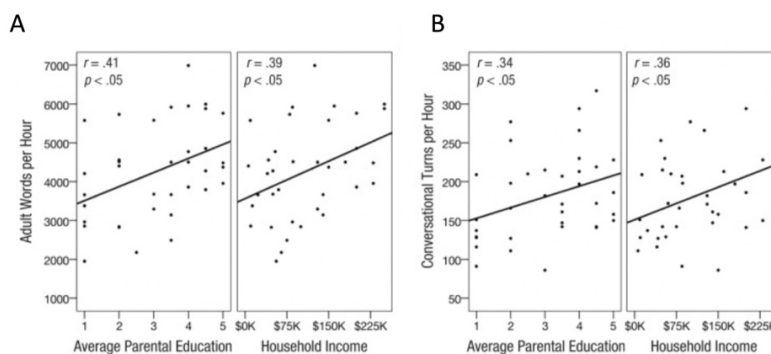


Figure 28 : Figures tirées de Romeo et al. (2018) permettant d'illustrer les relations entre indicateurs socio-économiques et caractéristiques du langage adressé à l'enfant. **A.** Relation entre le nombre de mots prononcés par l'adulte par heure et son niveau de diplôme (figure gauche) ou le niveau de revenu du foyer (à droite). **B.** Relation entre le nombre de tours conversationnels par heure et niveau de diplôme (figure gauche) ou le niveau revenu du foyer (à droite). Données sur le langage obtenues à partir du dispositif LENA pendant deux journées complètes d'enregistrement sur un week-end (du lever au coucher de l'enfant). $N=36$

¹ Voir **annexes 2 et 3**.

² Romeo et al. (2018) définissent un « tour conversationnel » comme un énoncé du parent suivi d'un énoncé de l'enfant (ou vice versa), sans pause de plus de 5 secondes entre les deux.

Réalisée sur 36 enfants américains de 3 à 6 ans, l'étude de Romeo et collaborateurs incluait également une évaluation de leurs compétences langagières en vocabulaire réceptif (Dunn & Dunn, 2007), ainsi que plusieurs sous-tests du Clinical Evaluation of Language Fundamentals (compréhension de phrases, structure de mots, formulation de phrases et rappel de phrases ; Wiig, Secord, & Semel, 2013). L'ensemble des scores langagiers étaient ensuite combinés en un seul score composite verbal. Chez ces mêmes enfants, Romeo et collaborateurs (2018) ont également réalisé une évaluation en IRMf via une tâche d'écoute d'histoires courtes et simples, employant un vocabulaire et des expressions que les jeunes enfants étaient le plus susceptibles de connaître (contenu narratif adapté de Petersen & Spencer, 2012). La tâche contrôle consistait en l'écoute des mêmes histoires, mais dont l'enregistrement était lu à l'envers (et donc incompréhensible). Dans un premier temps, l'analyse des données a permis aux auteurs de montrer que les enfants qui bénéficiaient le plus de tours conversationnels avec leurs parents (plutôt que la quantité de mots entendus) étaient également ceux qui obtenaient les meilleurs scores verbaux. L'analyse des données obtenues à la tâche IRMf a d'abord permis de montrer que, chez tous les enfants, la tâche d'écoute d'histoires (par rapport au contrôle d'enregistrement passé en mode inversé) entraînait le recrutement d'un large réseau temporel pouvant être dédié au traitement des aspects acoustiques du langage (c.-à-d. l'ensemble du sulcus temporal supérieur gauche ainsi que la portion antérieure du sulcus temporal supérieur droit ; voir **Figure 29.A** tirée de Romeo, Leonard, et al., 2018).

De plus, pendant la tâche d'écoute d'histoire, une région supplémentaire, l'IFG gauche, était davantage recrutée pour les enfants qui avaient bénéficié le plus d'échanges langagiers à domicile (**Figure 29.B**). Romeo et collaborateurs (2018) ont ensuite testé si ce recrutement supplémentaire de l'IFG pouvait contribuer à expliquer la relation entre stimulations langagières des enfants à domicile et leurs compétences verbales. Leurs résultats ont indiqué une médiation totale de cette relation, signifiant que la prise en compte de l'activité cérébrale expliquait la relation entre stimulations langagières et compétences de l'enfant (voir **Figure 29.C**). Cela suggère que la richesse linguistique de l'environnement de l'enfant pourrait soutenir ses compétences verbales en influençant le recrutement de l'IFG. Pour Romeo et collaborateurs (2018), le rôle de l'IFG pourrait inclure le traitement du langage réceptif et expressif (pour revue, Hagoort, 2014). Par conséquent, leur tâche d'écoute d'histoire pourrait impliquer l'intégration d'unités phonologiques, sémantiques et syntaxiques ; suggérant que le recrutement de l'IFG pourrait rendre compte d'un engagement plus profond dans la structure linguistique des histoires entendues. Romeo et collaborateurs (2018) ont par ailleurs noté que le recrutement de l'IFG permettait également de médier la relation entre SES et scores langagiers des enfants. Cette étude de neuro-imagerie a donc permis de révéler un mécanisme neuronal susceptible de bénéficier de l'expérience familiale de l'enfant en littératie et d'influencer en retour ses compétences de traitement de certains aspects linguistiques.

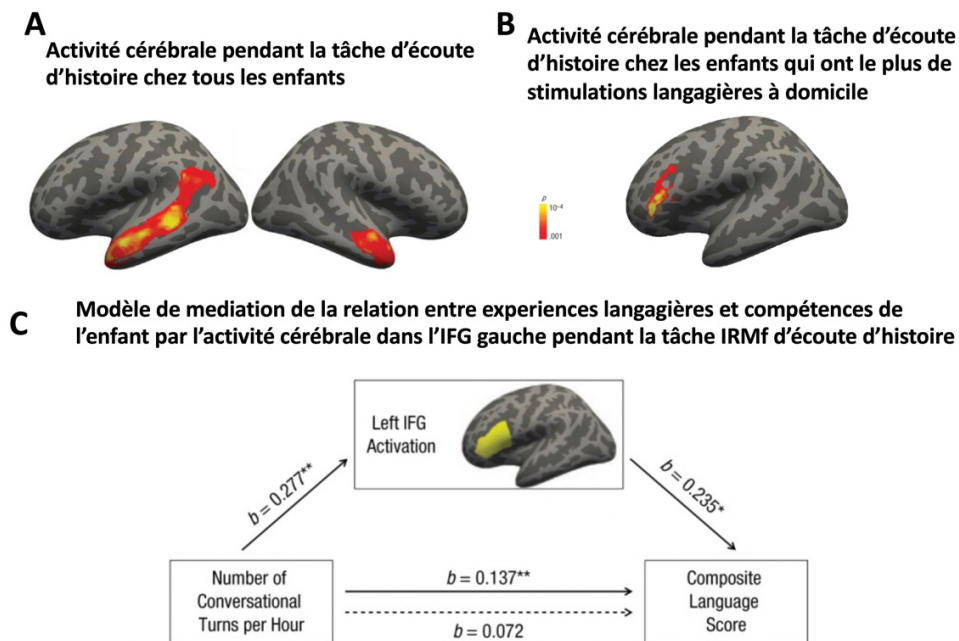


Figure 29 : Figures tirées de Romeo et al. (2018) représentant leurs résultats de médiation cérébrale. **A.** Régions temporales (ensemble du sillon temporal supérieur gauche et partie antérieure du sillon temporal supérieur droit) recrutées pendant la tâche d'écoute d'histoire (par rapport à l'écoute de l'enregistrement inversé), chez tous les participants. **B.** Corrélations entre l'activité cérébrale dans l'IFG gauche pendant la tâche d'écoute d'histoire (par rapport à l'écoute de l'enregistrement inversé) et les stimulations langagières familiales (nombre de tours conversationnels par heure). **C.** Modèle de médiation de la relation entre nombre de tours conversationnels par heure et score composite de langage de l'enfant par l'activité cérébrale dans l'IFG gauche (pendant la tâche d'écoute d'histoires ; en jaune sur la figure). Cette activité cérébrale a permis une médiation significative de la relation entre stimulations et compétences langagières de l'enfant. Sur la figure, les flèches pleines représentent les chemins directs tandis que la flèche en pointillés représente le chemin indirect (médié). $N=36$ * $p < .01$; ** $p < .001$

Les résultats de cette étude ont ailleurs pu être répliqués et étendus via d'autres techniques d'imagerie cérébrale. À l'aide d'un protocole expérimental quasi similaire, pré-enregistré et administré à 40 enfants américains âgés de 6 ans en moyenne (mêmes tests des compétences langagières chez l'enfant et mêmes mesures LENA des caractéristiques langagières à domicile), une seconde étude de Romeo et collaborateurs (2018) a permis de montrer que la richesse de l'environnement linguistique de l'enfant était également liée à une connectivité plus forte de la substance blanche dans les faisceaux arqués supérieurs gauches et notamment auprès de leur terminaison antérieure dans l'IFG. Ces résultats sont cohérents avec ceux de Romeo et collaborateurs (2018) et ceux de Su et collaborateurs (2020, présentés dans la section précédente et montrant une augmentation similaire de la connectivité chez les enfants bénéficiant le plus précocement des activités de littératie familiale). Enfin, à l'aide de mesures du langage équivalentes à celles de Romeo et collaborateurs (des mesures du nombre de tours conversationnels obtenues grâce au dispositif LENA ; Romeo, Leonard, et al., 2018; Romeo, Segaran, et al., 2018), Merz et collaborateurs (2020) ont montré chez 94 enfants âgés de 5 à 9 ans (âge moyen de 7 ans) une relation entre surface corticale périsylvienne et stimulations langagières familiales.

Considérées ensemble, ces études tendent à suggérer l'existence de certains mécanismes cérébraux (notamment au sein de l'IFG) à travers lesquels les stimulations familiales langagières pourraient enrichir les compétences verbales des enfants et viennent, en ce sens, enrichir et compléter les constats établis au niveau comportemental.¹

2.4. Vers une caractérisation de l'environnement familial en littératie comme objet d'étude à part entière : préciser les expériences de l'enfant et mesurer les traits parentaux²

Plusieurs études ont conduit à considérer les phénomènes de variabilité des facteurs proximaux de l'environnement familial d'apprentissage en littératie (qu'il s'agisse des mesures de littératie obtenues par questionnaires ou des mesures des interactions langagières enregistrées) comme pouvant être indépendants des caractéristiques socio-économiques du foyer (Aram & Levin, 2001; Burris, Phillips, & Lonigan, 2019; Mendive, Lara, Aldoney, Pérez, & Pezoa, 2020; Powers et al., 2016; Skwarchuk et al., 2014)³. Les différents « niveaux » de caractérisation de l'environnement familial (du plus « distal » : le SES ; aux plus « proximaux » : l'environnement familial d'apprentissage) pourraient ne pas être liés par une simple relation linéaire « mécanistique ».

La compréhension des expériences d'apprentissage de l'enfant dans son environnement familial pourrait gagner à être plus qualitative (Huttenlocher, Waterfall, Vasilyeva, Vevea, & Hedges, 2010; Pace, Luo, Hirsh-Pasek, & Golinkoff, 2017), non seulement par l'usage de mesures « microscopiques » du langage échangé, mais aussi et surtout en combinant au sein d'une même étude différents indices sur les expériences familiales d'apprentissage de l'enfant. Le modèle initial de l'environnement familial d'apprentissage en littératie (2006b) pourrait être complété par la prise en compte de mesures concernant les traits parentaux, comme leur attitude à l'égard de la littératie, leurs attentes concernant la réussite scolaire de leur enfant (Skwarchuk et al., 2014) ou encore leurs propres compétences verbales (van Bergen, Bishop, van Zuijen, & de Jong, 2015; van Bergen, van Zuijen, Bishop, & F. de Jong, 2016).

Au niveau cérébral, l'étude de Powers et collaborateurs (2016), citée dans la section précédente pour avoir évalué l'activité cérébrale lors d'une tâche phonologique selon les activités de littératie familiales, avait aussi veillé à différencier les enfants évalués selon la présence d'antécédents familiaux de dyslexie⁴ (déterminée par la présence d'au moins un membre de la famille au premier degré présentant un diagnostic clinique). La présence d'un tel « risque familial » modifiait la relation précédemment décrite entre activités de littératie familiales et réseaux cérébraux recrutés pour le traitement phonologique (comparativement, les

¹ Pour plus de détails sur les résultats établis au niveau comportemental sur les relations avec les stimulations langagières parentales, voir section A.3.2.1 de l'**annexe 3**.

² Les arguments énoncés dans cette section sont développés dans la section A.3.5 de l'**annexe 3**.

³ Pour détail sur cette variabilité intra-SES les relations des relations entre caractéristiques de l'environnement familial d'apprentissage en littératie et compétences langagières de l'enfant, voir section A.3.4 de l'**annexe 3**.

⁴ La dyslexie est un trouble spécifique des apprentissages comprenant un ensemble de problèmes d'apprentissage caractérisés par des difficultés dans la reconnaissance exacte et fluide des mots, un mauvais décodage et des difficultés en orthographe (American Psychiatric Association, 2015).

enfants « sans risque » recrutait davantage l'IFG gauche et le gyrus fusiforme droit ; tandis que ceux « avec risque » recrutait davantage le gyrus précentral droit). Autrement dit, à niveau égal d'activités familiales de littératie, la présence d'antécédents familiaux de dyslexie était susceptible de modifier les régions cérébrales recrutées pour le traitement phonologique. Powers et collaborateurs (2016) ont interprété cette dissociation comme témoignant de l'émergence de potentiels réseaux compensatoires chez les enfants « génétiquement à risque » de dyslexie. Néanmoins, dans les faits il est difficile de savoir ce que la présence de cet antécédent familial avait réellement modifié dans l'environnement familial de ces enfants : les compétences des parents, leurs attitudes, leurs attentes ? Quoiqu'il en soit, cette étude de neuro-imagerie s'ajoute aux arguments précédents sur la nécessité de capturer une image extensive des caractéristiques de l'environnement familial d'apprentissage (sans se limiter à la mesure des seules expériences d'apprentissage et du SES).

En conclusion, le modèle d'environnement familial de littératie offre un premier cadre d'étude des expériences familiales d'apprentissage spécifiques. Les travaux réalisés convergent à montrer que, loin de se résumer à un simple score susceptible de jouer un rôle médiateur dans la relation entre SES et disparités neurocognitives chez l'enfant, l'environnement familial d'apprentissage pourrait être considéré comme un objet d'étude complexe à part entière.

3. L'environnement familial d'apprentissage en numératie

Comparativement à la quantité d'études réalisées sur l'environnement familial d'apprentissage en littératie, la question des activités de numératie au sein du foyer a été peu explorée pendant très longtemps. Cette problématique était appréhendée à travers quelques items parmi les activités d'apprentissage général (voir section 1 de ce chapitre sur les mesures de l'environnement familial d'apprentissage, au sens large), reléguant finalement l'apprentissage en numératie au seul milieu scolaire. Cependant, au cours de la dernière décennie, à force de constats sur le phénomène de disparités socio-économiques importantes dans les compétences en numératie, et cela avant même le début de la scolarisation, un nombre croissant d'études ont été menées sur le rôle de l'environnement familial d'apprentissage en numératie.

Sur un temps très bref, ces 4 dernières années, un nombre exponentiel d'études ont été publiées sur le sujet. À titre d'illustration, la récente méta-analyse de Daucourt et collaborateurs (2021) a porté sur 64 études (et 68 groupes indépendants) alors que la précédente méta-analyse, publiée seulement 4 ans auparavant par Dunst et collaborateurs (2017), ne recensait que 11 études (et 13 groupes indépendants).

De nombreux travaux récents ont donc visé à étudier la relation entre activités familiales de numératie et compétences mathématiques. Néanmoins, comme souligné par la revue de la littérature proposée par Mutaf-Yildiz et collaborateurs (2020), ces résultats se caractérisent par une très grande hétérogénéité dont nous tâcherons de rendre compte tout en essayant de dresser un fil directeur intelligible. Pour cela, nous présenterons d'abord les mesures des activités de numératie et leurs relations avec les compétences des enfants, puis la mesure de certains aspects

« mathématiques » du langage (mesures réalisées de façon séparée puis conjointe). Nous présenterons ensuite un renouveau du modèle théorique initial par la prise en considération de différentes caractéristiques parentales. Enfin, nous présenterons plusieurs limites à considérer dans la littérature actuelle portant sur l'environnement familial d'apprentissage en numératie.

3.1. Modèle du Home Numeracy Environment (HNE) : une entrée par les activités familiales de numératie

3.1.1. Activités familiales de numératie formelles et informelles

À l'instar de l'environnement familial d'apprentissage dédié à la littératie décrit précédemment, le concept de « *home numeracy* » a été introduit pour décrire comment les familles étaient susceptibles d'influencer les compétences mathématiques de leurs enfants (Blevins-Knabe & Musun-Miller, 1996). Dans un premier temps, l'étude des activités familiales de numératie s'est surtout focalisée sur les activités d'enseignement explicite de la part des parents. Ainsi, l'étude pionnière de Blevins-Knabe et Musun-Miller (1996) avait permis de mettre en lien les compétences mathématiques d'enfants américains âgés de 4 à 5 ans (TEMA-2 ; Ginsburg & Baroody, 1990) et la fréquence de trois activités rapportées par leurs parents (l'utilisation par l'enfant ou par le parent des mots « un », « deux » ou « trois » et l'utilisation de « faits numériques » par l'enfant). Par la suite, d'autres études ont également montré l'existence d'une relation entre les efforts délibérés rapportés par les parents pour entraîner certaines compétences mathématiques chez leurs enfants et les habiletés numériques mesurés chez ces derniers (Huntsinger, Jose, Larson, Krieg, & Shaligram, 2000; LeFevre, Clarke, & Stringer, 2002; Yingqiu Pan, Gauvain, Liu, & Cheng, 2006). À la même époque, une autre étude avait néanmoins rapporté des résultats en faveur d'une absence de relation (Blevins-Knabe, Austin, Musun, Eddy, & Jones, 2000).

Proposée dans un premier temps comme un complément du modèle de l'environnement familial d'apprentissage en littératie (Sénéchal, 2006b; Sénéchal & LeFevre, 2002), la première version du modèle du « Home Numeracy Environment » (HNE) a été formalisée par LeFevre et collaborateurs (2009) dans le but d'améliorer la compréhension des différentes activités familiales susceptibles de soutenir le développement des mathématiques chez l'enfant. Ce modèle soulignait notamment que la focalisation sur les seuls aspects « conscients » de transmission parentale des concepts mathématiques à l'enfant pourrait donner accès une représentation tronquée de la réalité des échanges familiaux en lien avec la numératie. Ce modèle reprenait ainsi la dissociation entre activités de type « formel » ou « informel »¹. D'après cette dissociation, les activités familiales susceptibles de mobiliser du contenu mathématique comportent bien entendu les activités formelles de numératie (réalisées dans un but explicite d'enseignement, comme « faire réciter la chaîne numérique », « entraîner à réciter

¹ Certaines études ont utilisé les termes de « direct » ou « indirect » (en remplacement de « formel » ou « informel »; p. ex. King & Purpura, 2021) ; nous ne ferons pas la distinction et utiliserons dans ce manuscrit les termes « formel » et « informel ».

les tables de multiplication » ou « résoudre des calculs mentaux »). Mais un grand nombre d'activités informelles de numératie du quotidien¹ pourraient également exposer l'enfant à différents aspects numériques (comme « jouer à un jeu de plateau impliquant un dé et le déplacement de pions », « participer aux activités de cuisine impliquant de peser, compter ou mesurer des ingrédients » ou encore « participer aux achats du quotidien »). Les données présentées dans l'article de LeFevre et collaborateurs (2009) ont permis aux auteurs de souligner que la relation entre scores mathématiques des enfants et environnement familial n'était objectivable qu'à condition de prendre également la mesure de ces activités informelles de numératie.

3.1.2. Outils de mesure des activités familiales de numératie

Les premières mesures des activités formelles de numératie ont souvent été obtenues à partir d'une question très générale consistant à demander aux parents s'ils réalisaient des activités pour faciliter l'enseignement des mathématiques de base à leurs enfants (Huntsinger, Jose, & Larson, 1998; Huntsinger et al., 2000; LeFevre et al., 2002; Yingqiu Pan et al., 2006).

Le modèle HNE théorisé par LeFevre (2009) proposait l'utilisation d'un questionnaire à choix fermé, inspiré des questionnaires portant sur les activités familiales de littératie (Sénéchal, 2006b; Sénéchal & LeFevre, 2002) listant diverses activités de numératie, formelles ou informelles et proposant plusieurs fréquences de réalisation de chacune d'entre elles. Ce questionnaire a été l'outil de mesure le plus utilisé à travers les études HNE, traduit en différentes langues et parfois avec des modifications sur le type, le nombre d'activités évaluées ou le mode de calcul du score par types d'activités (Baker, 2015; Cheung et al., 2018; Ciping, Silinskas, Wei, & Georgiou, 2015; Dearing et al., 2012; Huang, Zhang, Liu, Yang, & Song, 2017; Kleemans, Peeters, Segers, & Verhoeven, 2012; Kleemans, Segers, & Verhoeven, 2013; Manolitsis, Georgiou, & Tziraki, 2013; Mutaf-Yıldız, Sasanguie, De Smedt, & Reynvoet, 2018b; Mutaf-Yıldız et al., 2018a; Ramani, Rowe, Eason, & Leech., 2015; Río et al., 2017; Napoli & Purpura, 2017).

Arguant que l'usage d'un score de familiarité des parents à une liste de titres de littérature enfantine avait permis une mesure détournée, mais efficace, des activités informelles de littératie (Sénéchal & LeFevre, 2002) et soulignant aussi le manque de fidélité potentielle des mesures d'activités informelles par questionnaire (du fait de leur caractère majoritairement routinier et leur motif de réalisation non « mathématique »), Skwarchuk et collaborateurs (2014) ont proposé d'étendre un tel score de familiarité aux jeux enfantins (à partir d'une liste de noms de jeux réels et fictifs, susceptibles d'impliquer des aspects numériques) comme mesure indirecte des activités informelles de numératie. Néanmoins, à quelques rares

¹ Concernant ces activités informelles de numératie du quotidien, il peut être intéressant de faire un parallèle avec la clinique où il a pu être montré, chez des patients adultes susceptibles de présenter des déficits de certaines compétences mathématiques, l'intérêt d'utiliser des échelles (« Numerical activities of daily living », Semenza et al., 2014) visant à évaluer les possibles difficultés rencontrées dans certaines activités de la vie quotidienne susceptibles de mobiliser du contenu mathématique (comme réaliser ses courses, passer des appels téléphoniques, connaître certains tarifs).

exceptions (Khanolainen et al., 2020; Susperreguy, Douglas, Xu, Molina-Rojas, & LeFevre, 2020), cette mesure de « familiarité » a été très peu utilisée et une méta-analyse récente a suggéré que celle-ci était moins pertinente que les mesures plus « classiques » obtenues à partir de questionnaires (Daucourt et al., 2021). Par ailleurs, il a aussi été proposé de reprendre des mesures « matérielles », similaires à celles précédemment utilisées (à partir de l'échelle HOME ; Bradley & Caldwell, 1984a; ou dans le cadre de l'environnement familial de littératie, le nombre de livres ; Sénéchal & LeFevre, 2002). Dans le contexte familial de numératie, il était proposé de recenser la quantité d'objets « éducatifs » disponibles¹ au domicile familial (Cheung et al., 2020, comme le nombre de livres en lien avec les mathématiques ou le nombre de jeux de plateau ; 2018).

Enfin, d'autres mesures originales (et anecdotiques en ce qui concerne leur utilisation dans la littérature HNE) existent. Par exemple, il a pu être demandé aux parents de tenir un agenda quotidien des activités réalisées avec leur enfant (rempli immédiatement après chaque journée afin de minimiser les biais de mémoire). Les études employant ce procédé ont permis de montrer que les scores obtenus à partir de ces « agendas » étaient cohérents avec ceux obtenus par un questionnaire « classique », suggérant finalement un biais mnésique assez limité pour les mesures obtenues par questionnaire (Bachman et al., 2020; Skwarchuk, 2009).

Par ailleurs, des scores d'activités familiales de numératie ont parfois été calculés à partir d'observations réalisées en laboratoire ou à domicile (K. N. Missall, Hojnoski, & Moreano, 2017; Skwarchuk, 2009; Thippana, Elliott, Gehman, Libertus, & Libertus, 2020; Zippert et al., 2020). Des relations mixtes étaient identifiées entre ces mesures d'observation et celles « plus classiques » obtenues par questionnaire (relation positive, Thippana et al., 2020; ou absence de relation, K. N. Missall et al., 2017)². Enfin, Benavides-Varela et collaborateurs (2016) ont suggéré une mesure encore plus indirecte des activités informelles de numératie en suggérant d'évaluer certaines connaissances de l'enfant sur des « faits numériques du quotidien » (p. ex. leurs connaissances des dates de naissance, numéros de téléphone, ou leur capacité à lire l'heure sur une montre; Benavides-Varela et al., 2016). Néanmoins cette mesure, probablement bien trop indirecte pour refléter les stimulations familiales, n'a pas à notre connaissance été employée dans des études ultérieures.

¹ Ces mesures matérielles ont été parfois qualifiées de « ressources » pour l'environnement familial de numératie (Cheung, Dulay, & McBride, 2020).

² Dans un article de revue, Dowker (2021) indiquait que si ces mesures d'observation pourraient permettre d'éviter certains biais déclaratifs, elles ne seraient pour autant pas exemptes de biais et cela qu'elles soient réalisées de façon directive (et donc susceptibles d'influencer les pratiques observées) ou non directive (ne reflétant de toute façon qu'un échantillon très limité d'activités).

3.1.3. Relations entre score d'activités familiales de numération (formelles et/ou informelles) et compétences mathématiques de l'enfant

La grande majorité des études ayant calculé des scores d'activités familiales en numération ont testé leurs relations avec les compétences mathématiques chez l'enfant, de façon concurrente ou longitudinale¹ (Mutaf-Yıldız et al., 2020).

En dépit du cadre théorique proposé par LeFevre et al. (2009), quelques études ont fait le choix de concentrer leurs évaluations sur les seules activités formelles de numération et ont montré, pour la plupart, un lien entre ces activités et les compétences des enfants, à travers différents pays et à différents âges ; par exemple chez des enfants allemands scolarisés en CP ($N=609$, Niklas & Schneider, 2014), chez des enfants néerlandais de 6 ans ($N=89$, Kleemans et al., 2012; $N=60$, Segers, Kleemans, & Verhoeven, 2015), chez des enfants américains de 4 ans ($N=114$, Napoli & Purpura, 2017) ou chez des enfants grecs de 5,5 ans ($N=82$, Manolitsis et al., 2013). Néanmoins, certaines de ces études ont aussi conduit à des résultats inconsistants, soit en ne parvenant pas à montrer l'existence d'un lien avec les compétences mathématiques des enfants (p. ex. chez 673 enfants philippins de 4 ans, Cheung et al., 2018; 554 enfants de 3 ans, Lehrl et al., 2020; ou chez 72 enfants américains de 4,5 ans, K. Missall, Hojnoski, Caskie, & Repasky, 2015), soit en montrant l'existence d'une relation négative avec leurs scores mathématiques (p. ex. chez 330 enfants lituaniens de 7 ans, Silinskas et al., 2020).

D'autres études ont réalisé la mesure d'un score total d'activités familiales de numération, en incluant des activités à la fois formelles et informelles. La plupart d'entre elles ont également montré un lien avec les compétences numériques chez des enfants d'âges² et de nationalités divers (Anders et al., 2012; Bernabini, Tobia, Guarini, & Bonifacci, 2020; Cheung et al., 2020, 2018; Dearing et al., 2012; Kleemans et al., 2012, 2013; Kleemans, Segers, & Verhoeven, 2018; Napoli & Purpura, 2017; Purpura et al., 2020; Segers et al., 2015; Soto-Calvo, Simmons, Adams, Francis, & Giofre, 2020; Thippana et al., 2020; Visser, Juan, & Hannan, 2019; Wei, Li, & Su, 2020). Il est important de noter néanmoins que ces études n'ont pas nécessairement montré l'existence d'une telle relation pour chacune des habiletés numériques mesurées auprès des enfants. Par exemple, Bernabini et collaborateurs (2020) ont montré une relation avec les compétences de lecture ou reconnaissance de chiffres et celles de correspondance terme à terme lors du dénombrement, mais pas avec celles de la maîtrise de la chaîne numérique verbale.

Certaines études ont veillé à mesurer les activités formelles et informelles de numération en dissociant leurs scores. En tenant compte des activités de numération formelles, l'étude des activités informelles de numération a révélé des résultats mixtes : certaines études ont montré une relation positive avec les compétences des enfants (LeFevre et al., 2009; Mutaf-Yıldız et al., 2018a, 2018b; Silver et al., 2021; Susperreguy, Burr, et al., 2020; Susperreguy, Douglas, et

¹ On reviendra sur l'aspect longitudinal de certaines études dans la section 3.10.3 de ce chapitre.

² Les enfants étaient évalués avant ou après le début de la scolarisation formelle. Pour autant, très peu d'études ont évalué des enfants déjà scolarisés, nous en discutons dans la section 3.10 de ce chapitre.

al., 2020; Vasilyeva, Laski, Veraksa, Weber, & Bukhalenkova, 2018), tandis que d'autres n'ont pas trouvé de relation significative (Ciping et al., 2015; Huntsinger, Jose, & Luo, 2016; LeFevre, Polyzoi, Skwarchuk, Fast, & Sowinski, 2010), voire obtenu une relation négative (Huang et al., 2017)¹.

Dans ces mêmes études, la mesure des activités formelles de numératie (en tenant compte, là aussi, des activités informelles) a également donné lieu à des résultats hétérogènes via la mise en évidence de liens positifs avec les compétences numériques des enfants (Huang et al., 2017; Huntsinger et al., 2016; LeFevre, Polyzoi, et al., 2010; LeFevre et al., 2009; Mutaf-Yildiz et al., 2018a, 2018b; Silver et al., 2021; Susperreguy, Burr, et al., 2020), mais aussi de liens négatifs (Ciping et al., 2015).

Enfin quelques études, moins nombreuses, ont mesuré les seules activités informelles de numératie et ont mis en évidence une relation positive avec les compétences mathématiques chez l'enfant (Benavides-Varela et al., 2016; Niklas & Schneider, 2014; Ramani et al., 2015), mais aussi des résultats en faveur d'une absence de relation² (De Keyser et al., 2020).

Parmi les résultats répertoriés dans cette section, nous précisons que certains étaient tirés de l'analyse de données de cohortes, déjà mentionnées dans le chapitre 1 (les cohortes allemandes BiKS ou School-ready child; Anders et al., 2012; Lehl et al., 2020; Niklas & Schneider, 2014; ainsi que des données tirées de l'enquête TIMMS concernant l'Afrique du Sud; Visser et al., 2019).

3.1.4. Dissocier le type de compétences mathématiques étudiées (symboliques versus non symboliques) pour affiner la compréhension des liens avec les activités familiales de numératie

Dans un article de 2014, Skwarchuk et collaborateurs ont proposé une formalisation plus complète du modèle de l'environnement familial de numératie (Skwarchuk et al., 2014). Ils ont tout d'abord insisté sur la dimension heuristique de la dissociation entre activités de type formel ou informel. Selon les auteurs, les activités familiales de numératie à la maison devraient être conçues comme un domaine hétérogène et l'étude de leurs relations avec les compétences en numératie des enfants gagnerait à être différenciée systématiquement selon le type d'activités, formelles ou informelles (Skwarchuk et al., 2014). La prise en considération des activités informelles de numératie ne serait pas seulement importante pour éviter une image parcellaire du champ des activités familiales de numératie (LeFevre et al., 2009), mais leur mesure permettrait avant tout d'accéder à un modèle de compréhension plus précis des liens avec les compétences des enfants.

Plus exactement, le modèle de Skwarchuk et collaborateurs (2014) suggérerait que les activités formelles de numératie familiales seraient associées aux compétences symboliques des

¹ Dans l'étude de Huang et al. (2017), la corrélation entre activités informelles et scores mathématiques dépendaient en fait du score informel utilisé (score total : relation nulle ; score en lien avec les livres à contenu mathématique : relation négative).

² Dans le cadre de l'étude de De Keyser et al. (2020), il est intéressant de souligner que les résultats n'étaient pas seulement non significatifs avec un test de statistique inférentielle, mais que le recours à un test bayésien montrait des preuves importantes en faveur d'une absence de corrélation.

enfants, tandis que les activités informelles seraient davantage associées à leurs compétences non symboliques. Leur modèle de dissociation était étayé des résultats obtenus auprès de 183 familles américaines d'enfants scolarisés en grande section de maternelle : la fréquence des activités formelles de numération rapportées par les parents était en lien avec les compétences symboliques des enfants (score composite de comptage, ordinalité, lecture de nombre, comparaison de nombre ; Connolly, 1998), tandis que la fréquence des activités informelles était en lien avec leurs compétences d'arithmétique non symbolique (énoncés *et* réponses non symboliques à partir d'une tâche adaptée de Levine et al., 1992 et déjà décrite dans le chapitre 3 section 3.1.3).

Cette formalisation théorique d'une dissociation entre types de compétences et d'activités de numération n'a toutefois pas eu beaucoup d'échos dans les études ultérieures sur le HNE. Deux motifs sont susceptibles d'expliquer cette absence. Tout d'abord, certaines des données obtenues par la suite n'étaient pas en faveur d'une telle dissociation, en montrant des relations inverses à celles supposées par le modèle de Skwarchuk (relations entre activités informelles et compétences symboliques ; Benavides-Varela et al., 2016; Huang et al., 2017; Huntsinger et al., 2016; Ramani et al., 2015; Susperreguy, Burr, et al., 2020; et/ou relations entre activités formelles et compétences non symboliques Huntsinger et al., 2016; Ramani et al., 2015; Susperreguy, Burr, et al., 2020). De plus, la plupart des études ultérieures n'ont pas utilisé de tests mathématiques permettant d'évaluer cette dissociation (symbolique versus non symbolique), en recourant à des scores composites globaux (pour revue, voir Mutaf-Yıldız et al., 2020) ou à des mesures susceptibles de combiner aspects symboliques et non symboliques du nombre (voir section 1.3 du chapitre 2 ; p. ex. des tâches de calculs imagés, Mutaf-Yıldız et al., 2018b, 2018a; ou de comparaisons symboliques, Vasilyeva et al., 2018).

Une étude récente de Susperreguy et collaborateurs (2020) a cependant explicitement cherché à répliquer le modèle de Skwarchuk et collaborateurs (2014) en évaluant 419 enfants chiliens de 5 ans à l'aide de nombreux scores en mathématiques : un score composite symbolique (chaîne numérique verbale, lecture de nombre, dénombrement), deux scores de comparaison de quantités (symboliques et non symboliques), deux scores de calculs (résolution de problèmes arithmétiques verbaux et un test avec énoncé analogique et réponses symboliques) et un score à la tâche de ligne numérique symbolique. Grâce à ces nombreux scores d'habiletés numériques (symboliques et/ou non symboliques), cette étude s'est prêtée au test de la dissociation suggérée par Skwarchuk (2014) des habiletés numériques selon le type d'activités familiales de numération. Les premiers résultats de corrélations obtenus n'étaient pas congruents avec la dissociation proposée : les scores d'activités informelles étaient liés aux performances des enfants à l'ensemble des tâches (à l'exception de celle de ligne numérique symbolique) ; tandis que les scores d'activités formelles étaient liés aux performances symboliques (score composite), aux scores de problèmes arithmétiques verbaux et aux scores à la tâche de ligne numérique symbolique. Néanmoins, les auteurs ont ensuite proposé des modèles d'équations structurelles pour tester les hypothèses cohérentes avec le modèle de Skwarchuk (2014) : ils ont ainsi montré que, lorsque différentes caractéristiques parentales et différents scores d'activités familiales de numération étaient entrés ensemble dans le modèle, les activités informelles (de jeux partagés) prédisaient de façon unique les compétences qualifiées de « non symboliques » (comparaison non symbolique et arithmétique non symbolique). De la

même manière, les activités formelles permettaient d'expliquer de façon unique les compétences « symboliques » (score symbolique composite, comparaison symbolique et tâche de ligne numérique symbolique). Enfin, les scores aux problèmes arithmétiques verbaux étaient liés aux deux types d'activités de numératie. Les auteurs concluaient ainsi à une répliation de la dissociation de Skwarchuk et collaborateurs (2014) sur les relations entre types d'activités familiales de numératie et types d'habiletés numériques chez l'enfant (Susperreguy, Douglas, et al., 2020).

Si nous proposons que la conclusion des auteurs puisse être nuancée (notamment du fait de certaines tâches employées, mélangeant aspects symboliques et non symboliques des quantités¹), nous soulignons néanmoins un aspect crucial de cette étude (sur lequel nous reviendrons par la suite²) : le type de modèle statistique employé qui permettait de tester les relations des différentes variables considérées de façon *simultanée* (et non pas seulement à travers des résultats de corrélation, considérés un par un ; Susperreguy, Douglas, et al., 2020).

Par ailleurs, l'hétérogénéité des résultats (notamment ceux concernant les pratiques informelles de numératie) ne devrait sans doute pas amener à déconsidérer leurs mesures. La méta-analyse de Dunst et collaborateurs (2017) avait en effet permis aux auteurs de souligner le rôle important de ces activités informelles (voir **Figure 30** ; tirée de Dunst et al., 2017)³.

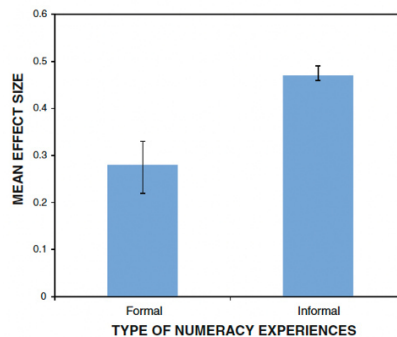


Figure 30 : Figure tirée de la méta-analyse de Dunst et al. (2017) représentant la moyenne des tailles d'effet (en ordonnée) pour les relations entre les expériences familiales formelles (à gauche) ou informelles (à droite) de numératie et les compétences mathématiques des enfants. Les intervalles de confiance de 95% sont également représentés.

¹ On fait ici référence aux tâches d'arithmétique non symbolique (supposée évaluer le système non symbolique mais faisant appel à une réponse orale symbolique) et de ligne numérique symbolique (supposée évaluer le système symbolique, mais par ailleurs profondément ancrée dans le système de représentation non symbolique approximatif des quantités ; voir chapitre 2).

² Nous reviendrons sur cette question des modèles statistiques employés dans la section 3.8.3 de ce chapitre.

³ Nous rappelons cependant que cette méta-analyse avait été réalisée sur un faible nombre d'études, comparativement aux nombres d'études de ces quatre dernières années.

3.1.5. Dissocier la complexité des activités formelles de numératie pour affiner la compréhension de leurs liens avec les compétences de l'enfant

Un second aspect de la formalisation du modèle HNE proposée par Skwarchuk et collaborateurs (2014) consistait à mettre l'emphase sur une seconde dissociation : celle concernant le degré de complexité des activités formelles dans le but d'affiner la compréhension de leurs liens avec les compétences de l'enfant. Ainsi, dans les données qui accompagnaient leur modèle, la significativité de la relation précédemment mentionnée entre fréquence d'activités formelles de numératie et score composite symbolique de l'enfant dépendait en réalité de la dissociation de ces activités selon leur niveau de complexité (Skwarchuk et al., 2014). En conséquence, seule la fréquence des activités formelles de numératie suffisamment « complexes » pour l'enfant en école maternelle (telles que « additionner ou soustraire des chiffres », « compter 2 par 2 ») était liée à ses compétences en mathématiques ; tandis que la fréquence des activités formelles de niveau « basique » (telles que « compter des objets » ou « écrire des chiffres ») ne l'était pas. Peu d'études ont repris cette dissociation concernant le degré de complexité des activités formelles de numératie. Néanmoins, à notre connaissance, toutes ont répliqué la dichotomie suggérée (Rio et al., 2017; Susperreguy, Burr, et al., 2020; Susperreguy, Douglas, et al., 2020; Susperreguy et al., 2021; Zippert & Ramani, 2016). Par ailleurs, une précédente étude de Skwarchuk avait déjà utilisé avec succès une telle dissociation entre activités basiques et avancées (Skwarchuk, 2009).

Même si les auteurs ayant utilisé la dissociation des activités de numératie selon leurs niveaux de complexité n'ont pas fait référence de façon explicite à la théorie socio-culturelle du développement de Vygotsky, la prise en compte de la complexité des activités pour mettre à jour les liens avec les compétences des enfants n'est pas sans rappeler la notion de « zone proximale de développement »¹ proposée par Vygotsky (Vygotsky & Cole, 1978). Cette notion correspond à la différence entre ce que l'enfant maîtrise déjà et ce qu'il pourrait potentiellement acquérir grâce à l'aide d'une personne plus expérimentée. Sous-entendu, il faut que l'aide soit adaptée au niveau réel de l'enfant, mais sans excéder pour autant les compétences que l'enfant est alors en capacité d'acquérir. Cette notion, à laquelle il est fait clairement référence dans la revue de la littérature de Mutaf-Yıldız et collaborateurs (2020), explicite donc l'idée selon laquelle les enfants pourraient bénéficier du soutien d'un adulte pour développer leurs compétences seulement si ce soutien est adapté à leur niveau initial de compétences. En conséquence, appliquée au cadre de l'environnement familial de numératie, la pratique d'activités de numératie formelles trop « simples » pourrait ne pas être liée aux compétences de l'enfant, car celles-ci ne leur seraient d'aucun bénéfice pour progresser dans leurs compétences. À l'inverse, les pratiques plus complexes pourraient permettre aux enfants d'améliorer leurs compétences, à la condition cependant que celles-ci soient adaptées à leur

¹ Dans la formalisation initiale de Skwarchuk et al. (2014), nous notons cependant que la notion de « zone proximale de développement » est évoquée ; mais sans précision ni aucune référence à la théorie de Vygotsky.

niveau initial (des activités donc suffisamment complexes, mais sans « trop » l’être pour autant par rapport au niveau initial de l’enfant ; Vygotsky & Cole, 1978).

Sur le même principe, mais sans référence au concept de « zone proximale de développement », les auteures d’un article de revue ont mis l’accent sur la nécessité de définir la complexité des activités de numératie selon l’âge des enfants plutôt que de façon arbitraire (L. Elliott & Bachman, 2018a). Selon le niveau « normal » de compétences attendues à un âge donné, une activité pourrait être considérée comme basique tandis que cette même activité pourrait être considérée comme « complexe » un an auparavant (et inversement). Elliott et Bachman (2018a) ont illustré leurs propos en reprenant les données d’une étude réalisée par Thompson et collaborateurs (2017). Cette étude, portant sur 184 familles américaines d’enfants âgés de 3 ($n=71$) et 4 ans ($n=113$), avait consisté à demander aux parents d’évaluer la fréquence de différentes activités de numératie (formelles et informelles). Des différences significatives dans la fréquence de ces activités étaient rapportées selon l’âge des enfants (pour illustration de ces différences selon l’âge des enfants, voir **Figure 31** tirée de Thompson et al., 2017). Dans cette étude, les activités formelles « basiques » n’étaient pas liées aux compétences mathématiques des enfants de 4 ans, mais étaient cependant liées à celles des enfants de 3 ans (et inversement pour celles « complexes »). Étant donné l’âge des enfants étudiés (3 et 4 ans ; période pendant laquelle une différence d’une année pourrait représenter un écart développemental considérable), Elliott et Bachman (2018a) ont proposé que la dissociation du niveau de complexité des activités familiales aurait gagné en intérêt si elle avait été adaptée selon l’âge des enfants plutôt que fixée de façon « arbitraire » pour l’ensemble des enfants. Plus concrètement, certaines des activités considérées comme « basiques » pour des enfants de 4 ans auraient pu être labélisées comme « avancées » pour des enfants de 3 ans, améliorant ainsi la compréhension des relations objectivées avec leurs performances en mathématiques.

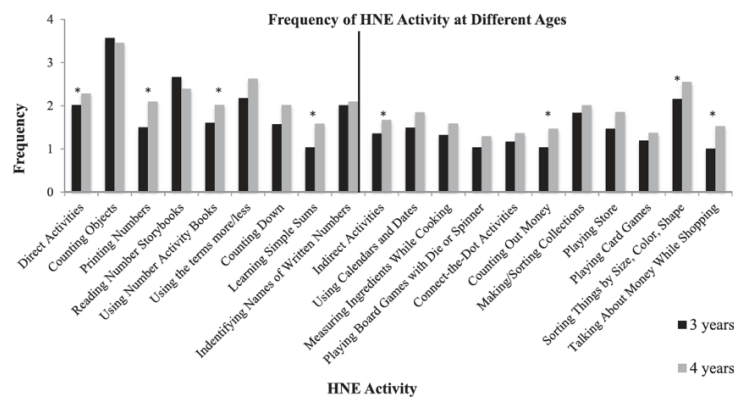


Figure 31 : Figure tirée de Thompson et al. (2017) illustrant les fréquences moyennes (en ordonnées) de différentes activités familiales de numératie (en abscisse) selon l’âge des enfants (en noir, 3 ans, $n=73$; en gris, 4 ans, $n=113$). À gauche sont représentées les activités formelles et à droite les activités informelles. Une échelle de 5 points était utilisée pour évaluer la fréquence des activités sur le dernier mois écoulé (de 0 « jamais » à 5 « plusieur fois par jours »). Pour chacune des activités, une différence significative dans la fréquence rapportée pour les enfants de 3 ou 4 ans est signalée par * ($p<.05$)

3.1.6. Hétérogénéité des liens entre activités de numération familiales et compétences mathématiques chez l'enfant : une première remise en question méthodologique

Malgré les tentatives pour définir un cadre théorique heuristique des activités familiales de numération, d'abord par LeFevre et al. (2009) puis par Skwarchuk et al. (2014), la littérature sur les relations entre scores d'activités familiales de numération et habiletés numériques des enfants peine à faire émerger un modèle compréhensible et robuste de ces relations. Si une grande majorité des études a effectivement permis de montrer des liens entre activités de numération et performances mathématiques des jeunes enfants, ces liens sont très divers (notamment sur la distinction entre pratiques formelles et informelles) et n'ont pas systématiquement été répliqués ; certaines études obtenant des liens négatifs ou nuls (pour rendre compte de cette hétérogénéité, voir les revues ou méta-analyses de Daucourt et al., 2021; Dunst et al., 2017; L. Elliott & Bachman, 2018a; Mutaf-Yıldız et al., 2020). Pour participer à la compréhension de l'hétérogénéité de ces résultats, nous proposons dans cette section plusieurs pistes de réflexion méthodologique inhérentes aux différences dans les questionnaires utilisés à travers les études recensées.

À notre connaissance, la problématique du nombre d'items utilisés au sein des différentes versions des questionnaires exploités n'a pas été discutée. Pourtant, il existe une très large variabilité du nombre total d'items utilisés pour évaluer la fréquence d'activités familiales de numération : certaines études ont utilisé de 4 à 10 items (Cheung et al., 2018; Ciping et al., 2015; De Keyser et al., 2020; Kleemans et al., 2012, 2013, 2018; Manolitsis et al., 2013; Napoli & Purpura, 2017; Segers et al., 2015; Soto-Calvo et al., 2020; Susperreguy, Douglas, et al., 2020), tandis que d'autres ont utilisé entre 11 et 20 items (Cheung et al., 2020; Dearing et al., 2012; Huntsinger et al., 2016; King & Purpura, 2021; LeFevre, Polyzoi, et al., 2010; Mutaf-Yıldız et al., 2018a, 2018b; Purpura et al., 2020; Skwarchuk et al., 2014; Thippana et al., 2020; Vasilyeva et al., 2018). S'ajoutent également des études qui se distinguent aux extrêmes, soit pour avoir utilisé un seul item évaluant les activités de numération (Benavides-Varela et al., 2016; DePascale, Prather, & Ramani, 2021)¹, soit pour avoir utilisé jusqu'à 36 items d'activités différentes de numération (Huang et al., 2017; K. Missall et al., 2015; K. N. Missall et al., 2017; Silver et al., 2021; Wei et al., 2020). Cette large variabilité dans le nombre d'activités de numération listées pour évaluer leur fréquence pourrait tout à fait participer à l'hétérogénéité des résultats observés. En effet, l'usage d'un questionnaire pour évaluer la fréquence de diverses activités de numération listées (mesures de « reconnaissance ») est susceptible de permettre aux parents une meilleure récupération en mémoire épisodique (plutôt que l'usage de questions « ouvertes » très générales sur les activités susceptibles d'être réalisées à domicile ; correspondant à un « rappel libre » ou « indicé » selon D. M. Thomson & Tulving, 1970; Tulving & Thomson, 1971). Néanmoins l'intérêt de ces questionnaires dépend aussi de leur

¹ Nous notons cependant que l'échelle utilisée par DePascale et collaborateurs (2021) était par ailleurs complétée de 13 items visant à évaluer la fréquence, rapportée par les parents, d'activités de numération réalisées par l'enfant seul.

« validité de contenu » (Bernaud, 2014) et le nombre d'items utilisés pourrait largement influencer les scores obtenus (N. C. Schaeffer & Presser, 2003; Schwarz, 1999). Ainsi la cohérence (et l'intérêt) des mesures d'activités familiales obtenues par questionnaires pourrait être conditionnée par le recours à un nombre d'items suffisamment variés afin de rendre compte d'activités potentiellement très différentes selon les familles.

De plus, la méthode utilisée pour classifier les activités de numératie comme informelles ou formelles (voire, parfois comme simples ou complexes) est également source potentielle d'hétérogénéité (pour une discussion dans une revue critique récente, voir Andrews, Petersson, & Sayers, 2021). À travers les différentes études sur le HNE, la catégorisation des activités a été réalisée soit en étant « guidée par les données », avec des analyses supposant plus ou moins de postulats théoriques (utilisant des modèles statistiques d'analyse par composantes principales ou des modèles d'analyse factorielle confirmatoire ; S. A. Hart, Ganley, & Purpura, 2016; Huang et al., 2017; Kleemans et al., 2013; Mutaf-Yıldız et al., 2018b, 2018a; Napoli & Purpura, 2017; Susperreguy, Douglas, et al., 2020), soit en étant guidée par des classifications théoriques préétablies (Bernabini et al., 2020; Cheung et al., 2020; De Keyser et al., 2020; Río et al., 2017; Silver et al., 2021; Susperreguy & Davis-Kean, 2016; Vasilyeva et al., 2018).

À notre connaissance, l'impact de ces différentes voies de classifications sur l'hétérogénéité des résultats n'a pas été établi à ce jour. Dans leur revue de la littérature, Elliott et Bachman (2018a) recommandaient cependant l'usage d'une classification davantage « théorique » que « statistique » afin d'homogénéiser les mesures à travers les études (cette recommandation est également celle de Vasilyeva et al., 2018).

Une grande variabilité existe également en ce qui concerne le mode de calcul de la fréquence des activités de numératie, par exemple via le calcul de leur somme ou de leur moyenne. Les résultats de la méta-analyse de Daucourt et collaborateurs (2021) semblent indiquer que ces différences de mode de calcul participeraient peu à l'hétérogénéité des résultats. Nous mentionnons cependant les choix parfois faits par certains auteurs, sans que cela soit réellement expliqué, de supprimer de leurs analyses les items les moins fréquemment rapportés par les parents ou de déclarer la mesure d'un type d'activités de numératie sans l'impliquer ensuite dans les analyses réalisées (p. ex. S. A. Hart et al., 2016; King & Purpura, 2021).

Enfin, une dernière critique méthodologique concernant les travaux présentés dans cette première section pourrait relever des inconvénients « classiques » inhérents à la méthodologie par questionnaire : biais possibles de désirabilité, de mémoire, mais aussi manque de finesse dans les mesures réalisées (Dowker, 2021). Concernant la mesure des activités de numératie réalisées à domicile, au-delà de la dissociation selon leur niveau de complexité (Skwarchuk et al., 2014), les questionnaires fournissent finalement assez peu d'indications sur leur qualité. De façon analogue aux travaux réalisés sur les mesures de langage échangé comme indicateurs de

l'environnement familial en littératie (section 2.3 de ce chapitre¹), une manière alternative, plus qualitative, de mesurer les aspects de numératie de l'environnement familial pourrait être de réaliser des mesures plus directes des échanges langagiers (Dowker, 2021; Mutaf-Yıldız et al., 2020)

3.2. Capturer les stimulations familiales de numératie par des mesures du langage « mathématique » employé

Face au manque d'homogénéité de la littérature présentée dans la section précédente, certains chercheurs ont donc proposé d'étudier les stimulations familiales proximales de numératie, à une échelle plus « microscopique », qui va être l'objet de cette nouvelle section : l'étude de certaines modalités du langage en lien avec la numératie. Cet intérêt pour le rôle joué par le langage mathématique au sein de la famille n'est pas surprenant, quand on considère l'abondante littérature sur les liens entre compétences langagières et caractéristiques familiales (considérés par le prisme du statut SES ; Noble et al., 2007, 2005; ou via les travaux sur l'importance des caractéristiques langagières employées au sein de l'environnement familial B. Hart & Risley, 1995; Romeo, Leonard, et al., 2018)². Au sein du chapitre 3, les données tirées des cohortes longitudinales ou d'études expérimentales nous avaient permis de souligner un potentiel rôle médiateur des compétences langagières dans les disparités socio-économiques au sein des habiletés numériques chez l'enfant (Durham et al., 2007; Fitzpatrick et al., 2014; Stumm et al., 2020 ; section 2.1 du chapitre 3). De plus, rappelons que le postulat théorique développé par Jordan et Levine (2009) suggérait une explication des disparités socio-économiques objectivées au sein des habiletés numériques par leurs aspects verbaux.

Les relations objectivées entre domaines numérique et langagier pourraient s'expliquer, au moins en partie, par un type de langage bien spécifique : celui dédié aux mathématiques (Purpura, Logan, Hassinger-Das, & Napoli, 2017). L'argumentaire de Purpura et collaborateurs (2017) repose en grande partie sur le fait que le système numérique symbolique est avant tout un système langagier³. En conséquence, les compétences linguistiques pourraient entretenir une forte interrelation avec ces compétences numériques symboliques, *a minima* dans leur phase initiale d'acquisition et de consolidation. Dans une autre étude, Purpura et collaborateurs (2021) ont testé cette proposition théorique : leurs données indiquaient que les relations entre activités familiales de numératie et compétences mathématiques des enfants pourraient s'expliquer par les performances de ce dernier en « langage mathématique » (**Figure 32**, tirée de King & Purpura, 2021)

¹ Et en **annexe 3**.

² Pour les relations entre langage et SES voir le chapitre 3, pour les stimulations langagières comme mesures de l'environnement familial de littératie voir la section 2 de ce chapitre (voir également **annexes 2 et 3**).

³ Voir la description du processus d'acquisition de la chaîne numérique verbale dans la section 1.2.1 du chapitre 2.

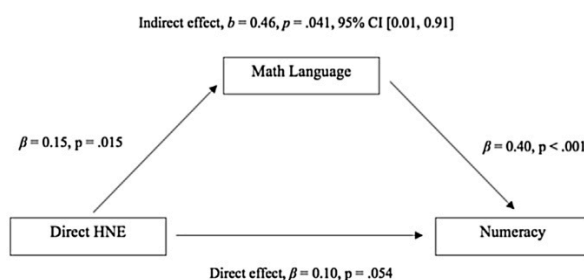


Figure 32 : Figure tirée de King et Purpura (2021) illustrant un modèle de médiation de la relation entre HNE formel et compétences mathématiques (scores composites PENS-B) chez des enfants américains de 4 ans par leurs compétences en langage mathématique. $N=125$

3.2.1. Diversité des situations expérimentales employées pour enregistrer les interactions langagières entre l'enfant et son parent

La mesure des aspects mathématiques du langage (« *math talk* » ou « *number talk* ») échangé avec l'enfant, au sein de sa famille, pourrait donc représenter une méthode alternative à celle des questionnaires HNE. Pour la réalisation de ces mesures, trois grandes catégories de situations expérimentales ont été employées : celles mesurant les échanges langagiers au sein du domicile familial (Gunderson & Levine, 2011; Levine et al., 2010; Mutaf-Yıldız et al., 2018b; Silver et al., 2021; Susperreguy & Davis-Kean, 2016; Thippaana et al., 2020; Vandermaas-Peeler, Nelson, Bumpass, & Sassine, 2009), celles mesurant ces échanges en laboratoire (Bachman et al., 2020; Casey et al., 2018; DePascale et al., 2021; L. Elliott et al., 2017; Lombardi & Dearing, 2020; Thippaana et al., 2020) et enfin celles mesurant ces échanges dans une salle mise à disposition à l'école (Ramani et al., 2015; Zhou et al., 2006; Zippert et al., 2020).

Les enregistrements en laboratoire ou à l'école ont majoritairement été réalisés à partir d'une situation de jeu (« jeu » défini au sens large, incluant notamment des situations de lecture de livres), avec plus ou moins de libertés selon chacun des paradigmes expérimentaux. Certaines études ont ainsi proposé l'usage de trois types de jeux différents¹ (Casey et al., 2018; DePascale et al., 2021; Lombardi & Dearing, 2020; Ramani et al., 2015; Zippert et al., 2020). D'autres situations expérimentales se distinguent par un plus grand nombre d'objets ou de jeux mis à disposition des familles, dans l'idée de contraindre le moins possible l'interaction entre enfant et parent avec du matériel potentiellement inconnu (L. Elliott et al., 2017; Thippaana et al., 2020). Les enregistrements réalisés étaient d'une durée relativement courte (10 minutes ou moins ; Bachman et al., 2020; Douglas, Zippert, & Rittle-Johnson, 2019; L. Elliott et al., 2017; et jusqu'à 15 minutes ; Casey et al., 2018; Lombardi & Dearing, 2020; Mutaf-Yıldız et al., 2018b; Ramani et al., 2015; Zippert et al., 2020).

Concernant les enregistrements réalisés à domicile, certains d'entre eux étaient très similaires à ceux obtenus en laboratoire : des durées courtes (10 à 20 minutes de jeu libre) et

¹ Adaptés d'après la tâche « *three bag task* » de Vandell (1979).

des situations semi-structurées avec un matériel spécifique fourni aux familles pour le temps de l'enregistrement¹. À l'inverse, d'autres études ont enregistré les familles à domicile de façon plus « libre » (sans aucun matériel contraint par l'étude) et sur des durées beaucoup plus longues (90 minutes par visite dans la plupart des études ; Glenn et al., 2017; Gunderson & Levine, 2011; Levine et al., 2010).

Dans la grande majorité des études, la réalisation des enregistrements à domicile nécessitait la présence d'un expérimentateur sur place pendant la durée des interactions. Deux exceptions sont à noter cependant. Susperreguy et Davis-Kean (2016) ont tiré parti du dispositif d'enregistrement LENA (déjà mentionné en section 2.3 de ce chapitre) pour enregistrer les interactions sur deux journées entières consécutives, sans la présence d'examineurs au domicile (ils ont ensuite analysé les échanges langagiers survenus au moment de chacun des repas, soit quatre heures d'interactions verbales analysées par famille). En plus de leurs enregistrements réalisés au laboratoire, Thippana et collaborateurs (2020) ont également réalisé de courts appels vidéos avec les familles afin d'enregistrer à distance deux sessions de jeux libres de 10 minutes (sans matériel de jeu prédéfini et sans présence d'expérimentateurs au domicile familial).

3.2.2. Grande variabilité des mesures utilisées pour caractériser le langage mathématique employé

Le langage mathématique, dans son acceptation la plus courante à travers la littérature², fait référence aux « mots-nombres » (c.-à-d. aux unités de la chaîne numérique verbale) et a été mesuré de façons très variées à travers la littérature (Zhou et al., 2006). Dans le cadre de l'environnement familial de numératie, les mesures utilisées ont visé à comptabiliser *a minima* la quantité de « mots-nombres » employée par les parents pendant le temps de l'enregistrement (Bachman et al., 2020; Glenn et al., 2017; Gunderson & Levine, 2011; Levine et al., 2010; Ramani et al., 2015; Thippana et al., 2020; Zippert et al., 2020).

Pour davantage de précision, différentes catégorisations des mots-nombres employés ont parfois été utilisées : selon leur « taille » (« petits » mots-nombres de 1 à 4, « moyens » mots-nombres de 5 à 10 et « grands » mots-nombres au-delà de 10 ; DePascale et al., 2021; L. Elliott et al., 2017; Gunderson & Levine, 2011) ou selon leur usage (du type « indiquer la cardinalité d'un ensemble », « compter », « nommer des symboles » ou « réaliser des opérations » ; Bachman et al., 2020; Casey et al., 2018; DePascale et al., 2021; Gunderson & Levine, 2011; Ramani et al., 2015; Susperreguy & Davis-Kean, 2016; Zippert et al., 2020). De façon analogue à la dissociation du degré de complexité suggérée par Skwarchuk et collaborateurs (2014) pour les activités de numératie, Ramani et collaborateurs (2015) ont proposé de distinguer les caractéristiques du langage mathématique employé comme

¹ À l'exception des enregistrements de Thippana et al. 2020 qui ont été réalisés sur une durée courte mais avec du matériel de la famille, non fourni par les expérimentateurs.

² Cependant Purpura et collaborateurs (2017) dans leur définition du « langage mathématique » font également référence au lexique « non exclusivement » numérique (c.-à-d. le langage quantitatif comme « plus que », « moins que » etc.).

« fondamentales » (comptage ou identification de nombres) ou « avancées » (cardinalité, ordinalité et arithmétique).

Par ailleurs, d'autres mesures ont aussi été réalisées sur la quantité d'incitations numériques adressées à l'enfant (p. ex. « combien de ? », « compte » ; Bachman et al., 2020; Casey et al., 2018; Levine et al., 2010; Silver et al., 2021; Uscianowski, Almeda, & Ginsburg, 2020) ou sur la mesure du nombre total de mots prononcés par le parent pendant le temps de l'enregistrement (pouvant être employée comme co-variable « contrôle » ; Casey et al., 2018; DePascale et al., 2021; L. Elliott et al., 2017; Glenn et al., 2017; Gunderson & Levine, 2011; Levine et al., 2010; Ramani et al., 2015; Thippiana et al., 2020). De façon générale, ces mesures du langage mathématique ont montré de grandes disparités entre les familles. Par exemple, sur une durée de 15 minutes de jeu en laboratoire, l'étude de DePascale et collaborateurs (2021) a permis de montrer que, parmi les 78 familles enregistrées, 50 mots-nombre avaient été utilisés en moyenne, mais avec une variabilité interfamiliale importante (écart-type de 29 mots ; un minimum 3 mots nombres employés et un maximum allant jusqu'à 156 mots-nombres).

3.2.3. Relations mixtes entre caractéristiques du langage mathématique employé et compétences numériques chez l'enfant

Un tableau très hétérogène ressort de l'évaluation des relations entre les mesures de langage mathématique adressé à l'enfant et les compétences mathématiques de ce dernier.

- *Relations entre langage mathématique et score de l'enfant, évalués de façon concomitante*

Deux études ont permis de montrer l'existence d'un lien positif entre les caractéristiques du langage mathématique et les compétences des enfants évaluées sur une même période (L. Elliott et al., 2017; Ramani et al., 2015). Les résultats d'Elliott et collaborateurs (2017) ont indiqué que la quantité de « grands » mots-nombres employés par les parents pendant 10 minutes de jeu libre (situation standardisée en laboratoire) était en lien avec les compétences mathématiques de 44 enfants américains âgés de 6 ans (score à une échelle composite de tests symboliques ; voir **Figure 33** tirée de L. Elliott et al., 2017).

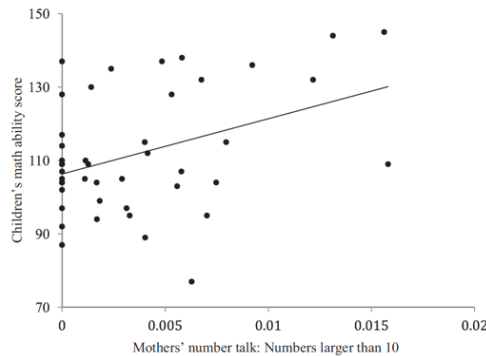


Figure 33 : Figure tirée de Elliott et al. (2017) permettant d'illustrer l'association ($r=.39$, $p=.01$) concomitante entre la proportion d'emploi par la mère de « grands » mots-nombres (c.-à-d. mots-nombres supérieurs à 10, par rapport au nombre total de mots employés ; en abscisse) et les compétences mathématiques des enfants (score composite au TEMA-3, Ginsburg & Baroody, 2003; en ordonnée). $N=44$

À partir de données obtenues pendant 15 minutes d'enregistrement réalisé via un matériel spécifique (« Three Bag Tasks », Vandell, 1979), les résultats de Ramani et collaborateurs (2015) ont permis aux auteurs de proposer une relation entre usages d'un langage mathématique « avancé » par les parents et scores mathématiques « avancés » des enfants de 4 ans (connaissances des principes de comptage, compétence de dénombrement et de cardinalité, précision sur la ligne numérique symbolique et comparaison symbolique ; Ramani et al., 2015). Par ailleurs, leurs données étaient en faveur d'une absence de relation avec les scores de mathématiques considérés comme plus « basiques » (comptine numérique et lecture de nombres) ou avec l'emploi d'un langage mathématique plus « basique » (Ramani et al., 2015). Toutefois, ces deux études mises à part, l'ensemble des autres études ont obtenu des résultats en faveur d'une absence de relation entre le langage mathématique employé par les parents et les compétences mathématiques concomitantes des enfants américains, belges ou chinois de 4 ans à 5,5 ans (DePascale et al., 2021; Douglas et al., 2019; Mutaf-Yıldız et al., 2018b; Silver et al., 2021; Zhou et al., 2006; Zippert et al., 2020). Les résultats de l'étude de Mutaf-Yıldız et collaborateurs (2018b) ont même montré une relation négative.

• *Relations entre langage mathématique et score de l'enfant, évalués de façon longitudinale*

D'autres études ont visé à étudier les relations longitudinales entre mesures du langage mathématique réalisées précocement et évaluation des compétences des enfants dans un temps ultérieur. Ces études ont toutes convergé à identifier des résultats en faveur d'une relation longitudinale positive sur les compétences en mathématiques d'enfants âgés de 3 à 7 ans lors de leurs évaluations (Glenn et al., 2017; Gunderson & Levine, 2011; Levine et al., 2010; Susperreguy & Davis-Kean, 2016; Thippa et al., 2020). Par exemple, Levine et collaborateurs (2010) ont rapporté que les mesures précoces du langage mathématique parental (réalisées à partir d'enregistrements à domicile, répétées entre les 14 à 30 mois de l'enfant) étaient liées à la compréhension du principe de cardinalité de ce dernier à l'âge de 3 ans (voir **Figure 34**, tirée de Levine et al., 2010).

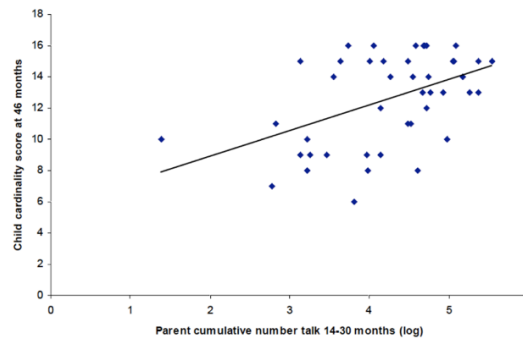


Figure 34 : Figure tirée de Levine et al. (2010) permettant d'illustrer la relation longitudinale entre quantité cumulée de mots-nombres prononcés par le parent en direction de l'enfant lorsque celui-ci était âgé de 14 à 30 mois (en abscisse, transformée en score logarithmique) et les compétences de cardinalité de l'enfant à 36 mois (en ordonnée) $N=44$

Deux études montrant une relation longitudinale entre langage mathématique et compétences numériques des enfants portaient sur des données tirées de la cohorte américaine NICHD¹ (Casey et al., 2018; Lombardi & Dearing, 2020). Le protocole expérimental de cette cohorte longitudinale avait intégré une mesure d'enregistrement des interactions langagières entre les enfants de 3 ans et leur mère, à l'aide d'une tâche équivalente à celle du « Three Bag Tasks » (Vandell, 1979). L'analyse des données de cette cohorte a permis de révéler que le langage numérique employé par la mère était lié aux compétences arithmétiques (Woodcock et al., 2001) des enfants à 4,5 ans et 6,5 ans, et cela indépendamment d'autres caractéristiques spécifiques (comme le soutien familial d'apprentissage général, l'enthousiasme et la persistance des enfants pendant la tâche ou l'estimation, par la mère, des compétences mathématiques de l'enfant au moment de l'enregistrement ; Casey et al., 2018; Lombardi & Dearing, 2020).

De façon surprenante, et sans que cela ait été discuté à notre connaissance, la disparité des résultats apparaît donc beaucoup plus grande en ce qui concerne les études qui ont cherché à évaluer les relations de façon concomitante que celles ayant évalué ces relations de façon longitudinale². À priori, ces différences ne nous semblent pas pouvoir être expliquées par la situation expérimentale (domicile familial ou non) ou par les mesures utilisées pour qualifier le langage mathématique ou évaluer les compétences des enfants. Par ailleurs, il n'existe pas, à notre connaissance, de modèle théorique permettant de supposer l'existence de relations davantage longitudinales que concomitantes (à moins de considérer une certaine stabilité dans les stimulations familiales d'apprentissage, auquel cas ces relations pourraient s'expliquer par d'autres caractéristiques plus tardives de l'environnement familial de numératie³). Cependant,

¹ Cohorte NICHD, déjà évoquée dans les chapitres 1 et 3.

² Cependant la méta-analyse de Dunst et collaborateurs (2017) réalisée sur un faible nombre d'études rapportait déjà une moyenne de tailles d'effet plus importante pour les relations longitudinales, comparativement à celles mesurées de façon concomitante ($r=.59$ contre $r=.18$). Cette différence n'était cependant pas retrouvée dans la méta-analyse plus conséquente de Daucourt et collaborateurs (2021).

³ On discutera de cet aspect d'éventuelle stabilité du HNE dans la section 3.10.3 de ce chapitre.

la très grande variété des protocoles expérimentaux employés à travers les différentes études est tout à fait susceptible de participer à cette faible cohésion globale des relations observées.

De façon générale, dans la méta-analyse récente de Daucourt et al. (2021) était souligné le fait que les relations avec les compétences des enfants obtenues à l'aide des mesures de langage étaient globalement plus faibles que celles obtenues à l'aide des mesures des activités de numératie par questionnaire ($r=.03$ contre $r=.20$). Il est possible que les différents types de situations expérimentales utilisées pour la réalisation des enregistrements aient participé à accroître le phénomène d'hétérogénéité. Par exemple, dans l'étude de Mutaf-Yıldız et collaborateurs (2018b), les relations objectivées entre langage mathématique du parent et compétences de l'enfant dépendaient du type d'activités réalisées par le parent et l'enfant (la relation était nulle lorsque l'activité observée était dédiée à la lecture d'un livre, elle était négative lorsque l'activité observée était dédiée à la construction de Lego). Après de 97 familles d'enfants de 4 ans, Thippana et collaborateurs (2020) ont réalisé des mesures du langage mathématique à la fois en laboratoire et à domicile. Ces données leur ont permis de souligner une dissociation des résultats obtenus selon la situation expérimentale. Plus précisément, les mesures de langage mathématique mesurées à domicile et celles mesurées au laboratoire n'étaient pas corrélées entre elles et seules celles obtenues à domicile étaient liées aux compétences mathématiques des enfants. Pour les auteurs, ces résultats signaleraient que les mesures du langage mathématique obtenues en laboratoire seraient un faible indicateur des pratiques de langage ayant lieu dans le cadre routinier au domicile familial. Au laboratoire, les familles seraient exposées à un matériel de jeu nouveau (potentiellement très différent de celui disponible au domicile familial) et pourraient ainsi chercher davantage à explorer et discuter les caractéristiques de celui-ci (Thippana et al., 2020). Sans contester la pertinence des mesures de langage mathématique réalisées en laboratoire, les interactions enregistrées à partir de ces contextes « structurés » pourraient refléter un processus sous-jacent très différent de celui mesuré lors des enregistrements au domicile dans un contexte plus familial. À travers cette dichotomie observée entre leurs mesures de langage mathématique, Thippana et collaborateurs (2020) ont attiré l'attention sur l'importance de considérer le type d'activités à partir desquelles les mesures de langage mathématique sont réalisées (notamment la manipulation d'objets familiers comparativement à celle d'objets nouveaux ; Thippana et al., 2020).

3.3. Mesures du langage mathématique employé et mesures des activités de numératie réalisées

3.3.1. Dissocier les mesures de langage mathématique selon les activités réalisées

La prise en considération du type d'activités réalisées pendant la mesure du langage numérique apparaît donc comme une question cruciale. Cette problématique avait déjà été mise en avant dans l'étude du langage échangé au sein de la famille (en montrant notamment que la

situation de lecture de livres était susceptible de modifier radicalement les caractéristiques du langage employé avec l'enfant ; Montag, Jones, & Smith, 2015)¹.

Cette distinction des caractéristiques du langage mathématique employé selon les activités pourrait en effet être doublement informative. Ces analyses pourraient tout d'abord jouer un rôle « confirmatoire » : les activités catégorisées comme étant des activités de numération entraînent-elles réellement plus de langage mathématique ? À partir de l'étude des caractéristiques du langage mathématique survenant au domicile avec des objets du quotidien, l'étude de Thippana et collaborateurs (2020) avait permis de montrer une dissociation selon les objets employés. Les occurrences de langage mathématique survenaient de façon largement supérieure pendant les activités qualifiées (au préalable) comme relevant du domaine de la numération.

Néanmoins, certains enregistrements ont aussi permis de souligner le rôle potentiel d'activités de prime abord peu concernées par la numération. Susperreguy et Davis Kean (2016) ont par exemple centré leurs analyses sur les échanges langagiers au cours des repas. Ces moments de partage (distincts des moments de préparation des repas) ont conduit à identifier un phénomène de grande variabilité interfamiliale dans les caractéristiques du langage mathématique employé (ces caractéristiques étaient par ailleurs en lien avec les compétences mathématiques des enfants un an après ; Susperreguy & Davis-Kean, 2016). En somme, ces résultats signalaient que les enfants étaient susceptibles d'être exposés à du contenu mathématique pendant des activités du quotidien *a priori* non identifiées comme susceptibles de les y exposer.

Bien que ce constat ne doive pas être négligé, il nous semble néanmoins intéressant de replacer ces observations dans un contexte plus large en les comparant à d'autres mesures réalisées pendant des activités labélisées, celles-ci, comme « numériques » (des enregistrements réalisés à partir d'une situation en laboratoire offrant l'usage de 3 jeux « numériques » ; DePascale et al., 2021).

De prime abord, les disparités rapportées sur la quantité de mots-nombres employés dans chacune des deux études peuvent sembler équivalentes (de 3 à 156 mots-nombres prononcés selon les familles pour DePascale et al., 2021 ; et de 4 à 195 mots-nombres prononcés selon les familles pour Susperreguy & Davis-Kean, 2016). Cependant, une fois considérées les différences de durée des mesures, la différence devient frappante : les mesures de Susperreguy et Davis Kean étaient réalisées sur une durée 16 fois plus importante que celles de DePascale et collaborateurs (4 heures d'enregistrement pour les premières contre 15 minutes pour les secondes). De façon analogue, Thippana et collaborateurs (2020) ont aussi rapporté un usage du langage mathématique pendant des activités identifiées comme ne relevant pas de la numération, mais dans une quantité trois fois moindre (comparativement à celles identifiées comme relevant de la numération). Bien que signalant l'emploi du langage mathématique en

¹ Voir section A3.2 de l'annexe 3.

dehors de ces activités¹, ces études auraient donc tendance à confirmer que les activités identifiées comme relevant de la « numératie » au sein des questionnaires utilisés pourraient bien correspondre aux activités les plus susceptibles d’entraîner des échanges mathématiques à une échelle d’étude plus « microscopique ».

Dans un second temps, nous suggérons que la prise en considération des aspects de langage mathématique selon les activités réalisées pourrait apporter un degré qualitatif supplémentaire dans l’analyse de ces activités. En permettant de compléter ou dépasser la dissociation selon le degré de complexité des activités, ces analyses pourraient-elles permettre d’affiner le modèle de différenciation de la qualité des activités familiales de numératie ? Il semblerait en effet que certains types d’activités de numératie pourraient être plus susceptibles que d’autres de solliciter l’usage du langage mathématique. Par exemple, Zhou et collaborateurs (2006) ont montré que l’emploi du langage mathématique était plus fréquent chez les parents pendant les activités de lecture partagée ou d’exercices de mathématiques, comparativement à des activités de jeux de blocs ou de jeu libre (à partir d’une simple feuille de papier). Douglas et collaborateurs (2019) ont aussi montré que, à partir d’un même ensemble de cartes à jouer (représentant des quantités), le type de jeu engagé par la dyade enfant-parent était différemment lié à la quantité de mots-nombres employée par le parent (le jeu appelé « *War* », qui supposait des comparaisons de quantités, était plus corrélé aux occurrences de mots-nombres prononcés par le parent). Zippert et collaborateurs (2020) avaient montré des variations du langage mathématique au cours de trois activités de numératie (jeux de cartes numériques, jeux de blocs et jeux avec des perles, voir **Figure 35**).

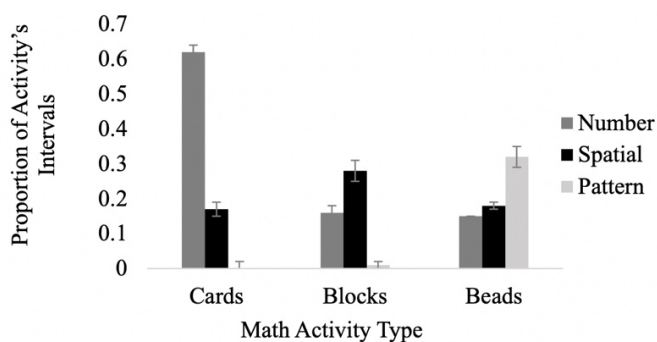


Figure 35 : Figure tirée de Zippert et al. (2020) illustrant les différentes proportions (en ordonnée) du type d’échanges langagiers initiés par le parent pendant la durée totale de l’enregistrement (échanges codés par intervalle de 10 secondes) selon les activités réalisées (cartes, blocs et perles, en ordonnée). En gris foncé sont représentés les échanges numériques (*Number*), en gris clair sont représentés les échanges sur les schémas (*Pattern*) et en noir sont représentés les échanges spatiaux (*Spatial*). Les barres d’erreur représentent les écarts-types. $N=45$

Enfin, l’étude menée par Mutaf-Yıldız et collaborateurs (2018b) a aussi permis de dissocier le langage mathématique employé par les parents selon deux types d’activités de

¹ Ces résultats peuvent néanmoins inviter à s’interroger sur l’intérêt de mesurer les aspects de littératie et de numératie de façon conjointe au sein d’une même étude, on discutera de cet aspect dans la section 3.10.2 de ce chapitre.

numératie (« lego » et « livres avec des aspects de nombres »). Pour ces deux activités, il n'existait pas de différence sur la quantité générale de mots-nombres employée par les parents, mais des dissociations plus fines s'observaient sur les modalités d'usage des mots-nombres. Plus précisément, l'activité de lego était plus susceptible d'être liée à un emploi du langage mathématique pour « désigner la cardinalité » ou « ordonner des quantités » ; tandis que l'activité de lecture du livre avec des aspects de nombres était plus susceptible d'être liée à un emploi du langage mathématique pour « lire les nombres » ou « employer d'autres types de mots-nombres (comme « none » ou « both » ; Mutaf-Yıldız et al., 2018b).

Pris ensemble, ces résultats suggèrent que les activités familiales de numératie, à « difficulté » égale, seraient susceptibles d'entraîner des différences importantes dans les aspects numériques du langage employé. Pour tenir compte de ces disparités et obtenir une mesure plus complète des stimulations familiales dans le domaine de la numératie, il pourrait être pertinent de combiner des mesures des activités familiales de numératie obtenues à l'aide questionnaires et des mesures du langage mathématique adressé à l'enfant à l'aide d'enregistrements.

3.3.2. Combiner les mesures des activités familiales de numératie et de langage mathématique

Face au « biais de mono-évaluation » souligné par Bachman et collaborateurs (2020), quelques études ont cherché à combiner les mesures classiques du HNE par des questionnaires à des mesures du langage mathématique. Ces études ont produit des résultats mixtes. Ainsi, il apparaît une dissociation entre les mesures obtenues à partir des enregistrements réalisés à domicile avec les propres objets de la famille (Silver et al., 2021; Thippa et al., 2020) et celles réalisées à partir de situations standardisées à domicile ou au laboratoire (avec un matériel prédéfini par les expérimentateurs ; Bachman et al., 2020; K. N. Missall et al., 2017; Mutaf-Yıldız et al., 2018b; Thippa et al., 2020). En effet, seules les premières (réalisées au domicile avec les objets familiaux) étaient positivement liées aux mesures des activités de numératie obtenues par questionnaire.

Concernant les relations de ces différentes mesures avec les compétences mathématiques des enfants, il est plus compliqué de suggérer un axe de compréhension à l'hétérogénéité des résultats obtenus. Parmi les deux études qui avaient montré un lien entre scores au questionnaire et langage mathématique à partir d'objets « familiaux », la première a montré que les compétences des enfants ne corrôlaient qu'avec le score au questionnaire (Silver et al., 2021) tandis que la seconde a montré une relation avec chacune des mesures (pour la mesure du langage mathématique à domicile, Thippa et al., 2020). Parmi les études qui avaient utilisé des mesures du langage à partir de situations « standardisées », là aussi les résultats sont hétérogènes. Deux études n'ont montré une relation des compétences des enfants qu'avec le score d'activités de numératie au questionnaire (Mutaf-Yıldız et al., 2018b; pour la mesure du langage mathématique au laboratoire chez Thippa et al., 2020) tandis qu'une autre a non seulement montré l'existence d'une relation avec les deux types de mesures, mais a en plus souligné une dissociation dans la relation selon la complexité des habiletés numériques

évaluées chez les enfants (« compétences basiques » avec scores d'activités informelles de numératie et « compétences complexes » avec caractéristiques de langage mathématique « avancées »; Ramani et al., 2015)¹.

En l'état actuel des connaissances, la prise en compte des mesures de langage mathématique en plus de celles de la fréquence des activités de numératie ne semble pas permettre une lecture plus homogène des résultats concernant les liens entre environnement familial de numératie et compétences numériques chez l'enfant.

3.4. Conclusion intermédiaire : relations hétérogènes, mais robustes entre stimulations familiales et compétences chez l'enfant dans le domaine des mathématiques

Malgré les tentatives pour définir un cadre théorique heuristique du HNE, tel que proposé d'abord par LeFevre et al. (2009) puis complété par Skwarchuk et al. (2014), l'étude des relations entre scores d'activités familiales de numératie et habiletés numériques des enfants peine à faire émerger un modèle compréhensible et robuste de ces relations (pour revue, voir (L. Elliott & Bachman, 2018a; Mutaf-Yıldız et al., 2020). Néanmoins, il est important de souligner que, même si les études réalisées ne permettent pas de dessiner un modèle clair de compréhension du profil d'activités familiales, cela ne devrait sans doute pas conduire à renoncer à l'étude de leurs relations avec les compétences des enfants. Dans leur revue de la littérature, Mutaf-Yıldız et collaborateurs (2020) ont souligné que, malgré tout, sur 37 études publiées de 1997 à 2019², 33 avaient montré l'existence de relations entre compétences mathématiques des enfants et stimulations familiales (mesurées comme activités de numératie ou langage mathématique).

De façon générale, la très grande variabilité des mesures utilisées pour qualifier le langage ou les activités peut amener à s'interroger sur les méthodes d'élaboration de ces scores. Les nouvelles modalités de recours au pré-enregistrement des hypothèses de recherche, comme c'est le cas dans l'étude de DePascale et collaborateurs (2021), permettront sans doute de participer à la réduction de cette hétérogénéité en distinguant hypothèses confirmatoires et exploratoires.

Cependant, il nous semble important de rapporter les résultats de l'analyse « *p-curve* » (Simonsohn, Nelson, & Simmons, 2014b, 2014a) réalisés par Mutaf-Yıldız et collaborateurs (2020) afin de tester si les résultats recensés dans leur revue étaient soumis à un biais de publication ou pouvaient au contraire indiquer une relation réelle entre environnement familial de numératie et compétences des enfants. L'analyse « *p-curve* » suppose que la forme finale obtenue à la courbe de *p* (c.-à-d. l'ensemble des valeurs de *p* rapportées dans les études, faibles <.01 ou élevée =0.04) puisse indiquer la vraisemblance d'un effet véritable (plutôt qu'un effet

¹ L'étude de Ramani et al. (2015) n'a cependant pas discuté de la relation entre score d'activités informelles de numératie et caractéristiques du langage mathématique.

² La méta-analyse de Mutaf-Yıldız et al. (2020) a utilisé les bases de données suivantes : ERIC (EBSCOhost) et Web of Science (SSCI).

de « *p hacking* »). Les statistiques de test disponibles (*r*, *t*, *z*, *f*, *F* ou χ^2) de chaque étude ainsi que les degrés de liberté ont été entrés dans l'application qui a ensuite recalculé les valeurs de *p* (pour que les valeurs soient indépendantes les unes des autres, il n'a été utilisé qu'un seul test statistique par article recensé¹). Au total, l'analyse a été réalisée sur 28 articles pour lesquels des relations significatives étaient rapportées et/ou les valeurs des tests statistiques précisés. Le résultat final de leur analyse « *p-curve* » était en faveur d'un effet réel de la relation positive entre stimulations familiales de numératie et compétences mathématiques des enfants rapportées dans les études recensées (**Figure 36** tirée de Mutaf-Yıldız et al., 2020).

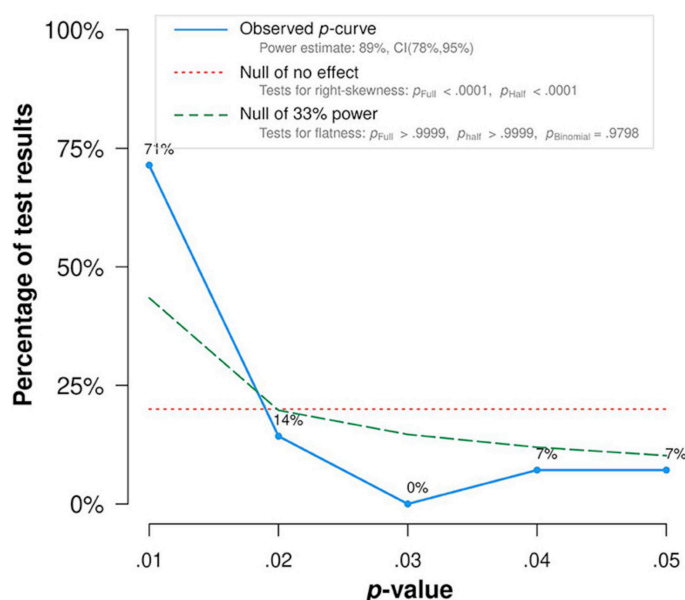


Figure 36 : Figure tirée de Mutaf-Yıldız et al. (2020) rapportant la courbe des valeurs de *p* observées dans leur revue de la littérature sur la relation entre activités familiales de numératie et compétences mathématiques des enfants. Les deux lignes pointillées sont des lignes de référence : la ligne de pointillés rouges et courts représente une distribution attendue des valeurs de *p* lorsqu'il n'y a pas d'effet réel ; la ligne de pointillés verts et longs représente la distribution attendue des valeurs de *p* lorsqu'il y a un effet réel. La courbe *p* observée pour l'ensemble des études rapportées (représentée par la ligne pleine et bleue) indique que les petites valeurs de *p* sont plus nombreuses (p. ex. $p=0.01$) que les valeurs de *p* plus grandes (p. ex. $p=0.04$), en accord avec la présence d'un effet *réel*, avec une puissance statistique élevée (89%).

Des voies supplémentaires sont également à considérer pour comprendre ce phénomène d'hétérogénéité globale de la littérature. Plutôt que de proposer d'aborder les stimulations familiales dans le domaine des mathématiques à un niveau de détail encore plus précis (p. ex. avec des notions comme celle de « discours de haut niveau orienté vers la tâche » proposées par Son & Hur, 2020), nous suggérons au contraire de décentrer à présent l'échelle de l'étude de l'environnement familial de numératie de l'étude des seules stimulations familiales pour considérer également d'autres caractéristiques susceptibles de jouer un rôle fondamental.

¹ Mutaf-Yıldız et al. (Mutaf-Yıldız et al., 2020) précisent que pour que ce choix reste objectif, ils ont suivi la recommandation de Simonsohn (2014) et choisi arbitrairement d'inclure dans l'analyse le premier résultat rapporté dans les articles qui en contenaient plusieurs.

3.5. Modèle du Home Numeracy Environment (HNE) : la prise en compte des traits parentaux

3.5.1. Un renouveau du modèle théorique initial

Tout comme cela avait été suggéré dans le cadre de l'étude des activités familiales de littératie¹, le modèle théorique du HNE proposé par Skwarchuk et collaborateurs (2014; en complément de celui de LeFevre et al., 2009) proposait d'inclure des variables concernant les traits parentaux (les attitudes des parents vis-à-vis des mathématiques et leurs attentes concernant la réussite scolaire de leurs enfants). Cette proposition n'était pas nouvelle puisque la même équipe avait déjà souligné dans un article antérieur l'importance des traits parentaux sur la réussite en mathématiques de leurs enfants (Skwarchuk, 2009). Néanmoins, dans un premier temps, très peu d'études ont cherché à inclure ces caractéristiques. Une revue de la littérature, portant sur des articles publiés jusqu'en 2017, soulignait ainsi le manque de compréhension des raisons susceptibles de pousser certains parents à engager un plus fort soutien aux activités mathématiques (L. Elliott & Bachman, 2018a). De façon analogue, à la même période, la méta-analyse de Dunst et collaborateurs (2017) ne recensait que quelques études ayant inclus les traits parentaux.

En conséquence, dans un second article de revue, Elliott et collaborateurs (2018c) proposaient une représentation, très schématique, des potentiels liens avec chacune des variables familiales, des plus distales aux plus proximales, ainsi que leurs liens avec les compétences en mathématiques de ce dernier (voir **Figure 37**).

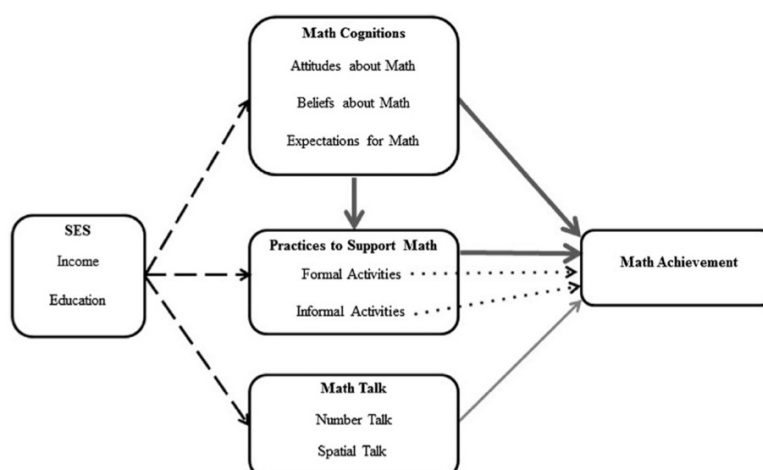


Figure 37 : Schéma adapté de Elliott et al. (2018c) représentant leur conceptualisation qualifiée « d'hybride » des liens entre les caractéristiques distales et proximales de l'environnement familial (SES, cognitions mathématiques des parents, activités familiales de numératie, langage mathématique) avec les compétences mathématiques des enfants.

¹ Voir annexe 3 et section 2.4 de ce chapitre.

Cette nécessaire prise en compte des différents traits parentaux tels que représentés sur la **Figure 37** a fait l'objet de nouvelles formalisations théoriques récentes (Dowker, 2021; Napoli, Korucu, Lin, Schmitt, & Purpura, 2021; Susperreguy, Douglas, et al., 2020). Susperreguy et collaborateurs (2020) ont ainsi proposé d'étendre et compléter le modèle théorique de Skwarchuk et al. (2014), notamment en incluant des indicateurs sur le niveau d'étude des parents et leurs relations éventuelles avec les activités familiales de numératie. Dans un article de revue, Dowker (2021) a exposé un véritable argumentaire sur la nécessité d'intégrer aux modèles d'environnement familial de numératie les variables trop souvent négligées concernant les cognitions parentales vis-à-vis des mathématiques (leurs attentes et attitudes). Dans une perspective de remédiation, afin de déterminer les meilleures « manières d'encourager » les familles à engager davantage d'interactions en lien avec la numératie, Napoli et collaborateurs (2021) ont aussi revendiqué la compréhension des facteurs parentaux (et leurs liens avec les stimulations familiales de numératie) comme une étape tout aussi importante que l'identification de ces stimulations elles-mêmes. Enfin pour compléter les grandes lignes de ce renouvellement théorique, soulignons que la méta-analyse de Daucourt et collaborateurs (2021) a été réalisée en considérant la variable HNE comme un ensemble de facteurs allant des stimulations (activités de numératie ou langage mathématique) jusqu'aux « cognitions mathématiques » des parents (attentes et attitudes vis-à-vis des mathématiques). Les analyses conduites dans le cadre de cette méta-analyse ont également permis de conclure que l'hétérogénéité des résultats rapportés ne semblait pas imputable à une seule caractéristique de l'environnement familial de numératie. L'idée générale est donc qu'il serait informatif de se décentrer des stimulations familiales dans le domaine de la numératie (ce que les parents « font ») pour identifier certains traits parentaux susceptibles de jouer un rôle important également (ce que les parents « sont »; pour revue voir L. Elliott & Bachman, 2018c).

3.5.2. Identifier les traits parentaux pertinents à la compréhension de l'environnement familial d'apprentissage en numératie

Dans un article de revue concernant les influences parentales sur le développement des compétences académiques des enfants, entendues au sens large, Taylor et collaborateurs (2004) avaient proposé une décomposition des traits parentaux en trois catégories : les « cognitions » parentales par rapport à l'école (leur attente sur la réussite scolaire, leurs croyances sur le développement de l'enfant), les « expériences personnelles » (leurs propres habitudes, attitudes ou compétences vis-à-vis des domaines académiques) et les influences socio-économiques (et culturelles). Dans le cadre de l'étude des traits parentaux dans l'environnement familial de numératie, les « cognitions mathématiques » des parents seront définies à partir des notions « d'attentes » et « d'attitude »¹.

Dans cette section, nous présenterons les analyses ayant porté sur l'étude de ces traits parentaux ; en partant de ceux plus susceptibles d'être « proximaux » vis-à-vis des expériences

¹ On souligne néanmoins que certaines études ont parfois combiné les traits parentaux (Dowker, 2021).

d'apprentissage de numératie de l'enfant au sein du foyer pour terminer par les plus « distaux ». Plus explicitement, seront présentées, dans un premier temps, les études en lien avec les attentes parentales vis-à-vis de la réussite en mathématique de leur enfant, puis celles portant sur les attitudes parentales (dans le domaine des mathématiques) et enfin seront présentées les études ayant considéré les caractéristiques familiales socio-économiques ou culturelles.

De façon systématique, nous présenterons les liens entre chacun de ces traits parentaux avec les autres caractéristiques de l'environnement familial de numératie, mais aussi avec les compétences mesurées chez les enfants. Nous montrerons que ces traits parentaux sont susceptibles de participer aux compétences des enfants de façon directe ou indirecte (comme suggéré dans le modèle de Skwarchuk et al., 2014). Afin de proposer une lecture claire des études recensées dans cette section, deux voies de compréhension de ces relations peuvent être suggérées.

Une première voie (« indirecte ») correspondrait aux études ayant mis en évidence des résultats en faveur d'une relation entre traits parentaux et les caractéristiques « quantifiables » des stimulations de numératie. Une seconde voie (« directe ») correspondrait aux études ayant mis en évidence des résultats en faveur d'une relation entre les traits parentaux et les habiletés numériques des enfants. Pour cette seconde voie, différentes interprétations semblent possibles. Une première pourrait être que les traits parentaux seraient liés aux compétences des enfants via leurs relations avec des stimulations de numératie (de façon « indirecte »), mais à un niveau non « objectivable ». En effet, il serait vain d'imaginer capturer l'entièreté des variations possibles des stimulations familiales de numératie, notamment dans leurs aspects qualitatifs. Les traits parentaux pourraient aussi être liés aux compétences des enfants via leurs relations avec d'autres types de stimulations familiales (non liées aux aspects de numératie, ou même d'apprentissage). Enfin, une dernière possibilité serait que certains traits parentaux pourraient être liés aux compétences des enfants par un phénomène d'héritabilité, indépendant des stimulations familiales (de façon « directe »). Ces interprétations alternatives, non exclusives, seront étayées au cours de cette section.

Enfin, dans l'ensemble, bien que l'objectif de cette section soit d'offrir une lecture la plus large possible des travaux sur le sujet (ayant inclus, a minima, un trait parental dans l'étude du HNE), la majorité des études ont examiné ces relations de façon très parcellaire. Peu d'entre elles ont proposé l'étude conjointe des relations entre l'ensemble de traits parentaux, des stimulations de numératie familiales et les compétences numériques des enfants (Yuejuan Pan, Yang, Li, Liu, & Liu, 2018), d'où les formalisations récentes encourageant à davantage d'études « complètes » sur l'ensemble des différentes facettes de l'environnement familial de numératie (Dowker, 2021; Napoli et al., 2021; Susperreguy, Douglas, et al., 2020).

3.6. Influence des attentes des parents vis-à-vis de la réussite scolaire de leur enfant

3.6.1. Mesure du niveau d'attentes parentales

Les attentes parentales concernant la réussite scolaire de leurs enfants pourraient tenir un rôle clé dans l'environnement familial de numératie et la réussite de leur enfant (DeFlorio

& Beliakoff, 2015; Kleemans et al., 2012; Skwarchuk et al., 2014; pour des méta-analyses sur le contexte d'apprentissage académique plus général, voir Fan & Chen, 2001; Jeynes, 2005). Dans les modèles proposés par Skwarchuk et al. (2014) ou LeFevre et al. (2009), ainsi que dans plusieurs études par la suite (De Keyser et al., 2020; DeFlorio & Beliakoff, 2015; L. Elliott et al., 2017; Kleemans et al., 2012; LeFevre et al., 2009; Río et al., 2017; Skwarchuk et al., 2014; Wei et al., 2020), ces attentes ont été évaluées en demandant aux parents d'indiquer l'importance attribuée au fait que leur enfant acquiert diverses compétences spécifiques avant une étape ultérieure de sa scolarité. Plus précisément, dans le questionnaire proposé par Skwarchuk et collaborateurs (2014), les parents devaient indiquer sur une échelle d'importance en 5 points (allant de « pas du tout important » à « extrêmement important »), l'importance que leur enfant sache « compter jusqu'à 10 », « compter jusqu'à 100 », « lire des nombres jusqu'à 100 », « réaliser des additions simples », « compter jusqu'à mille » ou « connaître les multiplications » avant l'entrée en CP. Ces repères d'acquisition ont aussi pu être évalués en demandant aux parents d'indiquer l'âge auquel ils estimaient que leur enfant aurait acquis certaines compétences spécifiques (Yuejuan Pan et al., 2018; Segers et al., 2015) ou de façon plus large en évaluant leurs croyances sur certaines acquisitions, étapes développementales ou encore le rôle joué par la famille dans ces acquisitions (Cannon & Ginsburg, 2008; DeFlorio & Beliakoff, 2015; L. Elliott, Bachman, & Henry, 2020; Sonnenschein, Metzger, & Thompson, 2016; Tazouti, Malarde, & Michea, 2010).

Les relations entre ces attentes parentales et les compétences des enfants en numératie ont été testées soit de façon indirecte, via les stimulations numériques de l'enfant au sein du domicile familial, soit de façon directe (indépendamment des mesures de stimulations numériques).

3.6.2. Relation indirecte : liens entre attentes parentales et stimulations numériques de l'enfant

Selon le modèle proposé par Skwarchuk et collaborateurs (2014), les attentes des parents seraient liées aux pratiques formelles de numératie qu'ils partageraient avec leur enfant. Cette proposition est cohérente avec plusieurs théories préexistantes (et reprises dans des articles récents). Par exemple, dans l'article de Silver et collaborateurs (2021), il est fait référence à la théorie de « l'espérance-valeur » (« Expectancy–Value Theory of Achievement Motivation » de Wigfield & Eccles, 2000) pour suggérer que, selon la valeur accordée à la tâche, la probabilité de l'accomplir en retour pourrait augmenter. La théorie des « objectifs d'apprentissage » (Friedel, Cortina, Turner, & Midgley, 2007; cité par Cheung & Kwan, 2021) indique que, dans le cadre des apprentissages, les objectifs parentaux sur les compétences futures de leurs enfants pourraient déterminer leurs comportements pour étayer ces compétences à domicile.

En dehors de ces propositions théoriques, la relation entre attentes parentales et activités familiales de numératie a été massivement répliquée dans la littérature, que les activités de numératie soient mesurées par des questionnaires ou par les aspects du langage mathématique employé (Cannon & Ginsburg, 2008; De Keyser et al., 2020; L. Elliott et al., 2020; Kleemans et al., 2012, 2018; K. Missall et al., 2015; Napoli et al., 2021; Yuejuan Pan et al., 2018; Río et

al., 2017; Segers et al., 2015; Skwarchuk, 2009; Skwarchuk et al., 2014; Sonnenschein et al., 2012; Susperreguy, Douglas, et al., 2020; Vasilyeva et al., 2018; Wei et al., 2020). Par ailleurs, là aussi de façon cohérente avec la proposition de Skwarchuk (2014), ces activités ainsi liées aux attentes parentales pouvaient en retour être liées aux compétences des enfants, c'est-à-dire qu'il existait une relation indirecte entre attentes parentales et compétences des enfants via les stimulations parentales (DeFlorio & Beliakoff, 2015; Río et al., 2017; Vasilyeva et al., 2018; Wei et al., 2020).

On note cependant que quelques rares études ont fait exception, en ayant montré soit une absence de lien avec la fréquence rapportée des activités de numération (Kleemans et al., 2012) ou avec les aspects du langage mathématique (Douglas et al., 2019; L. Elliott et al., 2017), soit une relation négative entre attentes parentales et activités mathématiques (Susperreguy et al., 2021).

3.6.3. Relation directe : liens entre attentes parentales et compétences numériques de l'enfant

Sortant du cadre proposé par Skwarchuk (2014), certaines études ont montré des résultats en faveur d'une relation directe entre attentes parentales et compétences numériques mesurées chez l'enfant (Braham & Libertus, 2017; Galindo & Sonnenschein, 2015; Kleemans et al., 2012; Río et al., 2017; Segers et al., 2015; Silver et al., 2021; Sonnenschein et al., 2012). Ces résultats recouvraient en fait deux cas de figure différents. Dans un premier cas, la relation directe était objectivée sans que les mesures d'activités familiales de numération soient réalisées (Braham & Libertus, 2017; Galindo & Sonnenschein, 2015; Sonnenschein et al., 2012). Dans le second cas, la relation entre attente et compétences de l'enfant était objectivée indépendamment des mesures des activités familiales de numération (Kleemans et al., 2012; Río et al., 2017; Segers et al., 2015). Comme signalé précédemment, une telle relation « directe » pourrait indiquer que les mesures des activités familiales de numération n'aient pas été assez exhaustives ou précises. Elle pourrait aussi indiquer que la relation puisse s'expliquer par d'autres types de caractéristiques familiales (p. ex. par des caractéristiques émotionnelles comme celles mesurées dans l'échelle HOME ; Bradley & Caldwell, 1984a) ou encore des implications différentes dans la scolarité de l'enfant par exemple (Eccles & Harold, 1996).

Río et collaborateurs (2017) ont par ailleurs dissocié les attentes parentales selon leur niveau de complexité (en suivant le modèle de dissociation de la complexité des activités de numération suggéré par Skwarchuk et al., 2014) et ont ainsi revendiqué l'intérêt de cette dissociation en montrant que seules les attentes parentales de niveau « avancée » étaient liées aux compétences de l'enfant (et cela de façon directe, ou indirecte via les activités de numération également avancées).

3.6.4. Attentes parentales et estimation subjective des compétences de l'enfant

Reprise par Zippert et Ramani (2016), l'hypothèse de Hunt serait que la capacité des parents à estimer les compétences de leurs enfants pourrait influencer la nature des expériences

d'apprentissage proposées (Hunt, 1961). Cette question de la capacité des parents à estimer les compétences des enfants et à fournir en retour des stimulations adaptées a également été remise au centre des interrogations dans une récente revue critique de la littérature réalisée par un large groupe de chercheurs (Hornburg et al., 2021). Cette revue signalait que le niveau d'attentes parentales pourrait dépendre avant tout de leur perception des compétences de leur enfant plutôt que de leurs propres systèmes de valeurs. Cette même idée a également été discutée par Wei et collaborateurs (2020) qui suggéraient que les mécanismes des attentes parentales sur l'environnement familial de numératie pourraient gagner en intelligibilité en réalisant l'évaluation, au sein d'une même étude, du niveau d'attentes des parents ainsi que leurs perceptions du niveau de compétences de leur enfant.

À notre connaissance, à ce jour, très peu d'études ont permis d'examiner cette question et aucune n'a réellement testé l'existence de tels liens. Néanmoins certaines études indiquent l'intérêt de l'évaluation subjective, par les parents, des compétences des enfants. À partir de données collectées auprès de 43 familles américaines d'enfants de 4.5 ans, Zippert et Ramani (2016) ont mesuré les activités de numératie familiales (dissociées selon leur complexité) et le niveau de compétences des enfants sur diverses habiletés numériques ainsi que les estimations subjectives du niveau des enfants fournies par leurs parents. Les chercheurs ont ensuite évalué la précision des estimations fournies par les parents (soit exactes, soit inexactes et, dans ce cas, dissociées comme « sur-estimation » ou « sous-estimation » des compétences réelles). De façon générale, les auteurs ont rapporté que les parents avaient tendance à être plus précis dans l'estimation des compétences « non symboliques » ou « basiques » de leurs enfants, que dans l'estimation des compétences symboliques complexes. Ils ont ensuite testé les liens entre fréquence des pratiques familiales de numératie et estimations subjectives des compétences des enfants. Aucun lien n'a été trouvé pour les pratiques de numératie relativement « simples », par contre un lien a été montré entre les pratiques de numératie complexes et les estimations subjectives des compétences des enfants, mais uniquement lorsque ces estimations étaient inexactes : une surestimation des compétences était liée à une fréquence plus grande d'activités complexes de numératie, tandis qu'une sous-estimation des compétences de l'enfant était liée à une diminution de la fréquence des activités de numératie au sein du domicile familial (Zippert & Ramani, 2016). Une deuxième étude du même groupe d'auteurs a également montré une relation entre estimation des compétences des enfants et pratiques familiales de numératie (Zippert & Rittle-Johnson, 2020).

Hart et collaborateurs (2016) ont mis en évidence une relation inverse entre estimation des compétences des enfants par les parents et fréquence rapportée de certaines activités familiales : plus les parents estimaient que leur enfant était en difficulté, plus ils rapportaient réaliser ces activités. À ce titre, une autre étude mérite d'être mentionnée, bien qu'elle n'ait pas évalué directement l'évaluation subjective par les parents du niveau de leurs enfants. Ciping et collaborateurs (2015) ont tiré profit des données d'un protocole longitudinal, réalisé auprès d'enfants chinois suivis du CP au CE1, pour réaliser une analyse de type « cross-lagged panels ». Cet outil statistique permet d'explorer la problématique de la « direction » des relations observées au sein des cohortes longitudinales à condition de pouvoir utiliser des

variables mesurées simultanément et de manière répétée au sein d'une cohorte (Kearney, 2017; Pakpahan, Hoffmann, & Kröger, 2017). Ce type d'analyse permet donc d'estimer l'influence directionnelle que deux variables pourraient avoir, l'une sur l'autre, dans le temps. Les résultats obtenus par Ciping et collaborateurs (2015) étaient en faveur d'une relation causale inverse : les enfants qui présentaient les plus faibles scores en mathématiques en CP étaient ceux qui bénéficiaient le plus d'activités familiales de numération en CE1.

En définitive, les études ayant cherché à prendre en compte la perception parentale subjective des compétences des enfants sont trop peu nombreuses et leurs résultats trop hétérogènes pour nous permettre de dresser des conclusions sur ces relations. Cependant, elles soulignent l'intérêt de ces mesures dans un objectif de compréhension approfondie des mécanismes en jeu au sein de l'environnement familial d'apprentissage de numération.

Pour terminer cette sous-section dédiée aux attentes parentales, il est intéressant de rapporter un des résultats de la méta-analyse récente de Daucourt et collaborateurs (2021) : la variance dans les habiletés numériques des enfants pourrait être davantage expliquée par le niveau d'attente parentale que par certaines activités de numération (notamment informelles). Ainsi, les attentes parentales pourraient être un paramètre crucial au sein du contexte de l'environnement familial de numération. Pour optimiser la compréhension des relations avec les compétences numériques des enfants, il pourrait être important de ne pas en négliger la mesure.

3.7. Expériences parentales ou attitude vis-à-vis des mathématiques

3.7.1. Définition et mesures

Dans un premier temps, l'attitude vis-à-vis des mathématiques peut se définir par sa composante émotionnelle, autrement dit le sentiment éprouvé face aux mathématiques (Dowker, 2021). Les sentiments éprouvés vis-à-vis des mathématiques présentent une grande variabilité en population générale, allant d'un sentiment de plaisir, d'indifférence jusqu'à un sentiment de peur ou de rejet, aussi appelé « anxiété des mathématiques ». Cette anxiété des mathématiques se manifeste par un sentiment de tension ou de malaise face aux tâches impliquant des nombres (Richardson & Suinn, 1972) et entraînerait ainsi un phénomène d'évitement des occasions susceptibles d'impliquer une telle exposition. Par ailleurs, ce phénomène d'anxiété des mathématiques serait distinct d'autres phénomènes d'anxiété (Ashcraft, 2002), pourrait être assez répandu en population générale (avec des estimations de prévalence allant de 2% à 17%; pour revue voir Dowker, Sarkar, & Looi, 2016) et présenterait une plus grande prévalence pour le genre féminin (Else-Quest, Hyde, & Linn, 2010).

La définition de l'attitude vis-à-vis des mathématiques peut également être complétée par une composante d'auto-évaluation de ses propres capacités dans le domaine des mathématiques (Dowker, 2021). Dans le cadre de l'environnement familial d'apprentissage, Sonnenschein et collaborateurs (2020) ont proposé que l'attitude parentale puisse être susceptible d'être un facteur crucial en suggérant que, pour soutenir l'apprentissage de leurs

enfants, il serait nécessaire que les parents aient la conviction de posséder les compétences nécessaires.

Dans le cadre de l'étude de l'environnement familial d'apprentissage en numératie, les mesures utilisées pour quantifier l'attitude parentale vis-à-vis des mathématiques ont souvent consisté à demander aux parents d'évaluer leur degré d'adhérence à des énoncés portant sur leur appréciation des mathématiques (p. ex. « je trouve les mathématiques agréables » ou « j'évite les situations impliquant les mathématiques » ; LeFevre et al., 2009), à des énoncés portant sur leurs propres compétences mathématiques à l'époque où ils étaient scolarisés (p. ex. « quand j'étais à l'école, j'étais bon en mathématiques » ; LeFevre et al., 2009) ou encore des évaluations de leurs propres expériences quotidiennes dans le domaine des mathématiques (p. ex. réalisation d'activités professionnelles ou personnelles en lien avec les mathématiques ; Cheung et al., 2020; LeFevre et al., 2009).

3.7.2. Attitude parentale, environnement familial d'apprentissage et compétences numériques de l'enfant

Tout comme pour les relations mises en évidence en ce qui concernait les attentes parentales (dans la sous-section précédente), différentes voies de relation ont été mises en évidence entre attitudes parentales, stimulations familiales numériques et compétences chez l'enfant. Ainsi certaines études ont obtenu des données en faveur d'un lien entre attitude mathématique des parents et fréquence d'activités familiales de numératie¹, relations susceptibles d'expliquer ensuite les compétences des enfants (relations donc « indirectes » ; Cheung et al., 2020; De Keyser et al., 2020; L. Elliott et al., 2020; LeFevre, Polyzoi, et al., 2010; Río et al., 2017; Sonnenschein et al., 2020; Susperreguy, Douglas, et al., 2020; Uscianowski et al., 2020). Des relations spécifiques avec les activités de numératie les plus complexes ont pu être rapportées (Río et al., 2017; Susperreguy, Douglas, et al., 2020).

D'un autre côté, d'autres études ont obtenu des résultats davantage en faveur d'une absence de relation entre attitude parentale et stimulations de numératie objectivées, mais par ailleurs en faveur d'un lien direct entre attitude parentale et compétences des enfants. Ce type de relation directe était suggéré par le modèle Skwarchuk et collaborateurs (2014) et a pu être répliqué par plusieurs études, tout d'abord en montrant des résultats en faveur d'une absence de lien des attitudes parentales avec les activités de numératie (S. A. Hart et al., 2016; Sonnenschein et al., 2012; Soto-Calvo et al., 2020; Zippert & Rittle-Johnson, 2020) ou les caractéristiques du langage mathématique employé (L. Elliott et al., 2017; Thippana et al., 2020), mais aussi en montrant des relations directes entre attitudes parentales et habiletés numériques de l'enfant (Szczygieł, 2020; Tazouti & Jarlégan, 2016; Vanbinst, Bellon, & Dowker, 2020). Des relations directes entre attitude mathématique du parent et attitude

¹ Cette affirmation peut également se lire à l'envers, autrement dit les parents avec la plus forte anxiété vis-à-vis des mathématiques étaient aussi ceux qui déclaraient le moins d'activités de numératie familiales.

mathématique de l'enfant ont parfois été décrites (Casad, Hale, & Wachs, 2015; Soni & Kumari, 2017; Szczygieł, 2020).

Cette hétérogénéité des résultats sur les influences des attitudes parentales pourrait être interprétée à l'aide de certains travaux adaptés de la théorie de Bandura (Bandura, 1986; reprise dans l'étude de Tazouti & Jarlégan, 2016). Tirée de cette théorie, la notion de « sentiment d'auto-efficacité » correspond à la croyance d'un individu sur ses compétences à réaliser une tâche. Cette notion a été utilisée dans le cadre spécifique des études sur la parentalité (P. K. Coleman & Karraker, 1998). Le « sentiment d'auto-efficacité » des parents pourrait ainsi être en lien avec la quantité d'activités partagées avec l'enfant (Giallo, Treyvaud, Cooklin, & Wade, 2013), mais aussi avec d'autres caractéristiques plus *microscopiques* ou *infra-métriques* de ces activités (telles que le soutien affectif). Par conséquent, il serait possible de comprendre l'influence de l'attitude des parents vis-à-vis des mathématiques dans le cadre de l'environnement familial d'apprentissage via deux axes (non exclusifs). Une attitude parentale négative pourrait diminuer la fréquence des stimulations numériques proposées au domicile (activités de numératie et langage mathématique). Une telle attitude parentale pourrait également influencer la qualité, les modalités des stimulations numériques proposées au domicile (à un niveau non « quantifiable » avec les outils utilisés pour évaluer les stimulations familiales de numératie.).

À ce titre, il peut être intéressant de faire référence à une étude réalisée sur la relation entre quantité d'aide fournie par les parents pour les devoirs en mathématiques de leur enfant et leur niveau d'anxiété vis-à-vis des mathématiques (Maloney et al., 2015). Cette activité d'aide aux devoirs sort du champ direct de l'objet d'étude HNE qui nous intéresse ici, puisqu'il s'agit d'une activité « scolaire ». Nous proposons cependant de décrire cette étude afin d'illustrer notre propos sur les potentiels mécanismes « infra-métriques » des attitudes parentales concernant les stimulations familiales dans le domaine de la numératie. En plus des données mesurées chez les parents, Maloney et collaborateurs (2015) ont mesuré les compétences mathématiques de 438 enfants américains (scolarisés en CP et CE1) en début et fin d'année scolaire. D'un point de vue général, leurs analyses ont d'abord montré une relation directe entre attitude positive des parents (c.-à-d. une faible anxiété des mathématiques) et compétences des enfants en mathématique (voir **Figure 38.B** tirée de Maloney et al., 2015). Cependant en considérant l'ensemble des variables, l'effet de l'attitude parentale s'est révélé être en interaction avec l'implication des parents dans l'aide aux devoirs (voir **Figure 38.A** tirée de Maloney et al., 2015). Autrement dit, les enfants avec les progressions les plus faibles en mathématiques étaient ceux dont les parents anxieux fournissaient une aide aux devoirs mathématiques de façon fréquente à leurs enfants. Les enfants avec des parents anxieux qui fournissaient peu d'aide aux devoirs mathématiques présentaient une meilleure progression de leurs compétences mathématiques. Il est important de noter que l'attitude mathématique des parents n'était cependant pas en lien avec leurs comportements d'aide aux devoirs mathématiques, néanmoins ce comportement agissait comme un modérateur statistique dans la relation entre attitude parentale et compétences mathématiques des enfants (et ensuite l'anxiété vis-à-vis des mathématiques des enfants eux-mêmes, voir **Figure 38.B**).

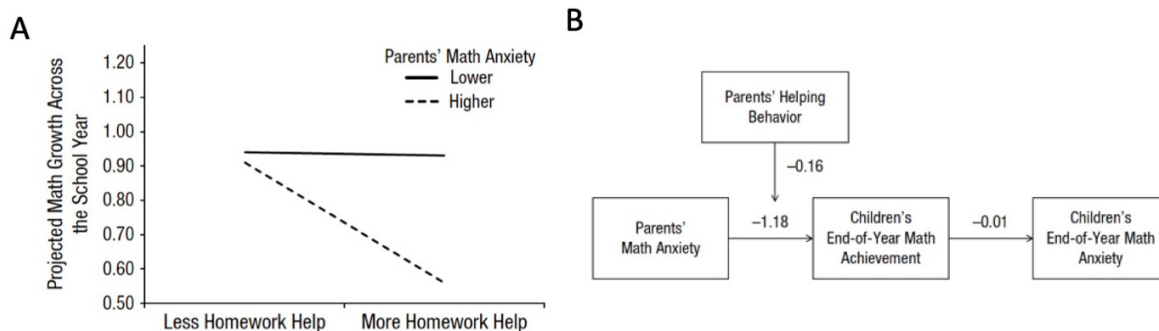


Figure 38 : Figures tirées de Maloney et al. (2015) représentant la relation entre anxiété parentale vis-à-vis des mathématiques, comportements d'aide aux devoirs et progression des enfants en mathématiques sur une année scolaire. **A.** Figure permettant la visualisation du développement des compétences mathématiques des enfants au cours d'une année scolaire (en ordonnée) en fonction de la fréquence d'aide aux devoirs de mathématiques fournie par leurs parents (en abscisse) et selon le niveau d'anxiété mathématique de ces derniers (faible anxiété, ligne pleine ; ou forte anxiété, ligne pointillée). **B.** Modèle statistique de modération montrant l'effet de l'anxiété mathématique des parents sur les compétences des enfants en fin d'année (et leur propre anxiété mathématique) modéré par le comportement d'aide aux devoirs mathématiques des parents. Les valeurs indiquées sont des coefficients non standardisés. $N=438$

La qualité des activités de soutien mathématique engagées par les parents anxieux serait différente, à un niveau non objectivable au sein de l'étude, mais suffisant cependant pour être en lien direct avec la progression des enfants dans leurs compétences mathématiques. Selon les auteurs, les parents anxieux vis-à-vis des mathématiques pourraient exprimer davantage de négativité face aux éventuelles difficultés de l'enfant, difficultés pourtant inévitables lors du processus d'apprentissage, et cette négativité pourrait en retour amener leurs enfants à éviter de s'engager dans des situations mathématiques complexes (Elliot & Thrash, 2004).

Nous proposons de souligner ici que le degré de contingence induit par l'activité de numératie réalisée serait susceptible de réduire la répercussion de l'anxiété mathématique des parents sur les performances de l'enfant. Par exemple, les résultats de l'étude de Berkowitz et collaborateurs (2015) ont suggéré que l'usage d'une application sur tablette, offrant un cadre d'interaction « pré-défini », pourrait supprimer l'influence potentiellement délétère de l'anxiété mathématique des parents lors d'activités de numératie partagées avec leur enfant¹.

3.7.3. Potentielles interactions entre attente et attitude parentales

Enfin, pour conclure cette sous-section consacrée aux attitudes parentales, nous illustrons, à l'aide d'une autre étude, l'intérêt de mesurer *et* d'analyser de façon conjointe les différents traits parentaux au sein d'un même protocole expérimental, au risque d'interpréter de façon erronée certaines relations statistiques. Silver et collaborateurs (2021) ont ainsi identifié

¹ L'étude de Berkowitz et collaborateurs (2015) impliquant l'usage d'une application mathématique par les enfants avec leurs parents anxieux est une étude interventionnelle qui sera replacée dans ce cadre dans la section ultérieure 3.10.6.

un phénomène d'interaction entre attentes et attitudes parentales. Cette interaction expliquait une part significative (supérieure à celle des attentes seules) de la variance dans les compétences mathématiques des enfants (voir **Figure 39** tirée de Silver et al., 2021). Au sein de cette étude, la relation entre les compétences mathématiques des enfants et le niveau d'attentes parentales était modifiée par l'attitude parentale vis-à-vis des mathématiques (leur niveau d'anxiété des mathématiques). Dit autrement, la relation entre compétences mathématiques des enfants et attentes de leurs parents n'existait qu'à condition que leurs parents soient anxieux vis-à-vis des mathématiques. Pour Silver et collaborateurs (2021), les attitudes parentales dans le domaine de la numératie seraient susceptibles de façonner la manière dont leurs croyances se traduiraient en actions ; pour mener ensuite à de meilleures compétences chez les enfants.

À partir d'entretiens qualitatifs réalisés auprès de plusieurs familles américaines, Elliott et collaborateurs (2020) ont également mis en évidence des résultats assez similaires chez certains des parents interrogés qui déclaraient s'engager davantage dans des activités familiales de numératie pour compenser leurs propres biais vis-à-vis des mathématiques. Plus précisément, leurs attentes quant à la réussite scolaire en mathématiques de leur enfant interagissaient avec leur propre anxiété des mathématiques en les amenant à offrir un plus grand nombre de stimulations mathématiques à leur enfant (L. Elliott et al., 2020). D'autres mécanismes d'interactions pourraient également exister entre attitude et attente parentale vis-à-vis des mathématiques. Par exemple, à travers les données de Hart et collaborateurs (2016), il apparaissait que les parents anxieux vis-à-vis des mathématiques avaient tendance à estimer de moins bonnes compétences en mathématiques pour leur enfant, comparativement aux estimations des parents moins anxieux.

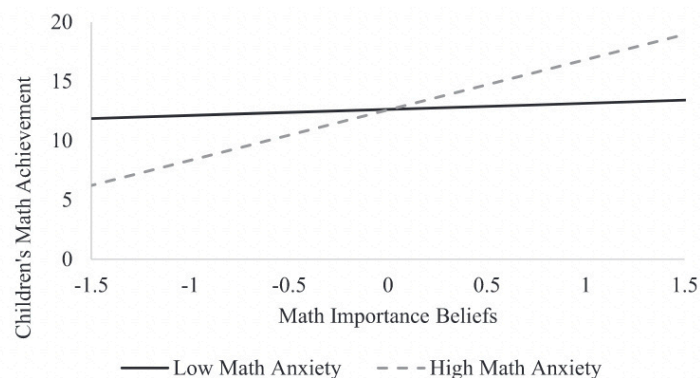


Figure 39 : Figure tirée de Silver et al. (2021) représentant l'effet d'interaction entre le niveau d'attentes parentales vis-à-vis des mathématiques (en abscisse) ainsi que leur attitude vis-à-vis des mathématiques (ligne pleine, faible anxiété des mathématiques ; ligne pointillée, forte anxiété des mathématiques) sur la réussite en mathématiques de leur enfant (en ordonnée). $N=114$

Enfin, pour conclure cette sous-section, soulignons à nouveau la nécessité d'analyser les données à travers des modèles statistiques communs. Dans le cas de l'étude de Silver et al. (2021), l'interaction était montrée alors que seul le niveau d'attente présentait un effet principal (l'attitude parentale, considérée seule, ne montrait pas de relations avec les compétences des enfants). Il importe donc de ne pas négliger le phénomène de potentielle interdépendance de

l'ensemble des variables qui composent l'environnement familial d'apprentissage de numératie. Pour sortir de l'hétérogénéité qui caractérise les résultats dans le domaine de l'environnement familial de numératie, il serait donc absolument nécessaire non seulement de mesurer, de façon simultanée, différentes caractéristiques de l'environnement familial, mais aussi d'analyser leurs potentielles relations et interactions pour ne pas se méprendre sur les potentiels mécanismes familiaux sous-jacents aux relations statistiques objectivées.

3.8. Objectivation des compétences parentales en mathématiques

Au-delà de leurs propres estimations de leurs compétences ou de leur sentiment par rapport aux mathématiques, très peu d'études ont cherché à évaluer les compétences objectives des parents en mathématiques. Pourtant, les compétences parentales objectives sont susceptibles de tenir un rôle tout aussi important dans l'environnement familial de numératie et celles-ci ne seraient pas nécessairement liées aux estimations subjectives fournies par les parents sur leur niveau en mathématiques (L. Elliott et al., 2017).

3.8.1. Liens entre compétences objectives des parents et stimulations familiales de numératie

Quelques études ont cherché à mettre en lien les compétences objectives des parents en mathématiques et les variables de l'environnement familial de numératie. Les données de Cheung et collaborateurs (2020) ont montré une relation entre les compétences mathématiques objectives des parents (en fluence mathématique) et leurs pratiques de numératie. Une autre étude a également montré un lien entre les activités familiales de numératie et les compétences objectivées des parents (en arithmétique ; DePascale et al., 2021). Les données de Elliott et collaborateurs (2017) étaient également en faveur d'une relation similaire : les compétences des parents (qu'elles soient objectives ou subjectives) étaient liées aux stimulations de numératie. Néanmoins, les données de l'étude de Silver et collaborateurs (2021) n'étaient pas en faveur d'une relation entre les compétences arithmétiques des parents et les stimulations numériques proposées à leurs enfants (que celles-ci soient mesurées via les caractéristiques du langage mathématique ou la fréquence des activités de numératie rapportées).

Par ailleurs, bien qu'il n'ait pas été réalisé de mesures objectives des parents, il peut être intéressant de mentionner les données de la cohorte allemande *The-school-prepared child*, car celles-ci comprenaient des informations sur la présence d'antécédents familiaux de dyscalculie¹ et il était obtenu une relation négative indirecte entre cet antécédent et les compétences

¹ La dyscalculie est un trouble spécifique des apprentissages caractérisé par des difficultés à traiter des données numériques, à apprendre des faits arithmétiques et à réaliser des calculs exacts et fluide (American Psychiatric Association, 2015).

numériques des enfants via la fréquence des activités familiales de numératie (Niklas & Schneider, 2014)¹.

3.8.2. *Liens entre compétences objectives des parents et habiletés numériques de l'enfant*

Quelques études ont rapporté des phénomènes d'inter-corrélations entre compétences numériques des parents et celles de leur enfant. Par exemple, les données de la cohorte National Longitudinal Survey of Youth ont montré une relation entre les compétences arithmétiques des mères et celles de leur enfant (Crane, 1996). L'étude de Silver et collaborateurs (2021) a révélé un lien direct entre les compétences parentales (arithmétique) et le score composite à diverses épreuves symboliques chez leur enfant de 4 ans. Des relations ont aussi été montrées sur la précision de l'acuité non symbolique chez le parent et l'enfant, et cela que les enfants soient jeunes (de 1 à 3 ans, Navarro, Braham, & Libertus, 2018) ou plus âgés (de 5 à 8 ans, Braham & Libertus, 2017). Les données de Braham et Libertus (2017) ont également permis de montrer un lien entre compétences des parents et celle de leur enfant à une tâche de fluence mathématique.

3.8.3. *Un cadre d'interprétation théorique : la « Familial Control Method »*

Hart et collaborateurs ont proposé d'identifier deux hypothèses alternatives pour interpréter ces relations entre compétences mathématiques des parents et celles des enfants (S. A. Hart et al., 2016) : i) soit les compétences des parents pourraient être indirectement liées aux compétences des enfants par le biais de l'environnement familial (les parents avec les meilleures compétences mathématiques pourraient fournir davantage de stimulations mathématiques à leur enfant, avoir des attentes plus importantes) ; ii) soit la relation entre compétences des parents et celles des enfants s'expliquerait davantage par une composante génétique. À ce sujet, il faut noter l'existence d'études ayant porté sur les compétences mathématiques au sein de populations diverses : chez des jumeaux mono ou dizygotes (Tosto et al., 2014) ; au sein des cohortes d'enfants adoptés (Borriello et al., 2020) ou, plus récemment, via l'utilisation de scores polygéniques (Harden et al., 2020; Smith-Woolley et al., 2018). Ces différents types de paradigmes visent à dissocier les influences génétiques et environnementales des compétences mathématiques au sein de la famille. Plus spécifiquement, ces études ont cherché à tester dans quelle mesure les compétences mathématiques des enfants pouvaient être influencées par des caractéristiques plutôt environnementales ou génétiques. Elles ont conduit à des résultats mixtes, suggérant des influences à la fois génétiques et environnementales.

Dans un article récent intitulé « Nurture might be nature: cautionary tales and proposed solutions », Hart et collaborateurs (2021) ont souligné la nécessaire distinction entre influences génétiques et environnementales dans la littérature sur l'environnement familial. Pour ces

¹ Ces résultats sont d'autant plus intéressants quand on les met en regard de ceux de l'étude de neuro-imagerie de Powers et collaborateurs (2016), qui avaient montré une interaction au niveau de l'activité cérébrale dédiée à un processus langagier entre présence d'un risque familial de dyslexie et fréquence des activités familiales de littératie (citée dans la section 2.4 de ce chapitre).

auteurs, il ne faudrait pas étudier les influences de l'environnement familial sans considérer de façon simultanée les potentielles influences génétiques, au risque de conduire à des conclusions erronées (c.-à-d. identifier des liens avec certaines caractéristiques environnementales qui s'expliqueraient en fait majoritairement par une transmission génétique). En conséquence, ils ont proposé plusieurs méthodes qui seraient susceptibles d'estimer l'effet direct de l'environnement, en contrôlant le potentiel de confusion génétique.

Une méthode recommandée *a minima*, par Hart et collaborateurs (2021), est celle du « Familial Control Method ». L'idée est de mesurer la même compétence chez les parents et les enfants, pour utiliser ensuite cette compétence chez les parents comme co-variable faisant office de « contrôle génétique proximal » (« *genetic proxy* »)¹. Cette méthode est représentée dans la **Figure 40** (adaptée de S. A. Hart et al., 2021) et illustre l'importance de la mesure du « trait » commun aux parents et à l'enfant (ici, les compétences de lecture) pour la compréhension des influences réciproques de l'environnement et de l'héritabilité génétique. Pour Hart et al. (2021), la corrélation entre une seule mesure environnementale (ici, le nombre de livres au domicile) et les compétences de l'enfant (ici, les compétences de lecture) présente le risque d'être « génétiquement confondue » (**Figure 40.A**). La prise en compte du même « trait » chez les parents et l'enfant (ici, les compétences de lecture) pourrait servir de « contrôle génétique proximal » pour la part de variabilité expliquée par des gènes partagés (mais non mesurés). Selon Hart et collaborateurs (2021), le rôle génétique ainsi modélisé permettrait alors d'estimer l'effet génétique et l'effet environnemental (ici le nombre de livres) sans confusion (**Figure 40.B**).

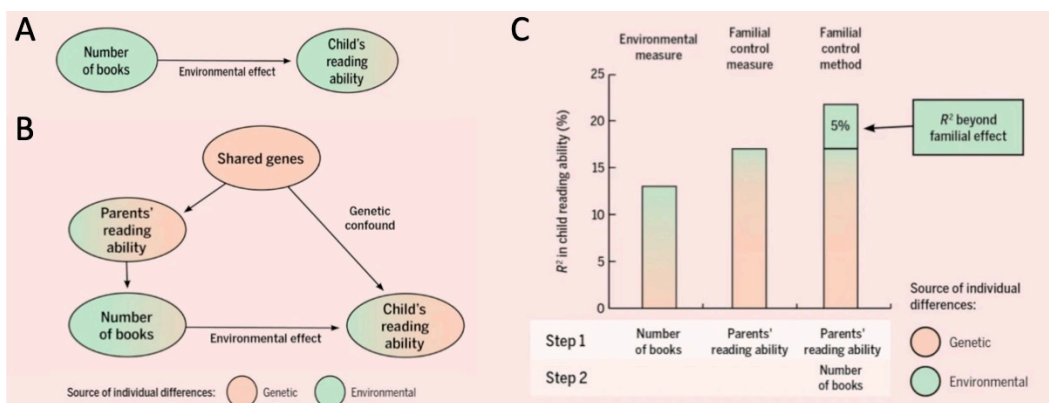


Figure 40 : Figures adaptées de Hart et al. (2021) **A**. Exemple de possible confusion génétique lors de la mesure d'un effet de transmission environnemental direct (nombre de livres sur compétences de lecture de l'enfant). Si les gènes jouent un rôle, ils ne sont pas modélisés. **B**. Exemple de modélisation des gènes grâce à la mesure d'un trait commun chez les parents et l'enfant (compétences de lecture). L'usage de ce « *genetic proxy* » permettrait d'estimer la transmission génétique et environnementale sur les compétences de l'enfant. Sur les figures A et B un seul parent est représenté pour plus de lisibilité **C**. Visualisation, à droite, de la méthode de « Familial Control Method » (comparativement à la mesure environnementale seule, à gauche, ou le « proxy génétique » seul, au milieu) grâce à laquelle la compétence d'un enfant est prédite via une régression par étapes, avec dans la première étape la mesure du contrôle familial (c.-à-d. le trait chez les deux parents) et dans la deuxième étape la mesure de l'environnement partagé (ici le nombre de livres).

¹ Pour Hart et al. (2021), cette méthode suppose de mesurer la compétence chez chacun des parents.

Le cœur de la méthode énoncée par Hart et collaborateurs (2021) réside dans l'étude des liens entre les compétences des enfants et les caractéristiques familiales (environnementales ou « contrôle génétique proximal ») dans une seule et même régression : c'est-à-dire identifier la variance expliquée de la variable d'intérêt tout en tenant compte de la variance expliquée par les autres variables. La finalité de la méthode serait ainsi d'évaluer dans quelle mesure la variable environnementale continuerait à expliquer une part de la variance des compétences de l'enfant, au-delà de l'effet du « contrôle génétique proximal »; ce qui serait alors en faveur d'un « véritable effet environnemental » (S. A. Hart et al., 2021). Dans la **Figure 40** tirée de Hart et al. (2021), les données représentées étaient issues d'une étude de van Bergen et collaborateurs (2016)¹. Avant prise en compte des compétences de lecture des parents, l'analyse des données suggérait une relation entre fréquence de lecture partagée (ou nombre de livres au domicile) et compétences en lecture des enfants. La prise en compte des compétences de lecture des parents donnait une autre lecture des résultats : l'effet de la fréquence de lecture partagée disparaissait ; suggérant davantage, pour cette variable, une confusion génétique plutôt qu'un véritable effet environnemental. Hart et collaborateurs (2021) notaient cependant que, après prise en compte du « contrôle génétique proximal », la mesure environnementale du nombre de livres continuait à expliquer une part, réduite, mais significative, de la variance dans les compétences de lecture des enfants (**Figure 40.C**). Ces résultats étaient donc malgré tout en faveur d'un véritable effet de l'environnement sur la lecture.

Parmi les études précédemment citées dans cette section, certaines avaient également mesuré des caractéristiques environnementales. Nous proposons donc de lire leurs résultats à travers la « Familial Control Method » (S. A. Hart et al., 2021) et de dissocier les résultats qui seraient davantage en faveur d'une héritabilité génétique de ceux qui permettraient d'expliquer une part de la variance par des variables environnementales, au-delà des traits comportementaux partagés.

L'étude de Braham et Libertus (2017) avait mesuré les mêmes traits comportementaux chez les parents et leur enfant (fluence arithmétique) ainsi qu'une caractéristique environnementale (niveau d'attentes vis-à-vis de la réussite mathématique). Une corrélation était notée entre les attentes parentales et la fluence mathématique des enfants. Néanmoins lorsque ces données étaient testées à travers un seul modèle de régression, seules les compétences des parents expliquaient une part significative de variance dans la compétence des enfants (les attentes parentales devenaient alors marginalement significatives). Selon la « Familial Control Method », la relation d'abord objectivée entre attentes parentales et compétences arithmétiques de l'enfant serait donc en faveur d'une probable confusion génétique et non pas d'un véritable effet environnemental des attentes parentales.

Cheung et collaborateurs (2020) avait mesuré des traits comportementaux similaires entre parents et enfants (additions) ainsi que diverses caractéristiques sur l'environnement familial de numératie : les stimulations (les ressources comme les jeux, les livres numériques,

¹ Cette étude est par ailleurs mentionnée dans l'annexe 3.

du matériel éducatif ainsi que la fréquence des activités de numération formelles et informelles), l'attitude des parents (leurs propres activités de numération) et également leur statut socio-économique. Les compétences des enfants montraient des relations directes et positives avec les stimulations familiales de numération et avec le niveau de diplôme du parent. Néanmoins, à l'inverse de l'étude de Braham et Libertus (2017), la prise en considération des compétences parentales avec l'ensemble de ces variables dans un même modèle n'altérerait pas la variance expliquée par les facteurs environnementaux (voir **Figure 41**, tirée de Cheung et al., 2020). Aussi, toujours selon la « Familial Control Method », les relations ainsi objectivées pourraient être en faveur de véritables effets environnementaux.

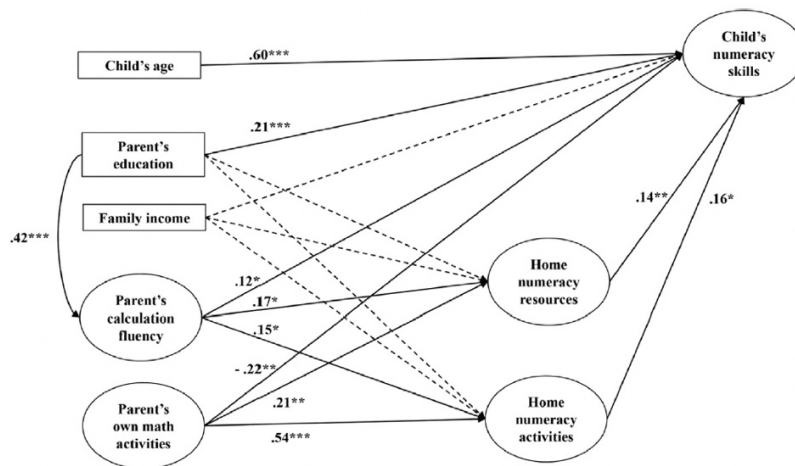


Figure 41 : Figure tirée de Cheung et al. (2020) illustrant leur modèle final sur les relations entre les compétences parentales et d'autres caractéristiques parentales, les variables « classiques » HNE et les compétences mathématiques de leur enfant. Les relations significatives sont présentées avec des lignes pleines et les coefficients standards correspondants ; les relations non significatives sont présentées par les lignes en pointillés. * $p < .05$; ** $p < .01$; *** $p < .001$. $N=290$

Dans l'étude de Silver et collaborateurs (2021) étaient mesurés les scores parentaux en arithmétique et un score composite chez l'enfant de 4 ans (à plusieurs épreuves symboliques, incluant de l'arithmétique). Quand les scores parentaux étaient entrés avec des caractéristiques parentales (comme les croyances ou l'anxiété), seules les caractéristiques d'attentes ou d'attitudes permettaient d'expliquer une part significative de variance dans les scores des enfants. Enfin l'analyse des données de la cohorte National Longitudinal Survey of Youth par Crane (1996) a montré que, lorsque les compétences arithmétiques des mères, le score à l'échelle d'environnement familial d'apprentissage HOME et le statut SES étaient pris dans un même modèle statistique, les compétences des enfants étaient expliquées en plus grande partie par les caractéristiques de l'environnement familial (l'effet des compétences maternelles persistait cependant, mais était réduit). Selon la « Familial Control Method », les relations ainsi objectivées pourraient donc être également davantage en faveur de véritables effets environnementaux.

La lecture rétrospective de ces études à partir du modèle proposé par Hart et collaborateurs (2021) reste cependant limitée à plusieurs titres. La plus grande limite est qu'aucune des études n'a permis de tester les deux parents. Le score de compétences parentales

d'un seul parent tient un rôle de « contrôle génétique proximal » bien plus limité (chaque parent ne contribuant qu'à 50% du patrimoine génétique hérité par l'enfant). La seconde est que certaines des études mentionnées n'ont pas utilisé un « trait » identique pour la mesure des compétences entre parents et enfants (Silver et al., 2021).

Néanmoins, ce modèle a l'avantage de souligner un aspect qui nous paraît très important, déjà souligné dans ce chapitre, mais qui restait jusqu'alors assez peu formalisé : celui de l'étude conjointe, dans un même modèle statistique, des différentes caractéristiques de l'environnement familial et des compétences des enfants. Au-delà de suggérer un cadre discutable de dissociation entre influences génétiques et environnementales, la force de ce modèle est de souligner que les variables étudiées et présentées jusqu'à présent devraient toujours être considérées et étudiées pour ce qu'elles sont : une chaîne interdépendante. L'utilisation de modèles statistiques ne comprenant qu'une partie des variables environnementales peut aussi amener à se méprendre sur le rôle attribué à une caractéristique plutôt qu'à une autre (p. ex. l'étude précédemment mentionnée de Silver et al., 2021 montrant une interaction entre attitude et attente mentionnée dans leur relation avec les compétences mathématiques des enfants). De façon générale, étant donné les liens entre facteurs proximaux et distaux, nous réaffirmons qu'il est important de chercher à les étudier simultanément (Tazouti, 2014; Vasilyeva et al., 2018).

3.9. Caractéristiques socio-économiques du foyer et HNE

Enfin, pour terminer cette revue du rôle des traits parentaux dans l'environnement familial d'apprentissage de numératie et les compétences mathématiques des enfants, nous proposons de revenir sur la question du statut SES. Considérer l'environnement familial d'apprentissage comme objet d'étude à part entière ne devrait pas conduire pour autant à négliger ses « racines » socio-économiques distales. Si les caractéristiques de l'environnement familial peuvent être considérées comme une chaîne du plus « proximal » au plus « distal » (langage mathématique, activités de numératie, attentes, attitude), alors il paraît tout aussi indispensable d'inclure les caractéristiques socio-économiques au bout de la chaîne. Pourtant la prise en compte de cet indicateur est très variable selon les études. Si, dans l'ensemble, cet indicateur est souvent *a minima* contrôlé dans les analyses, il arrive qu'il ne soit pas mesuré (Huang et al., 2017; Vasilyeva et al., 2018) ou que les groupes étudiés présentent très peu de mixité socio-économique (L. Elliott et al., 2017; Kleemans et al., 2012, 2013; Ramani et al., 2015; Segers et al., 2015; pour une revue sur la prise en compte des indicateurs SES selon les études, voir Mutaf-Yıldız et al., 2020).

3.9.1. Relation entre SES et stimulations familiales dans le domaine des mathématiques

Étant donné l'abondante littérature sur la relation entre SES familial et compétences mathématiques chez l'enfant¹, le postulat théorique le plus intuitif est de suggérer que les foyers où les ressources seront les plus faibles (d'un point de vue autant financier qu'éducatif) seront ceux qui offriront le moins d'expériences proximales de numération à leurs enfants (Davis-Kean, Tighe, & Waters, 2021). Ce postulat a été confirmé par plusieurs études qui ont montré une relation entre les caractéristiques socio-économiques du foyer et les expériences proximales de numération mesurées à l'aide de mesures sur la fréquence des activités réalisées (Cheung et al., 2018; Dearing et al., 2012; DeFlorio & Beliakoff, 2015; Lehl et al., 2020; Napoli et al., 2021; Saxe et al., 1987; Skwarchuk et al., 2014; Susperreguy, Douglas, et al., 2020) ou sur les caractéristiques du langage mathématique (Gunderson & Levine, 2011; Lehl et al., 2020; Levine et al., 2010; Lombardi & Dearing, 2020; Vandermaas-Peeler et al., 2009). Certaines distinctions ont parfois été suggérées. Les disparités socio-économiques concernant les activités de numération s'exprimeraient davantage sur les activités informelles (DeFlorio & Beliakoff, 2015; Skwarchuk et al., 2014) ou au contraire sur les seules activités formelles de niveau avancé (Susperreguy, Douglas, et al., 2020). Concernant le langage, les disparités socio-économiques pourraient concerner les seuls « petits » mots-nombres (entre 1 an et 2,5 ans ; Gunderson & Levine, 2011) ou seulement le langage mathématique employé en dehors des activités qualifiées dites de numération (Thippa et al., 2020). Ces différences de stimulations proximales pourraient par voie de conséquence être liées aux caractéristiques socio-économiques distales du foyer et seraient de fait considérées par certains comme phénomènes proximaux participant à l'explication des disparités socio-économiques mesurées dans les compétences mathématiques des enfants (Dearing et al., 2012; Lombardi & Dearing, 2020). Néanmoins, notons qu'il existe des résultats en faveur d'une absence de relation entre SES et expériences familiales de numération (De Keyser et al., 2020; S. A. Hart et al., 2016; Manolitsis et al., 2013; K. Missall et al., 2015; Napoli & Purpura, 2017; Wei et al., 2020)² ou d'une relation négative (LeFevre et al., 2002; LeFevre, Polyzoi, et al., 2010; Niklas & Schneider, 2014; Río et al., 2017; Silinskas et al., 2012). Ainsi, le statut socio-économique pourrait être lié à la fois aux activités et aux conversations mathématiques que les parents entreprennent avec leurs enfants, mais ces associations pourraient aussi être davantage complexes.

¹ Recensée via les études de cohortes dans le chapitre 1, mais également via les études expérimentales dans le chapitre 3.

² Dans l'étude de De Keyser et al. (2020) des tests bayésiens ont indiqué des preuves importantes en faveur de cette relation nulle. On notera aussi que dans l'étude de Thippa et al. (2020), il n'y avait pas de différence dans l'emploi du langage mathématique pendant les activités de numération et dans celle de Gunderson & Levine (2011) il n'y avait pas de relation sur les mots-nombres « moyen » ou « grands ».

3.9.2. Relation entre SES et « cognitions mathématiques » des parents

Dans le cadre de l'étude de l'environnement familial des mathématiques, une relation positive entre le statut socio-économique des parents et leur niveau d'attente quant à la réussite scolaire de leur enfant a souvent été rapportée (Cheung, Dulay, Yang, Mohseni, & McBride, 2021; Cheung et al., 2018; DeFlorio & Beliakoff, 2015; Stull, 2013; Tazouti & Jarlégan, 2016; Tazouti, Portenseigne, & Luxembourger, 2018; pour revue, voir L. Elliott & Bachman, 2018c). Une étude a cependant rapporté un lien négatif entre statut SES parental et attentes vis-à-vis des mathématiques (De Keyser et al., 2020).

D'après Cheung et Kwan (2021), la théorie de Bourdieu (1986) pourrait permettre de comprendre l'influence du statut socio-économique sur le niveau d'attente des parents en suggérant que les parents issus de milieux les plus précaires auraient des attentes plus « traditionnelles » concernant l'apprentissage précoce de leur enfant (y compris en ce qui concerne l'apprentissage des mathématiques), et que ces attentes pourraient être moins en adéquation avec les systèmes éducatifs contemporains. À ce sujet, DeFlorio et Beliakoff (2015) avaient souligné qu'une fois les enfants scolarisés, les parents issus des milieux les plus défavorisés avaient davantage tendance à déclarer que l'acquisition des mathématiques relevait uniquement de l'école (contrairement aux milieux plus favorisés qui considéraient que cette acquisition pourrait relever à la fois de l'école et de la famille). Quelques études ont également montré une relation positive entre attitudes des parents vis-à-vis des mathématiques et leurs caractéristiques socio-économiques (De Keyser et al., 2020; LeFevre, Polyzoi, et al., 2010; Tazouti et al., 2018). Cette relation pourrait s'expliquer par la composante « éducative » du SES. Dit autrement, les parents qui seraient les moins à l'aise avec les mathématiques seraient aussi ceux qui auraient le moins poursuivi de longues études supérieures.

Par ailleurs, tel que le suggérait la catégorisation des traits parentaux proposée par Taylor et collaborateurs (2004), ce trait parental plus distal pourrait impliquer également la notion d'appartenances culturelles. De façon générale, les études montrant l'existence d'une relation entre environnement familial de numératie et compétences mathématiques chez les enfants ont massivement été répliquées à travers différents pays et cultures, incluant, de façon non exhaustive : l'Allemagne (Anders et al., 2012; Niklas & Schneider, 2014), la Belgique (Mutaf Yildiz et al., 2018a, 2018b), le Canada (LeFevre, Polyzoi, et al., 2010; LeFevre et al., 2009; Skwarchuk et al., 2014), les États-Unis, de façon très majoritaire, (Blevins-Knabe & Musun-Miller, 1996; Huntsinger et al., 2016; Silver et al., 2021; Thompson et al., 2017) y compris au sein de la population latine (Río et al., 2017), la France, la Suisse et le Luxembourg (Poncelet et al., 2020), la Grèce (LeFevre, Polyzoi, et al., 2010; Manolitsis et al., 2013), les Pays Bas (Kleemans et al., 2012, 2013; Segers et al., 2015), ainsi que plusieurs pays d'Asie (notamment la Chine ; Huang et al., 2017; Yingqiu Pan et al., 2006 ou les Phillipines; Cheung et al. 2020 ; pour revue, voir Cheung et al., 2021), et d'Amérique du Sud (Chili; Susperreguy, Burr, et al., 2020; Susperreguy, Douglas, et al., 2020; ou Mexique; Susperreguy et al., 2021). Néanmoins ce constat global ne doit pas masquer que certaines études, ayant inclus des familles de nationalité ou de culture différentes, ont également mentionné des variations sur le type ou la fréquence d'activités familiales de numératie réalisées ainsi que sur leurs liens avec les

compétences mathématiques des enfants ; par exemple pour la comparaison de familles américaines d'origine européenne ou chinoise (Huntsinger et al., 2000), de familles vivant en Chine ou aux États-Unis (Yingqiu Pan et al., 2006), de familles vivant en Grèce ou au Canada francophones (LeFevre, Polyzoi, et al., 2010) ou encore de familles françaises et allemandes (Tazouti et al., 2011). Selon Cheung et collaborateurs (2020), ces différences pourraient s'expliquer par des phénomènes de variations culturelles des compétences mises en exergue comme étant à acquérir pendant la petite enfance ainsi que la valorisation de différentes méthodes d'apprentissages (voir également Cankaya & LeFevre, 2016). Les attentes et attitudes parentales seraient donc tout à fait susceptibles d'être influencées par les codes culturels (Keels, 2009; Yuejuan Pan et al., 2018; Sonnenschein et al., 2020).

Dans l'ensemble, le paramètre socio-économique n'est pas forcément indicatif de la qualité des stimulations, du niveau d'attente ou d'attitude au sein de l'environnement familial de numératie. Néanmoins, sa mesure dans les modèles statistiques peut permettre l'identification de potentielles interactions entre variables de l'environnement familial. Par exemple, le niveau d'attente des parents pourrait modifier la relation entre caractéristiques socio-économiques de haut niveau et pratique d'activités familiales de numératie (Yuejuan Pan et al., 2018). Huntsinger et collaborateurs (2016) ont montré que, après contrôle pour le niveau de diplôme parental, le lien objectivé entre activités de numératie (de faible complexité) et compétences mathématiques des enfants pourrait perdre en significativité. Les données de Susperreguy et collaborateurs (2021) ont révélé que la relation entre activités formelles avancées et compétences mathématiques n'était objectivable que chez les familles favorisées d'un point de vue socio-économiques. Dans la méta-analyse de Dunst (2017), réalisée sur un petit nombre d'études, la relation entre activités familiales de numératie et compétences mathématiques n'était valable que pour les enfants issus des milieux socio-économiques favorisés. La méta-analyse de Daucourt (2021), portant sur un plus grand nombre d'études, a montré un effet d'interaction du SES sur la relation entre langage mathématique et compétences mathématiques chez l'enfant. Néanmoins cette seconde méta-analyse ne montrait pas d'interaction du SES sur la relation entre mesure HNE (considérée comme un agrégat des stimulations numériques *et* des traits parentaux) et compétences mathématiques chez l'enfant.

Enfin de façon générale, le facteur SES gagnerait à être, *a minima*, contrôlé de façon systématique dans les études sur le HNE. En effet, comme précisé en conclusion du chapitre précédent, les caractéristiques SES distales sont liées, statistiquement, à un grand nombre d'expériences proximales différentes (p. ex. sommeil, santé ou stress; Conger & Donnellan, 2007) pour chaque enfant et celles-ci dépassent le seul cadre de l'environnement familial de numératie. Étant donné qu'il est vain (contrairement aux expérimentations animales évoquées en conclusion du précédent chapitre) d'imaginer étudier l'environnement familial en numératie « toutes choses égales par ailleurs », c'est justement pour ce caractère « multifacette » des caractéristiques socio-économiques du foyer qu'il est important d'en réaliser la mesure et d'en tenir compte, *a minima* comme « co-variable » contrôle, pour analyser les liens entre HNE et compétences mathématiques de l'enfant. Étudier les relations entre HNE et compétences mathématiques chez l'enfant, sans mesurer ni contrôler la variabilité des expériences de vie

inhérente aux disparités socio-économiques, pourrait par exemple amener à conclure à l'existence de certaines relations avec les compétences des enfants alors que celles-ci pourraient en réalité être davantage expliquées par d'autres facettes du SES (comme les facteurs nutritionnels, d'exposition aux toxines ou encore de stress).

De façon générale pour conclure cette sous-section, nous soulignons, une fois encore, la nécessité d'utiliser des modèles statistiques permettant de tenir compte de façon simultanée des différents facteurs familiaux (dont l'importance a été formalisée par Hart et collaborateurs, 2021) afin d'identifier une image la plus fiable possible des relations en jeu.

3.10. Environnement familial en numératie : plusieurs limites à considérer

3.10.1. Prise en compte des différences cognitives interindividuelles dans les domaines non mathématiques

Comme indiqué au cours du chapitre 2, les domaines cognitifs du langage et des fonctions exécutives pourraient jouer un rôle important dans le développement des habiletés numériques. De façon plus générale, ce serait également le cas des capacités de raisonnement fluide ou cristallisé (caractérisant le « quotient intellectuel » : Grégoire, 2009). Dans le cadre de l'étude des relations entre environnement familial de numératie et compétences mathématiques chez les enfants, le contrôle de ces indicateurs cognitifs chez l'enfant pourrait participer à réduire l'hétérogénéité (Niklas & Schneider, 2014). Dans un article de revue, Kleemans et collaborateurs (2016) ont proposé la formalisation d'un cadre théorique des différences interindividuelles des habiletés numériques (voir **Figure 42**, tirée de Kleemans et al., 2016). Ce modèle proposait que différentes mesures cognitives de l'enfant puissent expliquer, en interaction avec les caractéristiques d'environnement familial d'apprentissage, les différences individuelles dans les capacités numériques.

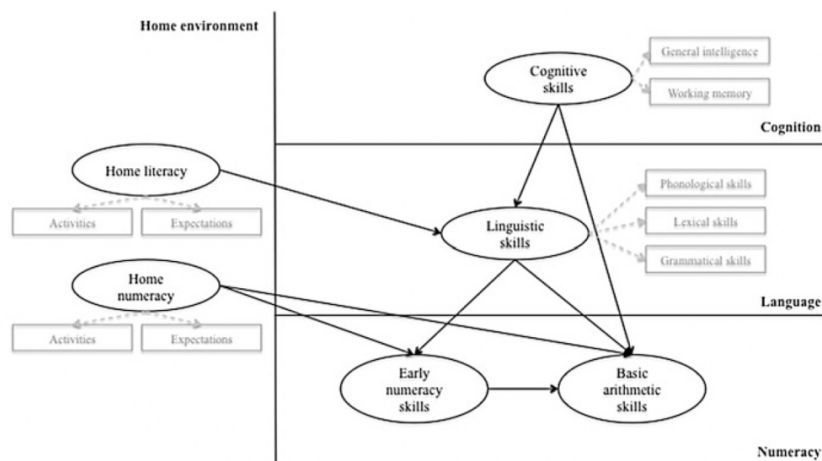


Figure 42 : Figure tirée de Kleemans et al. (2016) représentant différentes relations possibles entre caractéristiques cognitives interindividuelles des enfants et caractéristiques de leur environnement familial d'apprentissage sur leurs habiletés numériques.

Parmi les travaux sur l'environnement familial de numératie, précédemment mentionnés au cours de ce chapitre, plusieurs ont réalisé la mesure d'au moins un indicateur de fonctionnement exécutif (Benavides-Varela et al., 2016; Bernabini et al., 2020; Kleemans et al., 2012, 2013, 2018; Segers et al., 2015; Silver et al., 2021; Skwarchuk et al., 2014; Susperreguy & Davis-Kean, 2016; Wei et al., 2020), la mesure d'un indice des compétences langagières (Bernabini et al., 2020; Cheung et al., 2018; Kleemans et al., 2012, 2013, 2018; LeFevre et al., 2009; Napoli & Purpura, 2017; Susperreguy, Burr, et al., 2020; Susperreguy, Douglas, et al., 2020; Zippert & Rittle-Johnson, 2020) ou enfin le calcul d'indicateurs de l'intelligence non verbale (Bernabini et al., 2020; Kleemans et al., 2013, 2018; Niklas & Schneider, 2014, 2017; Segers et al., 2015; Wei et al., 2020). Ces mesures n'ont cependant pas été systématiquement utilisées dans les modèles statistiques employés pour étudier le HNE (p. ex. Susperreguy, Burr, et al., 2020; Susperreguy, Douglas, et al., 2020) et plusieurs études n'ont réalisé la mesure d'aucun de ces indicateurs cognitifs (Cheung et al., 2020; De Keyser et al., 2020; DeFlorio & Beliakoff, 2015; DePascale et al., 2021; L. Elliott et al., 2017; Glenn et al., 2017; Gunderson & Levine, 2011; Levine et al., 2010; Mutaf-Yildiz et al., 2018a, 2018b; Río et al., 2017; Silinskas et al., 2020; Susperreguy et al., 2021).

3.10.2. Prise en compte des caractéristiques de l'environnement d'apprentissage non dédié à la numératie.

De façon générale, il a été rapporté que les parents étaient susceptibles de rapporter davantage d'activités relevant du domaine de la littératie (Skwarchuk et al., 2014) et de présenter une attitude plus positive vis-à-vis de ce dernier, comparativement à celui de la numératie (Skwarchuk, 2009). Leurs attentes seraient également plus élevées en ce qui concerne la littératie (Blevins-Knabe et al., 2000; Napoli et al., 2021; Ramani & Siegler, 2014; Sonnenschein, Metzger, Dowling, Gay, & Simons, 2016), considérant que l'apprentissage de la numératie serait davantage le rôle de l'école que celui de la famille (Cannon & Ginsburg, 2008).

Les études ayant utilisé des mesures très générales sur l'environnement d'apprentissage (section 1 de ce chapitre) avaient mis en évidence des relations avec des compétences académiques diverses. Au sein d'un même contexte familial, Lehl et collaborateurs (2020) ont suggéré l'existence de liens plus robustes entre types d'activités rapportées (c.-à-d. formelles ou informelles), qu'entre activités d'un même domaine (numératie ou littératie). Cependant, peu d'études ont mesuré la spécificité des stimulations d'apprentissage sur un domaine particulier (numératie ou littératie) et leurs résultats sont mitigés. Des études ont montré des résultats en faveur d'une spécificité des stimulations d'apprentissage en numératie, comme facteur unique en relation avec les compétences numériques des enfants (c.-à-d. les mesures des stimulations en littératie ne prédisaient pas les compétences numériques, ou inversement ;

Segers et al., 2015; Skwarchuk et al., 2014; Susperreguy, Burr, et al., 2020; Susperreguy, Douglas, et al., 2020; Susperreguy et al., 2021)¹.

À l'opposé, certaines études ont montré que les stimulations d'apprentissage en numératie étaient également en lien avec les compétences langagières (mais par contre les stimulations de littératie n'étaient pas liées avec les compétences numériques ; Huntsinger et al., 2016; Napoli & Purpura, 2017). D'autres encore ont suggéré une dissociation inverse en montrant que les compétences de numératie des enfants étaient positivement liées aux stimulations de littératie² (LeFevre, Polyzoi, et al., 2010; Manolitsis et al., 2013; Susperreguy et al., 2021), voire même davantage liées qu'avec les stimulations de numératie (Anders et al., 2012; Soto-Calvo et al., 2020). LeFevre et collaborateurs (2009) ont relevé un lien négatif entre stimulations de littératie et compétences arithmétique. Au final, comme souligné par Napoli et collaborateurs (2021), des recherches supplémentaires examinant conjointement les facteurs familiaux liés aux pratiques de littératie et de numératie seraient nécessaires pour participer à la réduction de l'hétérogénéité des résultats.

3.10.3. Paradigme longitudinal et niveau scolaire

Deux grands types d'études longitudinales ont été menées à partir des mesures HNE : celles qui ont réalisé un suivi court des participants (sur une durée d'un an au maximum) et celles qui ont réalisé un suivi plus long (d'une durée supérieure à un an). Les résultats établis pour ces études entre les mesures HNE et les compétences numériques des enfants sont majoritairement positifs, pour les délais courts (Huntsinger et al., 2016; Kleemans et al., 2013; Manolitsis et al., 2013; Napoli & Purpura, 2017; Niklas & Schneider, 2014; Susperreguy, Burr, et al., 2020; Susperreguy, Douglas, et al., 2020; Vasilyeva et al., 2018; Wei et al., 2020) comme pour les délais longs (Anders et al., 2012; Casey et al., 2018; Gunderson & Levine, 2011; Lehrl et al., 2020; Levine et al., 2010; Niklas & Schneider, 2017; Susperreguy, Burr, et al., 2020). Il a été suggéré que le suivi longitudinal était susceptible de modifier la forme des relations initialement observées. Par exemple, l'étude de Vasilyeva et collaborateurs (2018) indiquait que les compétences arithmétiques étaient initialement en lien avec les activités formelles ; tandis que les compétences arithmétiques mesurées un an après étaient en lien avec les activités informelles précédemment mesurées. Par ailleurs, des résultats négatifs ont également été observés à partir d'études longitudinales (Ciping et al., 2015; Silinskas et al., 2020).

La méta-analyse de Dunst et collaborateurs (2017) avait permis de suggérer une augmentation de la taille d'effet obtenue pour les études longitudinales (entre HNE et compétences numériques de l'enfant), comparativement aux études concurrentes (voir **Figure 43**, tirée de Dunst et al., 2017). Néanmoins, cette observation n'a pas été répliquée par la méta-analyse de Daucourt et collaborateurs (2021) sur un plus grand nombre d'études.

¹ Segers et al. (2015) ont même relevé un effet de « spécificité du domaine » en ce qui concerne les attentes parentales vis-à-vis de la réussite scolaire des leurs enfants.

² Dans l'étude LeFevre et al. (2010) la relation entre HLE et compétences mathématiques n'était objectivable qu'au sein des familles grecques (comparativement à celles canadiennes).

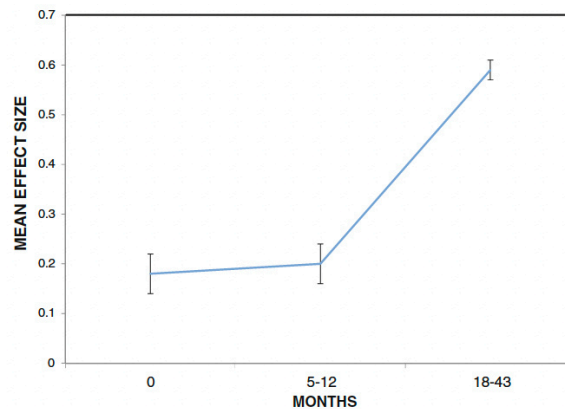


Figure 43 : Figure tirée de la méta-analyse de Dunst et al. (2017) représentant la moyenne des tailles d'effet (en ordonnées) (et intervalle de confiance de 95%) pour les relations entre les expériences familiales de numératie et les compétences mathématiques des enfants selon la temporalité des mesures (façon concurrente, « 0 mois », après « 5 à 12 mois » ou après « 18 mois », en abscisse). $N=13$ groupes d'enfants

3.10.4. Pertinence des études longitudinales : influences durables du HNE versus compétences précoces de numératie

Lehrl et collaborateurs (2020) ont suggéré qu'il était possible de comprendre les résultats longitudinaux obtenus à partir du postulat selon lequel « les compétences engendrent les compétences » (Cunha & Heckman, 2007; Elder Jr, 1998; cités par Lehrl et al., 2020). Ce postulat peut cependant amener à s'interroger sur la mesure des compétences initiales (c.-à-d. concurrentes aux mesures HNE) et leur intégration aux modèles statistiques utilisés. Après analyse des protocoles longitudinaux des études précédemment mentionnées, il apparaît que la plupart ont réalisé une mesure de ces compétences numériques initiales, au même moment que la réalisation de la mesure des stimulations familiales en numératie (Ciping et al., 2015; Huntsinger et al., 2016; Lehrl et al., 2020; Manolitsis et al., 2013; Napoli & Purpura, 2017; Niklas & Schneider, 2014; Silinskas et al., 2020; Susperreguy, Burr, et al., 2020; Susperreguy, Douglas, et al., 2020)¹. Certaines de ces études ont employé des modèles de médiation, montrant que les relations longitudinales obtenues entre HNE précoce et compétences numériques ultérieures étaient expliquées en grande partie par les compétences précoces (Manolitsis et al., 2013; Susperreguy, Burr, et al., 2020). Néanmoins, d'autres, au contraire, ont montré qu'il existait une relation directe entre HNE précoce et compétences mathématiques ultérieures, et ce même après prise en considération des compétences numériques initiales (Huntsinger et al., 2016; Napoli & Purpura, 2017; Niklas & Schneider, 2014; Susperreguy, Douglas, et al., 2020).

¹ Certaines des études précédemment mentionnées n'ont cependant pas intégré de mesures des compétences numériques initiales, rendant plus compliquée l'interprétation des résultats longitudinaux (Anders et al., 2012; Gunderson & Levine, 2011; Kleemans, Segers, & Verhoeven, 2013; Levine, Suriyakham, Rowe, Huttenlocher, & Gunderson, 2010).

Si les relations longitudinales observées sont susceptibles d'être expliquées en partie par le postulat résolument incrémental des compétences numériques (Cunha & Heckman, 2007; Elder Jr, 1998; Lehl et al., 2020), le fait que celles-ci pourraient rester significatives après contrôle de la variance expliquée par les habiletés numériques précoces semble cependant indiquer que ce seul postulat n'est pas suffisant. Un deuxième postulat, complémentaire, pourrait être le caractère relativement stable de l'environnement familial de numératie au cours du développement de l'enfant. Autrement dit, les parents ayant fourni des indicateurs de stimulations familiales riches lors des mesures initiales seraient susceptibles de continuer à fournir un HNE de qualité par la suite. Cette proposition est cohérente avec les résultats de trois études ayant réalisé des mesures répétées sur les stimulations de l'environnement familial d'apprentissage en numératie (relations entre les mesures d'activités de numératie en grande section, début et fin de CP, Silinskas et al. 2020, relations entre les mesures d'activités formelles ou informelles de numératie en CP et CE1, Ciping et al. 2015 ; et relations entre les caractéristiques du langage mathématique employé à 4 ans et les activités d'apprentissage au sens plus large à 12 ans ; Lehl et al. 2020).

3.10.5. Environnement familial de numératie chez l'enfant scolarisé

La plupart des études longitudinales réalisées n'ont néanmoins pas permis de préciser si les relations entre les stimulations familiales de numératie et les compétences numériques chez les enfants persistaient au-delà de l'entrée dans la scolarisation primaire. En effet, les quelques études longitudinales qui ont mesuré les compétences numériques chez les enfants plus âgés avaient utilisé des mesures très larges d'environnement d'apprentissage (Melhuish et al., 2008; Niklas & Schneider, 2017; Özkan & Baydar, 2021; Visser et al., 2019). Deux exceptions existent cependant. La première concerne l'étude de Lehl et collaborateurs (2020) qui a permis de montrer une relation longitudinale entre mesures précoces du langage mathématique (à 4 ans) et compétences mathématiques à 12 ans ; cette relation était néanmoins médiée par les compétences mathématiques antérieures chez l'enfant. Ce premier résultat serait donc plutôt en faveur du postulat « incrémental » selon lequel l'effet à long terme de l'environnement familial de numératie pourrait s'expliquer par le fait que les familles, en offrant des stimulations numériques précoces, pourraient favoriser le développement des compétences numériques fondamentales, et ces dernières expliqueraient ensuite l'acquisition des compétences mathématiques ultérieures.

La seconde étude à avoir montré une relation longitudinale entre environnement familial de numératie mesurée en grande section et compétences arithmétiques chez des enfants scolarisés en CE1 est celle réalisée par Kleemans et collaborateurs (2018). Contrairement aux résultats de l'étude précédente, les auteurs ont indiqué une indépendance de la relation par

rapport aux compétences arithmétiques antérieures (mesurées en CP). Cette deuxième étude serait donc plutôt en faveur du postulat de stabilité de l'environnement familial de numératie¹.

À notre connaissance, aucune étude *concurrente* n'a permis d'indiquer une relation entre environnement familial de numératie et compétences numériques chez l'enfant après le début de la scolarisation (soit pour avoir utilisé des indicateurs très larges sur l'environnement familial d'apprentissage, Lehl et al., 2020; Sammons et al., 2015; Tamis-LeMonda, Luo, McFadden, Bandel, & Vallotton, 2017; soit pour avoir présenté et analysé les données d'enfants de CE1 sans distinction avec ceux de maternelle et de CP, LeFevre et al., 2009). Ainsi, des études supplémentaires sont nécessaires pour explorer si les relations entre HNE et compétences chez des enfants déjà scolarisés sont similaires à celles déjà mises en évidence chez les enfants plus jeunes. Cette question est d'autant plus cruciale que la méta-analyse de Daucourt et collaborateurs (2021) a permis d'indiquer que les attentes parentales étaient susceptibles d'expliquer une part plus importante de la variance dans les compétences des enfants plus âgés.

3.10.6. Question de la « direction » des associations mesurées : intérêt des études interventionnelles

Les études ayant conduit à l'observation de relations entre HNE et compétences numériques de l'enfant ne permettent pas de conclure au sens « directionnel » de ces relations. Cette problématique de la causalité a pu être explorée par des études longitudinales ayant utilisé des modèles statistiques particuliers (Ciping et al., 2015; Silinskas et al., 2020) ou, *a minima*, en prenant en compte les estimations subjectives par les parents des compétences de leurs enfants (voir section 3.6.4 de ce chapitre). Quelques études interventionnelles ont néanmoins permis d'explorer, avec succès, la causalité des relations entre caractéristiques d'environnement familial d'apprentissage en numératie et compétences de l'enfant.

Un premier type d'intervention a consisté à informer les parents, aussi bien sur le développement des compétences numériques chez l'enfant que sur les voies possibles d'enrichissement des stimulations réalisées au sein de leur foyer dans le domaine de la numératie. Les conséquences de ces interventions ont été mesurées à la fois sur les stimulations numériques effectivement réalisées par ces parents, mais aussi sur la progression des compétences mathématiques chez leur enfant (comparativement aux groupes contrôles, sans guidage initial ; Niklas, Cohrssen, & Tayler, 2016; Vandermaas-Peeler, Boomgarden, Finn, & Pittard, 2012).

D'autres interventions ont consisté à utiliser différents types de « matériel », de l'affichage au supermarché d'affichettes ludiques comportant des informations mathématiques (Hanner, Braham, Elliott, & Libertus, 2019), en passant par l'usage de jeux (Cheung & McBride-Chang, 2015; Ramani & Scalise, 2020) ou la lecture de livres avec des nombres

¹ Nous soulignons cependant le caractère non exclusif de ces deux interprétations. À ce titre, la régression hiérarchique utilisée dans l'étude de Kleemans et al. (2018) indiquait la significativité des deux variables (compétences arithmétiques antérieures et environnement familial de numératie précoce) pour expliquer une part de la variance dans les scores de mathématiques en CE1.

(Gibson, Gunderson, & Levine, 2020), jusqu'à l'usage d'application sur tablette (Berkowitz et al., 2015; M. W. Schaeffer, Rozek, Berkowitz, Levine, & Beilock, 2018). Ces interventions ont permis d'objectiver une augmentation des stimulations numériques (que ce soit par le langage employé ou les activités réalisées), mais également un bénéfice se traduisant par l'augmentation des compétences mathématiques des enfants des groupes expérimentaux.

Cependant, ces résultats appellent deux commentaires. Le premier concerne la contingence du matériel utilisé. Dans l'étude de Cheung et McBride-Chang (2015), les enfants qui progressaient étaient ceux dont les parents avaient reçu une formation sur comment utiliser le jeu pour que leur enfant bénéficie au mieux de cette interaction (comparativement aux parents ayant joué sans « formation »). Dans l'étude de Berkowitz et collaborateurs (2015), les enfants qui progressaient le plus après avoir utilisé l'application avec leurs parents étaient ceux dont les parents étaient les plus anxieux vis-à-vis des mathématiques. De prime abord, ce résultat peut sembler contradictoire avec celui de Maloney et collaborateurs (Maloney et al., 2015; décrit section 3.7.2) qui avaient montré que les enfants qui progressaient le moins au cours d'une année scolaire étaient justement ceux qui avaient bénéficié le plus d'interaction avec leurs parents anxieux pour réaliser leurs devoirs scolaires en mathématiques. Cependant la comparaison des résultats de ces deux études permet là aussi de souligner l'importance du degré de contingence de la tâche réalisée : l'application utilisée dans le cadre de l'intervention était ludique et surtout proposait pour chaque question « mathématique » la réponse associée.

Le deuxième commentaire concerne la complexité du matériel utilisé par rapport aux compétences initiales de l'enfant (et qui n'est donc pas sans rappeler la notion de « zone proximale de développement », précédemment évoquée). Dans l'étude de Gibson et collaborateurs (2020) différents groupes étaient étudiés (celui utilisant des livres avec des petits nombres, 1 à 4, celui avec grands nombres, 4 à 6, et le groupe contrôle) et seul celui qui avait réalisé une activité adaptée au niveau initial des enfants entraînait une progression significative des compétences numériques chez ces derniers (c.-à-d. le groupe avec les livres contenant des petits nombres).

De façon générale, ces études interventionnelles ont permis de démontrer un rôle causal entre stimulations parentales en numératie et compétences des enfants, mais une telle relation causale ne peut cependant pas se traduire en une simple relation mécanique indiquant que plus de stimulations numériques parentales entraîneraient nécessairement plus de compétences chez l'enfant. Cette relation pourrait dépendre des caractéristiques initiales, à la fois des parents (leurs connaissances, croyances, attitude) et des enfants (notamment leurs compétences effectives). Par ailleurs, soulignons que certaines études interventionnelles ont indiqué l'intérêt potentiel de coupler ces interventions, dans les environnements à la fois scolaires et familiaux (de Chambrier et al., 2021; Starkey et al., 2004).

3.10.7. Affiner la compréhension des habiletés numériques liées au HNE

Une dernière limite importante, mise en avant par Mutaf-Yildiz et collaborateurs (2020) ainsi que par Dowker (2021) dans leurs articles de revue, concerne la très grande variabilité des scores numériques utilisés à travers les différentes études comme indicateur des compétences

des enfants. En effet, une grande majorité d'études¹ ont rapporté des relations avec des scores composites (symboliques seuls *ou* symboliques et non symboliques ; Cheung et al., 2018; L. Elliott et al., 2017; Kleemans et al., 2012; LeFevre, Polyzoi, et al., 2010; LeFevre et al., 2009; Lehrl et al., 2020; Manolitsis et al., 2013; Napoli & Purpura, 2017; Niklas et al., 2016; Niklas & Schneider, 2014; Purpura et al., 2020; Segers et al., 2015; Silver et al., 2021; Susperreguy & Davis-Kean, 2016; Susperreguy et al., 2021; Thippana et al., 2020; Thompson et al., 2017; Wei et al., 2020; Zippert et al., 2020). Une étude a rapporté des résultats en faveur d'une absence de relation avec ce type de scores composite (De Keyser et al., 2020).

Le deuxième type de mesures que nous avons le plus recensé concerne la résolution de calculs arithmétiques, avec une majorité d'études ayant montré une relation avec les caractéristiques HNE (Berkowitz et al., 2015; Casey et al., 2018; Dearing et al., 2012; Huang et al., 2017; Kleemans et al., 2013, 2018; Yingqiu Pan et al., 2006; Río et al., 2017; Soto-Calvo et al., 2020; Susperreguy, Douglas, et al., 2020; Vasilyeva et al., 2018) et quelques études ayant rapporté des relations nulles ou négatives (DePascale et al., 2021; Lehrl et al., 2020; Manolitsis et al., 2013; Mutaf-Yıldız et al., 2018b).

Dans certains protocoles le type d'épreuves arithmétiques était spécifié, peuvent donc être recensées des épreuves dissociées selon la taille des nombres à manipuler (Kleemans et al., 2018), des épreuves de fluence arithmétique (Casey et al., 2018; LeFevre et al., 2009; Manolitsis et al., 2013), ou différents types d'énoncés arithmétiques : problèmes arithmétiques verbaux (Berkowitz et al., 2015; Huang et al., 2017; Río et al., 2017; Susperreguy, Burr, et al., 2020), usage d'énoncés avec supports visuels (Mutaf-Yıldız et al., 2018a) voire d'arithmétique non symbolique² (Skwarchuk et al., 2014). Néanmoins, il n'existe pas à notre connaissance de travaux ayant proposé un modèle de compréhension des composantes numériques les plus susceptibles d'être liées à l'environnement familial de numératie.

Par ailleurs ont aussi pu être utilisées des tâches très diverses telles que la comparaison de grandeurs non symboliques (Susperreguy, Burr, et al., 2020; Susperreguy, Douglas, et al., 2020; Vasilyeva et al., 2018; Wei et al., 2020) ou symboliques (Ramani & Scalise, 2020; Susperreguy, Douglas, et al., 2020), des tâches réalisées pour évaluer la ligne numérique symbolique (Mutaf-Yıldız et al., 2018a; Ramani & Scalise, 2020; Wei et al., 2020), de reconnaissance et lecture de symboles (Bernabini et al., 2020; LeFevre et al., 2002; Soto-Calvo et al., 2020; Vasilyeva et al., 2018), la connaissance de la chaîne numérique verbale (Benavides-Varela et al., 2016; Cheung et al., 2020; Manolitsis et al., 2013; Yingqiu Pan et al., 2006; Ramani & Scalise, 2020), du dénombrement (Bernabini et al., 2020; Mutaf-Yıldız et al., 2018a; Soto-Calvo et al., 2020) ou du principe cardinalité (Gibson et al., 2020; Gunderson & Levine, 2011; Levine et al., 2010; Soto-Calvo et al., 2020; Zhou et al., 2006). Aussi la grande hétérogénéité des mesures employées ne permet pas d'identifier de façon spécifique les

¹ Une même étude peut être citée pour plusieurs types d'habiletés si des résultats dissociés ont été utilisés. Par ailleurs les études mentionnées selon les compétences testées sont très hétérogènes concernant les mesures HNE employées.

² Tâche adaptée de Levine et al. (1992) et discutée dans le chapitre 3, section 3.1.3.

composantes numériques susceptibles d'être influencées de façon spécifique par l'environnement familial.

Le cadre de compréhension de l'environnement familial en numératie a été élaboré à la suite des travaux ayant porté sur l'environnement familial d'apprentissage général et surtout en analogie au modèle proposé pour caractériser les expériences familiales d'apprentissage en littératie. Ce champ de recherche s'est cependant enrichi d'un très grand nombre de travaux ces dernières années. Ils ont permis d'identifier davantage de variables à explorer au sein de cet environnement familial : stimulations certes (activités de numératie ou langage mathématique), mais aussi différents traits parentaux (leurs attentes, attitudes, compétences ou caractéristiques socio-économiques). Dans la majorité, les études réalisées ont révélé des relations entre ces variables familiales et les compétences numériques des enfants (Daucourt et al., 2021; Mutaf-Yildiz et al., 2020). Cependant ce constat global recouvre en fait une grande hétérogénéité des mesures réalisées, des méthodes statistiques employées et des résultats obtenus. À l'exception de Skwarchuk et collaborateurs (2014) proposant une dissociation entre compétences « symboliques » versus « non symboliques » selon le type de stimulations familiales en numératie, il n'existe pas de modèle proposant d'expliquer les relations objectivées avec différentes composantes numériques chez l'enfant. Par ailleurs, à quelques rares exceptions, très peu d'études ont essayé de capturer l'ensemble des différentes variables caractéristiques de l'environnement familial au sein d'un même protocole expérimental. La question de la spécificité de l'environnement familial d'apprentissage a été peu explorée, que ce soit par la prise en compte des mesures des compétences parentales, de leurs perceptions subjectives des compétences de leur enfant ou encore des caractéristiques de l'environnement d'apprentissage plus spécifique au domaine de la littératie. Cette question est d'autant plus importante, car, bien qu'il n'existe pas de véritable modèle permettant de lier les caractéristiques HNE à certains types d'habiletés numériques, une relation entre caractéristiques familiales distales (SES) et composantes exclusivement verbales du langage avait été suggérée (pour revue, voir N. C. Jordan & Levine, 2009)¹.

¹ Voir chapitre 3, section 3.1

Synthèse et hypothèses de travail

1. Synthèse

Comme nous l'avons vu dans cette introduction, la réussite en mathématique des élèves est marquée par de fortes disparités socio-économiques. Année après année, l'analyse d'un nombre considérable de données de cohortes converge à montrer l'importance de ce phénomène, et cela à tous les âges, y compris dès l'entrée à l'école élémentaire. Les difficultés en mathématiques des enfants issus des milieux socio-économiques les plus précaires pourraient précéder le début des apprentissages formels et persister ensuite en dépit de la scolarisation.

Néanmoins, le fait de présenter des « difficultés en mathématiques » ne relève pas d'une seule situation type (p. ex. une situation de résolution arithmétique). Premièrement, les mathématiques ne sauraient être limitées au seul champ de l'arithmétique, mais recouvrent au contraire un large champ de composantes à la fois non symboliques et symboliques. Certaines de ces habiletés symboliques seraient d'ailleurs à elles seules des étapes complexes d'apprentissage dès le plus jeune âge, entraînant par voie de conséquence des disparités interindividuelles précoces susceptibles de se maintenir par la suite (p. ex. l'acquisition du principe de cardinalité ; Marle et al., 2014; Nguyen et al., 2016). De plus, les compétences arithmétiques sont en elles-mêmes hétérogènes ; elles dépendent de compétences et procédures plurielles.

Par conséquent, pour comprendre cette plus grande prévalence des enfants issus des classes socio-économiques les plus défavorisées parmi les élèves présentant des difficultés en mathématiques, quelques études ont cherché à identifier les sous-composantes du domaine numérique susceptibles d'expliquer ces difficultés. Faisant suite aux très nombreuses études ayant documenté le poids des disparités socio-économiques dans le domaine des compétences langagières, Jordan et Levine (2009) ont suggéré que les difficultés mathématiques des enfants issus des milieux socio-économiques les plus précaires pourraient s'expliquer par leur composante verbale. Cette proposition théorique a été étayée par les résultats de plusieurs études comportementales, mais certaines études ont aussi montré des résultats contradictoires (pour des compétences numériques comportant une composante verbale, mais également pour des compétences numériques non symboliques, *a priori* sans composante verbale directe). Des résultats supplémentaires obtenus à partir d'un protocole IRMf chez des enfants de 8 ans pourraient cependant être considérés comme des arguments en faveur de cette dichotomie (Demir et al., 2015). Comparativement à leurs pairs plus défavorisés d'un point de vue socio-économique, le processus de résolution arithmétique (soustraction) montrait un recrutement accru des régions verbales chez les enfants les plus favorisés. Pour autant, cette étude ne montrait pas de lien entre le SES de l'enfant et ses compétences arithmétiques, mais davantage

une disparité des compétences au sein des classes sociales favorisées ou défavorisées. Ainsi, bien que statistiquement informatives sur les études de cohorte à grande échelle, les caractéristiques socio-économiques (distales) de l'environnement familial pourraient en fait recouvrir une réalité hétérogène.

Depuis quelques dizaines d'années, identifier ce qui se joue au sein des familles est devenu un nouvel enjeu de connaissances afin d'expliquer, au moins en partie, les difficultés d'apprentissage de certains enfants. En partant de l'étude de l'environnement familial d'apprentissage au sens large, puis de façon circonscrite à un domaine d'apprentissage spécifique (d'abord à la littératie puis à la numératie), s'est développé un champ de recherche important visant à identifier des expériences significatives de l'enfant au sein de son foyer.

Le champ de recherche sur l'environnement familial de numératie a connu un accroissement récent, mais exponentiel ces dernières années. À partir d'un modèle analogue à celui de l'environnement familial de littératie s'est peu à peu développé un modèle étendu de l'environnement familial de numératie (Dowker, 2021; Skwarchuk et al., 2014; Susperreguy, Douglas, et al., 2020). Ce modèle théorique permet avant tout un cadre d'identification et d'évaluation des stimulations parentales dans le domaine de la numératie, ainsi que de différentes caractéristiques parentales susceptibles d'exercer une influence plus ou moins évidente sur ces stimulations. Néanmoins, la revue de la littérature que nous avons proposée met en avant la grande hétérogénéité des études publiées dans ce champ de recherche (Daucourt et al., 2021; Mutaf-Yıldız et al., 2020). Cette hétérogénéité concerne aussi bien les résultats obtenus que les mesures utilisées pour caractériser l'environnement familial selon les protocoles expérimentaux, que ce soit dans leurs caractéristiques d'exhaustivité en ce qui concerne les stimulations familiales en numératie, ou dans leur très grande variabilité concernant la prise en considération des traits parentaux. S'ajoutent à cette hétérogénéité plusieurs questions restées en suspens (certaines récemment soulignées par un consortium de chercheurs ; Hornburg et al., 2021) et pourtant nécessaires à la compréhension des relations entre caractéristiques de l'environnement familial de numératie et compétences numériques des enfants.

Ainsi, de façon générale, au moins quatre grandes limites majeures apparaissent au sein de la littérature sur l'environnement familial d'apprentissage en numératie. Premièrement, les mesures des caractéristiques de cet environnement familial d'apprentissage en numératie manquent d'homogénéité, avec une grande variabilité dans le nombre d'items utilisés pour évaluer les activités familiales de numératie, mais aussi des traits parentaux évalués. Deuxièmement, les études ne prennent pas assez en considération les caractéristiques cognitives des enfants (telles que les mesures d'intelligence ou de langage), susceptibles de participer à leurs performances mathématiques (Kleemans et al., 2016) et dont la mesure est pourtant très peu systématisée dans les études réalisées jusqu'à présent. Troisièmement, les mesures des stimulations d'apprentissage observées au sein de l'environnement familial ont souvent négligé de vérifier la spécificité du « domaine » concerné par ces stimulations (c.-à-d. numératie versus littératie). En fait, seul un petit nombre d'études a visé à évaluer conjointement les activités familiales de numératie et de littératie et leurs résultats sont assez hétérogènes concernant la

spécificité de ces activités d'apprentissage sur un domaine de compétences spécifique (c.-à-d. numératie ou littératie). Quatrièmement, les études ne différencient pas suffisamment les différentes habiletés numériques susceptibles d'être davantage liées à une ou plusieurs composantes de l'environnement familial de numératie. Skwarchuk et collaborateurs (2014) avaient proposé une dichotomie entre compétences symboliques et non symboliques (les premières étant davantage liées aux activités formelles et les secondes aux activités informelles de numératie) qui a connu peu d'écho dans les études ultérieures. À quelques rares exceptions (Mutaf-Yıldız et al., 2018a; Susperreguy, Burr, et al., 2020), les études réalisées ont peu cherché à décomposer de façon systématique les composantes numériques.

Cette dernière limite vis-à-vis des différentes habiletés numériques souligne finalement le contraste entre les deux champs de recherche ayant caractérisé l'environnement familial, celui ayant utilisé la seule mesure SES distale et celui ayant visé à sonder les caractéristiques plus proximales de l'environnement familial d'apprentissage. Dans le premier cas, la grande variabilité¹ des mesures SES employées a été occultée et toutes les ressources méthodologiques et théoriques semblent avoir été employées à objectiver et mesurer au mieux les différentes composantes numériques. Un glissement inverse semble s'être opéré dans le second champ de recherche sur l'environnement familial de numératie, avec une préoccupation majeure concernant l'identification et la mesure des caractéristiques quantifiables des stimulations de numératie adressées aux enfants ou des traits parentaux, en dépit finalement d'une identification précise des composantes numériques chez l'enfant. Pourtant pour une meilleure compréhension des relations entre domaine de l'environnement familial et domaine des compétences numériques des enfants, la caractérisation fine de l'un de ces domaines ne devrait pas amener à négliger une caractérisation tout aussi fine de l'autre domaine.

2. Présentation des hypothèses expérimentales

À la suite de ces chapitres théoriques dressant une revue de la littérature, la partie expérimentale vise à présenter le travail de recherche réalisé dans le cadre de cette thèse. Tout en essayant d'explorer les différentes limites listées, l'objectif global des expérimentations menées était de caractériser de façon exhaustive et préciser les caractéristiques de l'environnement familial d'apprentissage en numératie, les sous-composantes des habiletés numériques des enfants et d'identifier les relations entre ces deux ensembles de variables.

Dans une première étude, nous avons avant tout souhaité répondre à deux des principales limites soulignées précédemment : l'hétérogénéité des mesures utilisées pour caractériser les activités familiales de numératie et l'hétérogénéité des mesures utilisées pour évaluer les habiletés numériques des enfants. Pour ce faire, nous avons cherché à utiliser les mesures les

¹ Voir colonne « Mesures SES » du **Tableau 2** du chapitre 3.

plus exhaustives parmi celles identifiées dans notre revue de la littérature. Nous avons également voulu pallier deux autres limites mises en avant, c'est-à-dire le manque d'évaluation systématique des compétences cognitives chez les enfants susceptibles de participer à leurs compétences mathématiques, mais également le manque de mesures concomitantes des fréquences des activités familiales d'apprentissage en littératie (ce qui ne permet pas d'isoler la spécificité de la relation mesurée entre activités familiales d'apprentissage en numératie et habiletés numériques des enfants).

Afin de répondre à ce premier objectif et comme détaillé par la suite, cette première étude a consisté à tester 66 enfants âgés de 8 ans avec un de leurs parents. Premièrement, nous avons demandé aux parents de remplir, sur tablette, un large questionnaire afin d'évaluer avec une grande exhaustivité les activités familiales d'apprentissage dans le domaine de la numératie ($n=36$), mais aussi de la littératie ($n=18$). Tout comme chez LeFevre et Skwarchuk (2009; 2014), ces activités étaient caractérisées selon leur caractère informel ou formel. Cette deuxième catégorie d'activité était également dissociée selon le niveau de complexité (c.-à-d. des activités formelles de numératie de niveau basique ou complexe). Deuxièmement, nous avons évalué les habiletés numériques des enfants de façon extensive à l'aide d'une batterie de tests standardisés adaptés aux âges des enfants (via 13 tâches différentes déclinées en 5 sous-scores : estimation de quantités, compréhension des nombres symboliques, comptage, transcodage, calcul arithmétique). Pour évaluer la fluence arithmétique, nous avons également administré aux enfants une tâche standardisée de fluence arithmétique. Une batterie permettant une évaluation abrégée de l'efficacité cognitive des enfants ainsi qu'un score de fluence de lecture ont également été utilisés.

L'étendue des données collectées nous a permis d'explorer la dichotomie proposée par Skwarchuk et collaborateurs (2014). Tout spécifiquement, nous avons fait l'hypothèse selon laquelle la fréquence des pratiques informelles de numératie serait associée aux compétences non symboliques des enfants, tandis que la fréquence des pratiques formelles de numératie serait associée aux compétences symboliques, en particulier lorsque celles-ci seraient suffisamment complexes par rapport à l'âge des enfants. De plus nous avons également fait l'hypothèse que cette relation ne dépendrait pas des facteurs cognitifs (non numériques) mesurés chez ces enfants. Nous avons également prédit que les compétences mathématiques des enfants seraient davantage expliquées par les activités familiales d'apprentissage dans le domaine de la numératie, comparativement à celles relevant de la littératie.

Cette même étude nous a également permis d'explorer davantage la limite de la littérature actuelle concernant l'hétérogénéité des mesures utilisées pour qualifier l'environnement familial de numératie. En plus de chercher à qualifier de façon exhaustive les activités familiales de numératie, nous avons donc voulu mesurer l'ensemble des caractéristiques parentales identifiées dans la littérature comme étant susceptibles d'expliquer les activités d'apprentissage de numératie initiées avec leurs enfants. Ces mesures nous ont permis de tester de façon extensive les liens entre les caractéristiques des parents testés et la fréquence des activités de numératie qu'ils avaient rapportée.

Pour répondre à ce deuxième objectif, plusieurs items du questionnaire rempli par les parents ont été dédiés à l'évaluation de leurs attitudes et évaluations subjectives de leurs propres

compétences en mathématiques, leurs attentes concernant la réussite scolaire de leurs enfants en mathématiques et leurs estimations subjectives des compétences mathématiques de ces derniers et leurs caractéristiques socio-économiques. Les compétences objectives des parents en mathématiques et en lecture ont également été évaluées via l'administration de tests standardisés. Sur la base des nombreux travaux recensés dans la littérature pour avoir montré un lien direct entre niveau d'attentes parentales sur la réussite scolaire en mathématiques de leurs enfants et activités de numération réalisées au domicile, nous avons fait l'hypothèse d'obtenir une relation entre attentes parentales et activités familiales de numération.

Dans une deuxième étude, nous avons souhaité interroger le postulat théorique qui subsiste dans la littérature et selon lequel la relation entre environnement familial et compétences numériques pourrait s'expliquer uniquement par les composantes verbales de ces compétences (N. C. Jordan & Levine, 2009). Ce postulat est notamment soutenu par plusieurs études de neuro-imagerie montrant que les disparités de milieu socio-économiques entre enfants affectent principalement les régions cérébrales impliquées dans le langage et les fonctions exécutives (Lawson, Hook, & Farah, 2018; Merz et al., 2019; Romeo, 2019). C'est notamment le cas des deux seules études ayant exploré la relation entre les disparités socio-économiques et l'activité cérébrale associée au calcul arithmétique (Demir et al., 2015; Demir-Lira et al., 2016). Ainsi, nous avons souhaité évaluer si la relation entre environnement familial en numération et compétences en mathématiques pouvait s'expliquer par une influence des activités numériques sur l'activité cérébrale liée au traitement numérique dans l'IPS (plus que par l'activité cérébrale liée au traitement du langage plus généralement). Contrairement au seul protocole ayant jusqu'à présent caractérisé l'activité cérébrale des enfants pendant une tâche d'arithmétique et selon leur environnement familial (caractérisé uniquement à partir du SES ; Demir et al., 2015; Demir-Lira et al., 2016), nous avons choisi d'identifier l'activité cérébrale dédiée à un traitement numérique plus « fondamental », c'est-à-dire le traitement des chiffres arabes (en d'autres termes le traitement des quantités symboliques), et de contraster ceci avec l'activité cérébrale liée au traitement des mots.

Pour répondre à ce nouvel objectif, les enfants ayant participé à l'étude comportementale décrite ci-dessus ont été invités à réaliser une session d'IRMf au sein de laquelle étaient mesurées les réponses cérébrales associées au traitement des nombres (symboliques avec les chiffres arabes dans une tâche principale, mais également non-symboliques dans une tâche annexe) et des mots. Le paradigme utilisé était un paradigme d'adaptation au sein duquel les stimuli (soit des nombres, soit des mots) étaient présentés de façon répétée au participant. Dans certains blocs (appelés « blocs d'adaptation »), les stimuli étaient identiques. Dans d'autres blocs (appelés « blocs de non-adaptation »), les stimuli étaient systématiquement différents (voir **Figure 44**). Ce type de paradigme repose sur l'idée que la présentation répétée d'un stimulus donné entraîne une diminution de l'activité dans les régions cérébrales qui traitent spécifiquement ce stimulus (Grill-Spector & Malach, 2001; Krekelberg et al., 2006). Cela en fait un paradigme particulièrement adapté aux études de neurosciences cognitives développementales, car il permet d'éviter les confusions dues aux performances à la tâche et, à ce titre, permet un degré élevé de comparabilité entre des groupes d'âge ou de niveau

différents (Nordt, Hoehl, & Weigelt, 2016). Dans notre cas, nous anticipions donc de mesurer la réponse cérébrale liée aux nombres en soustrayant les blocs d'adaptation de nombres aux blocs de non-adaptation de nombres (capturant ainsi un « effet d'adaptation aux nombres »), et la réponse cérébrale liée aux mots en soustrayant les blocs d'adaptation de mots aux blocs de non-adaptation de mots (capturant ainsi un « effet d'adaptation aux nombres »).

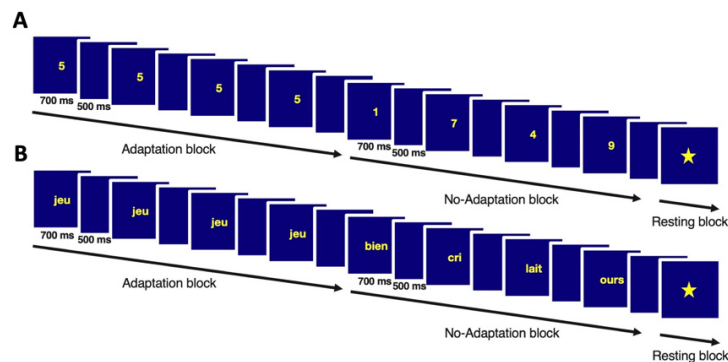


Figure 44 : Tâches IRMf d'adaptation. **A.** Dans la tâche numérique, les participants visualisaient des chiffres qui pouvaient être soit identiques (blocs d'adaptation) soit différents (blocs de non-adaptation). **B.** Dans la tâche de langage, les participants visualisaient des mots qui pouvaient être soit identiques (blocs d'adaptation) soit différents (blocs de non-adaptation).

Si l'environnement familial d'apprentissage en numératie affecte les capacités mathématiques par le biais d'une stimulation spécifique des mécanismes dédiés au traitement des nombres plutôt que du langage, alors il devrait exister une relation entre les activités numériques à la maison et le traitement neural dédié au traitement des nombres dans l'IPS. Plus spécifiquement, nous avons fait l'hypothèse que la relation entre activités familiales en numératie et compétences arithmétiques des enfants (« voie C » directe, sur **Figure 45**) s'expliquerait par un effet des activités familiales sur le traitement des nombres dans l'IPS (« voie A », sur **Figure 45**), qui aurait lui-même un effet sur les compétences mathématiques (mesurées par le biais d'un test d'arithmétique) des enfants (« voie B », sur **Figure 45**). Ainsi, ces effets indirects expliqueraient (du moins en partie) la relation comportementale entre activités familiales en numératie et compétences arithmétiques des enfants. (« voie C' », indirecte sur **Figure 45**). Si ces effets sont spécifiques aux nombres, alors ils ne devraient pas être observés lors de la tâche d'adaptation aux mots.

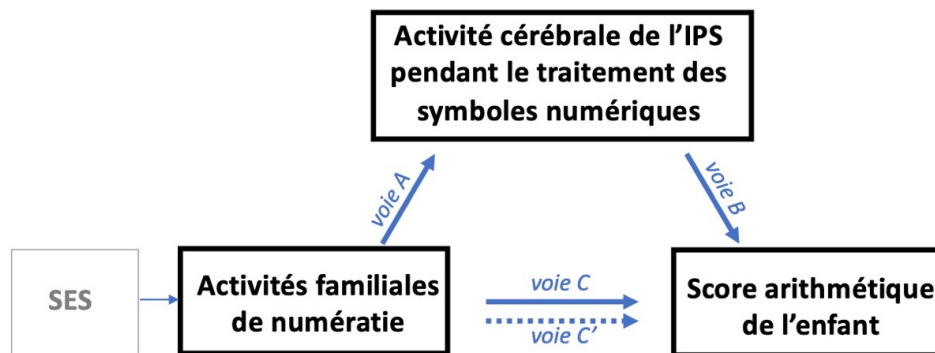


Figure 45 : Modèle hypothétique de la médiation entre activités familiales de numération et compétences arithmétiques par l'activité cérébrale dédiée aux aspects numériques ; tout en contrôlant pour les caractéristiques socio-économiques (modèle hypothétique adapté d'études sur l'environnement familial de littératie ; Romeo, Leonard, et al., 2018; mais aussi Merz et al., 2020)

PARTIE EXPÉRIMENTALE

Chapitre 5 : Première étude

The relation between home numeracy practices and a variety of math skills in elementary school children.

Article 1: Girard Cléa, Bastelica Thomas, Léone Jessica., Epinat-Duclos Justine., Longo Léa & Prado Jérôme (2021). The relation between home numeracy practices and a variety of math skills in elementary school children, *Plos One*, 16(9).
<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255400>

Abstract

A growing number of studies suggest that the frequency of numeracy experiences that parents provide at home may relate to children's mathematical development. However, the relation between home numeracy practices and children's numerical skills is complex and might depend upon both the type and difficulty of activities, as well as the type of math skills. Studies have also argued that this relation may be driven by factors that are not systematically controlled for in the literature, including socio-economic status (SES), parental math skills and children's IQ. Finally, as most prior studies have focused on preschoolers, it remains unclear to what extent there remains a relation between the home numeracy environment and math skills when children are in elementary school. In the present study, we tested an extensive range of math skills in 66 8-year-olds, including non-symbolic quantity processing, symbolic number understanding, transcoding, counting, and mental arithmetic. We also asked parents to complete a questionnaire about their SES, academic expectations, academic attitudes, and the numeracy practices that they provide at home. Finally, we measured their arithmetic fluency as a proxy for parental math skills. Over and above differences in socio-economic status, parental arithmetic fluency, child's IQ, and time spent with the child, we found a positive relation between the frequency of formal numeracy practices that were at or above grade level and two separate measures of mental arithmetic. We further found that the frequency of these advanced formal numeracy practices was related to parents' academic expectations. Therefore, our study shows that home numeracy experiences predict arithmetic skills in elementary school children, but only when those activities are formal and sufficiently challenging for children.

RESEARCH ARTICLE

The relation between home numeracy practices and a variety of math skills in elementary school children

Cléa Girard ^{*}, Thomas Bastelica, Jessica Léone, Justine Epinat-Duclos, Léa Longo, Jérôme Prado ^{*}

Lyon Neuroscience Research Center (CRNL), Experiential Neuroscience and Mental Training Team, INSERM U1028—CNRS UMR5292, University of Lyon, Lyon, France

^{*} clea.girard@etu.univ-lyon1.fr (CG); jerome.prado@univ-lyon1.fr (JP)



OPEN ACCESS

Citation: Girard C, Bastelica T, Léone J, Epinat-Duclos J, Longo L, Prado J (2021) The relation between home numeracy practices and a variety of math skills in elementary school children. *PLoS ONE* 16(9): e0255400. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255400>

Editor: Madelon van den Boer, Universiteit van Amsterdam, NETHERLANDS

Received: December 1, 2020

Accepted: July 16, 2021

Published: September 20, 2021

Peer Review History: PLOS recognizes the benefits of transparency in the peer review process; therefore, we enable the publication of all of the content of peer review and author responses alongside final, published articles. The editorial history of this article is available here: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255400>

Copyright: © 2021 Girard et al. This is an open access article distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Data Availability Statement: The data underlying this study are publicly available at <https://osf.io/vty3c/files/>.

Abstract

A growing number of studies suggest that the frequency of numeracy experiences that parents provide at home may relate to children's mathematical development. However, the relation between home numeracy practices and children's numerical skills is complex and might depend upon both the type and difficulty of activities, as well as the type of math skills. Studies have also argued that this relation may be driven by factors that are not systematically controlled for in the literature, including socio-economic status (SES), parental math skills and children's IQ. Finally, as most prior studies have focused on preschoolers, it remains unclear to what extent there remains a relation between the home numeracy environment and math skills when children are in elementary school. In the present study, we tested an extensive range of math skills in 66 8-year-olds, including non-symbolic quantity processing, symbolic number understanding, transcoding, counting, and mental arithmetic. We also asked parents to complete a questionnaire about their SES, academic expectations, academic attitudes, and the numeracy practices that they provide at home. Finally, we measured their arithmetic fluency as a proxy for parental math skills. Over and above differences in socio-economic status, parental arithmetic fluency, child's IQ, and time spent with the child, we found a positive relation between the frequency of formal numeracy practices that were at or above grade level and two separate measures of mental arithmetic. We further found that the frequency of these advanced formal numeracy practices was related to parents' academic expectations. Therefore, our study shows that home numeracy experiences predict arithmetic skills in elementary school children, but only when those activities are formal and sufficiently challenging for children.

Introduction

Numeracy is fundamental to many aspects of professional and personal life in modern society [1]. Yet, there are substantial individual differences in math skills among children [2]. A growing body of research indicates that these individual differences can be observed even before the beginning of formal schooling [3–6]. This raises the possibility that disparities in numerical

Funding: This research was supported by grants from the Agence Nationale de la Recherche (ANR-14-CE30-0002 and ANR-17-CE28-0014) to JP.

Competing interests: The authors have declared that no competing interests exist.

skills among children might (at least in part) come from their experiences with math at home [7–12].

The idea that children's home numeracy experiences may provide a foundation for math learning in school is motivated by decades of research showing that children's early literacy activities at home (e.g., reading and conversing with their caregivers) relate to future literacy skills [13–17]. Thus, in the same way as early home literacy activities define what has been termed the "home literacy environment" (HLE), activities and resources that relate to numeracy learning at home may define a "home numeracy environment" (HNE) [7–10]. Although research on the HNE remains more limited than research on the HLE, a growing number of studies for the most part relying on parental questionnaires [18–20], suggests associations between home numeracy practices and children's math outcomes [21–24]. However, the relation between math skills and the HNE appears to be relatively complex and sometimes inconsistent (for a review, see [25, 26]). For example, several studies have found a relation between higher quality HNE (i.e., more frequent home numeracy activities) and better numerical skills (e.g., [8, 10, 19, 20, 22, 24, 27–32]). However, other studies have failed to find such an association (e.g., [33–36]) and some have even found a negative relation [22, 37]. How can this relative inconsistency be explained?

The HNE may involve practices that differ in type and difficulty

As a first possible way to explain the inconsistent relation between the HNE and math skills, LeFevre and colleagues have argued that home numeracy activities may have different effects depending on whether they are formal and informal [20, 22, 38]. Both formal and informal activities involve manipulating math concepts. However, formal activities are those in which parents explicitly intend to teach numerical skills to their child. For instance, parents clearly intend to teach math concepts when they engage in counting activities or explain the meaning of Arabic numerals. In contrast, informal activities are those whose purpose is not to teach numerical skills. Rather, these activities represent informal opportunities for children to be exposed to various math concepts, such as fraction when cooking or numerical ordering when playing a linear board game [20, 22]. Consistent with a conceptual dissociation between formal and informal numeracy activities, a few studies have found that the relation between the HNE and math skills differs as a function of the type of activity [20, 22, 39–41]. Note, however, that the pattern of differences is not necessarily consistent between samples, with some studies reporting a unique relation between formal numeracy practices and math skills [19, 39] and others reporting a unique relation between informal numeracy practices and math skills [20].

It is also possible that the inconsistent relation between the HNE and math skills may be explained by differences in the level of complexity of home activities. Skwarchuk [42] proposed that a distinction should be made between (a) formal activities that are basic and typically do not challenge children (e.g., counting a small number of objects in preschoolers) and (b) formal activities that are more advanced and typically do challenge them (e.g., count by twos in preschoolers). Overall, this conceptual distinction has been broadly supported in the literature. For instance, studies in which basic and advanced formal activities are distinguished have found a positive relation between children's math skills and the frequency of advanced formal numeracy activities [22, 23, 42, 43]. In contrast, the frequency of basic numeracy activities has been found to be either negatively correlated or not associated with children's math skills [44]. Overall, then, both differences in type (formal versus informal) and difficulty (basic versus advanced) of numeracy activities need to be considered when investigating a potential link between the HNE and math skills.

The HNE may relate to some math skills and not others

The relation between the HNE and math skills may not only vary with the heterogeneity of home numeracy practices, but also with the type of children's math skills. In other words, the HNE might relate to some aspects of mathematical skills but not others. Although the large majority of studies on the HNE have used composite math scores (e.g., [10, 20, 30, 31, 35, 43, 45, 46]), there is growing evidence that the relation between the HNE and children's math skills may depend upon the type of skill measured [22, 24, 41, 47]. For example, Skwarchuk and colleagues [22] found that the frequency of formal home numeracy practices relates to symbolic number knowledge, but not to non-symbolic arithmetic skills. In contrast, the frequency of informal home numeracy practices relates to non-symbolic arithmetic skills, but not to symbolic number knowledge. More recent studies also found that the relation between the HNE and children's math skills depends upon the type of math ability (e.g., symbolic number processing, mapping, non-symbolic number processing, and calculation) as well as the type of numeracy practice (i.e., formal versus informal) [24, 41]. Therefore, in addition to differences in the type and difficulty of numeracy activities, differences in the type of math skills investigated may be an important factor when investigating the HNE [25]. Yet, many studies on the HNE lack a comprehensive assessment of a range of numerical skills in children [41].

HNE and math skills in elementary school

Another dimension that might affect the relation between the HNE and math skills is the age of children. To date, the large majority of studies have examined the link between HNE and math performance in pre-schoolers and kindergarten-aged children [19, 20, 22, 40, 42]. Furthermore, the few studies that have focused on the HNE of older children do not allow for a detailed examination of the relations between numeracy practices and math achievement. For instance, Tamis-LeMonda and colleagues [11] have examined the relation between learning environment and math problem-solving skills in 5th-graders. Yet, quality of the environment was exclusively defined by literacy activities and general mother-child interactions. Sammons and colleagues [48] also related the frequency of educational practices at home to students' math achievement in secondary school. However, numeracy practices were not examined independently from literacy practices, making it impossible to distinguish the specific effects of the HNE. Finally, Lefevre and colleagues [20] gathered a more extensive measure of numeracy practices in parents of 2nd-graders. However, these children were grouped with kindergarten-aged and 1st-graders in the analyses. This again makes it difficult to assess the relation in older children (for a similar conclusion, see [25]). Therefore, little is known about the relation between math skills and the HNE beyond 1st grade (i.e., when children learn formal math in school). Yet, studies on academic socialization of children within the family context suggest that parental involvement in children's academic achievement continues well into elementary school (before it may decrease as children move to middle and high school; [49, 50]). For example, parents of elementary school children may vary in the extent to which they volunteer at school, attend school events, attend to meetings with teachers or engage in learning activities at home [51]. Such behaviors and beliefs towards schooling may be influenced by parents' own experiences [49] and shape children's academic development. Indeed, studies have found a relationship between parents' involvement in children's schooling and academic performance [52].

The relation between HNE and math skills might be confounded by other environmental and genetic factors

Finally, previous studies have not always examined the relation between home numeracy practices and math skills while controlling from other potentially confounding factors. For

example, the development of numeracy skills is related to the development of literacy skills [53–57]. Although several studies have measured the influence of the home environment through general measures of both literacy and numeracy (i.e., the Home Learning Environment; [9, 58, 59]), little research has investigated the influence of both literacy and numeracy practices on children's math skills. Results from these studies are also mixed [24, 32, 35, 60]. For example, Anders and colleagues [27] found that measures of both home numeracy and literacy practices are related to young children's numerical development. Lehl and colleagues [60] also found that book exposure during the preschool years predicted math skills later on. However, other studies showed more domain-specific literacy and numeracy practices [39, 61] or failed to show an effect of the home literacy practices on children's numerical skills [19, 35]. Therefore, it remains unclear whether children's numeracy skills specifically relate to home numeracy practices or depend more generally on the quality of the broad learning environment at home.

It is also important to note that the relation between quality of the home learning environment and academic skills is often interpreted as reflecting a purely environmental influence on children's abilities. However, this association might also be due (at least in part) to genetic heritability [62, 63]. Genetic predispositions to high math or reading achievement from parents may be passed on to children. These parents may also be more likely to maintain high quality learning environments [29, 64, 65]. In the case of literacy skills, van Bergen and colleagues [63] have recently shown that many (but not all) associations between home literacy practices and children's reading fluency were accounted for by parental reading fluency. This suggests that the relation between the HLE and literacy skills may reflect a mixture of environmental and genetic effects. Hart and colleagues have also argued that relations between HNE and children's math skills should be controlled for parental math skills, as it may serve as a genetic proxy for predisposition to high math achievement [62, 66]. To date, only a limited number of studies have included parents' math skills when studying the relation between the HNE and children's math achievement [29, 62, 67–69]. Therefore, it is possible that this relation reflects (at least in part) a passive gene–environment correlation.

The current study

The present study investigates the relation between home numeracy practices and math skills of a sample of French early elementary schoolers (2nd and 3rd grades) who underwent more comprehensive behavioral testing than what is usually achieved in the HNE literature [10, 30, 41, 46]. Specifically, children were tested on a range of standardized math competences (non-symbolic quantity processing, symbolic number understanding, transcoding, counting, arithmetic calculation, and arithmetic fluency), as well as on measures of general cognitive functioning. Parents were also tested on a proxy measure of math skills (i.e., arithmetic fluency) and reported the frequency of informal, formal basic and formal advanced home numeracy (and literacy) practices.

This extensive data collection allowed us to address two main questions. First, we asked whether there remains a relation between home numeracy practices and math skills in these children, who are older than children typically tested in the HNE literature. Critically, our range of measures allowed us to (a) control for parental math skills, (b) assess which numeracy practices (informal versus formal, basic versus advanced) relate to specific math skills, and (c) evaluate whether the relation would be specific to numeracy practices (i.e., not observed with comparable literacy practices). In keeping with the previous literature on younger children, we expected to observe a relation between the HNE and math skills that would depend upon the type and difficulty of the practice. That is, we anticipated that informal practices would be

associated with non-symbolic skills while formal practices would be associated with symbolic skills, especially when those were relatively advanced with respect to children's age.

Second, we also aimed to investigate which parental traits (e.g., expectations, attitudes, skills) predict more frequent numeracy practices. Indeed, several studies have investigated the role of parental math attitude and academic expectations in shaping the HNE [see 25, 26]. Parental attitudes include their level of math anxiety (i.e., their tendency to avoid situations that involve math [70]) but also their use of math in everyday life as well as their evaluation of their own math skills when they were in school [71, 72]. Academic expectations are typically measured by asking parents how important it is for them that their child acquires a given skill within some time frame (e.g., [22]). Overall, although an association between parental attitudes and home numeracy practices remains to be clearly demonstrated (e.g., [20, 22]), studies have more consistently found a relation between higher academic expectations and increased frequency of numeracy practices at home [18, 19, 22, 30, 43]. Thus, we expected that the frequency of math activities reported by parents would depend on their academic expectations.

Material and methods

Participants

Seventy-three elementary school children of approximately 8 years of age and one of their parents were recruited for the experiment in the Lyon area in France. Participants were involved in a large project involving MRI scanning, which is why they all underwent extensive behavioral testing (at least as compared to what is typically achieved in studies on the HNE [25, 26]). All participants were contacted through flyers sent to schools and advertisements on social media. All parents and children came to the lab for a 2-hour long session during which they were given tests and questionnaires. Because studies suggest that the home learning environment may differ in children with low intelligence quotient (IQ) [73] and attention deficit disorder [74], we excluded children who had an IQ lower than the 25th percentile ($n = 2$) and were diagnosed with attention deficit disorder ($n = 1$). Because we also anticipated differences in the learning environment of children who experienced and were followed for language difficulties [75], we also excluded children who were seeing a speech-language pathologist on a regular basis ($n = 3$) and had a delay in speech and language acquisition ($n = 1$).

Therefore, 66 typically-developing 8-year-olds ($M = 8.46$, $\min = 7.51$, $\max = 9.22$) with no history of neurological disease, mental disorders of attention deficits were included in the final analyses. Out of the 66 children, 20 were in 2nd grade and 46 were in 3rd grade. A meta-analysis of the relations between children's math skills and predictors such as home numeracy practices, parental attitudes, and academic expectations estimated that the size of the correlation between correlations range from $r = 0.31$ to $r = 0.46$, with the smallest effect for academic expectations and the largest effect for practices (see Table 7.4 in [21]). Considering the smallest estimate of that range ($r = 0.31$), G*Power 3.1 [76] indicated that our final sample ($n = 66$) would provide an achieved power of 84% to detect a similar positive association in a linear regression at $\alpha = 0.05$ (one tailed).

All children and parents included in the study were native French speakers. Children's full-scale IQ was normal to high-normal, ranging from 83 to 135 (average = 112, Standard Deviation [SD] = 11.8). Eighty-nine percent of the parents whose children were included in the analyses were mothers. Parents completed a questionnaire evaluating their SES. Parental income ranged from less than €12,000 to more than €60,000 per year. Fourteen percent of parents reported to only have a secondary degree, 50% reported to have an undergraduate degree, and 36% a master degree or higher. One parent did not go to high school. Therefore, SES ranged from low to high. Parents gave written informed consent and children gave their assent to

participate in the study. The study was approved by the local ethics committee (Comité pour la Protection des Personnes Sud-Est II, n°2014-041- AM2-2). Families were paid 40 euros for their participation in the testing session.

Materials

Child measures. Children's math skills were mainly assessed using the Neuropsychological Test Battery for Number Processing and Calculation in Children (Zareki-R, [77]). The battery includes 13 core subtests (see **S1 Appendix**). To reduce the number of variables, we grouped these subtests according to the corresponding math skill. Quantity estimation was measured using the "numerosity estimation" and "quantity in context" subtests. Symbolic number understanding was assessed using the "written comparison", "oral comparison", and "number-to-position mapping" subtests. Counting was assessed using the "dot counting" and "oral reverse counting" subtests. Transcoding was assessed using the "number reading" and "number writing" subtests. Finally, arithmetic calculation was assessed using the "oral problem-solving", "addition", "subtraction", and "multiplication" subtests. A standardized score was obtained for each of these subtests and an average standardized score was obtained for each math skill (see **Table 1**). Norms were based on a sample of 249 French children from 6 to 11.5 (i.e., Grade 1 to 5) [77]. In the norming sample, the Zareki-R battery has been shown to

Table 1. Children's standardized (mean = 100, SD = 15) scores on the Zareki-R and WJ-III subtests.

Subtest	Mean (SD)	Min	Max
<i>Quantity estimation (Zareki-R)</i>			
Numerosity estimation	106 (19)	57	123
Quantity in context	109 (13)	75	122
Average	107 (12)	66	123
<i>Symbolic number understanding (Zareki-R)</i>			
Written comparison	106 (10)	66	112
Oral comparison	110 (12)	66	122
Number-to-position mapping	107 (11)	73	129
Average	108 (7)	90	121
<i>Counting (Zareki-R)</i>			
Dot counting	103 (11)	58	111
Oral reverse counting	104 (2)	68	114
Average	104 (7)	80	113
<i>Transcoding (Zareki-R)</i>			
Number writing	107 (2)	52	117
Number reading	105 (8)	65	115
Average	106 (8)	59	116
<i>Arithmetic calculation (Zareki-R)</i>			
Oral problem-solving	110 (13)	84	127
Addition	107 (14)	54	121
Subtraction	111 (12)	83	128
Multiplication	107 (12)	72	114
Average	109 (9)	87	122
<i>Arithmetic fluency (WJ-III)</i>			
Math Fluency	104 (24)	45	155

Notes. N = 66 The type of skill measured by each test is indicated in italics.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255400.t001>

predict both teachers' evaluations of student's math skills, as well as to children's academic achievement in math [77]. A high internal consistency has also been reported in European samples ($\alpha = .93$ to $\alpha = .97$) [78].

In addition to the Zareki, children were also tested on the Math Fluency subtest of the Woodcock-Johnson Test of achievement (WJ III; [79]). In this test, participants solve simple addition, subtraction, and multiplication problems within a 3-min time limit. The test consists of 2 pages of 80 problems involving operands from 0 to 10. Addition, subtraction, and multiplication problems are intermixed, but multiplication problems are only introduced after Item 60. Because this subtest is timed, it provides a more accurate measure of arithmetic *fluency* than the arithmetic subtests of the Zareki-R (which are untimed). Norms were based on a sample of 74 8-year-old French children [80]. The Math Fluency subtest of the WJ-II has been shown to have very high reliability ($r_{11} = 0.90$) [81].

In addition to math skills, children's IQ was estimated using the NEMI-2 standardized intelligence test [82]. The test uses measures of verbal intelligence (i.e., "general knowledge", "vocabulary", and "comparison" subtests) and matrix reasoning (i.e., "Raven's matrices" subtest) to provide a standardized score of full-scale IQ.

Home numeracy practices. Home numeracy practices were assessed through an electronic questionnaire given to parents on a tablet. Parents were asked how often they engaged in home learning activities that involved math with their child. To reduce the math-focus of the study, parents were also asked about language or reading activities and activities involving other academic and non-academic domains (e.g., music, biology). The latter, however, were

Table 2. Ratings associated with frequencies of informal home numeracy practices.

Item	Mean (SD)	Min	Max
Weighing / counting shopping ²	0.94 (1.03)	0	5
Counting out money ¹	1.2 (1.05)	0	4
Paying for shopping ²	1.06 (1.09)	0	5
Comparing magnitudes ¹	1 (1.03)	0	4
Playing board games with a numerical dice ¹	1.29 (0.83)	0	5
Playing number card games ¹	0.92 (0.82)	0	5
Playing computer / tablet games involving numbers ¹	0.71 (0.75)	0	3
Making/sorting collections ¹	0.68 (0.86)	0	4
Measuring lengths/widths ¹	0.8 (0.7)	0	3
Talking about temperature or speed ²	3 (1.54)	0	5
Measuring speeds ¹	2.65 (1.6)	0	5
Using a calculator ¹	0.76 (1.02)	0	5
Measuring ingredients while cooking ¹	1.44 (0.99)	0	5
Talking about the time with a watch or a clock ¹	3.77 (1.4)	1	5
Talking about the date with a calendar ¹	2.98 (1.53)	0	5
Dialing phone numbers ²	1.06 (1.37)	0	5
Singing songs with numbers ²	0.79 (0.86)	0	5
<i>Average</i>	<i>1.47 (1.47)</i>		

All parents (N = 66) were presented with all of the items. Rating: Did not occur/Activity is not relevant to my child was coded 0, Child is doing the activity without parent was coded 1, Parents used to engage in the activity in the past was coded 1, 1–3 times per month was coded 1, Once per week was coded 2, 2–4 times per week was coded 3, Almost daily was coded 4, Daily was coded 5.

¹Items directly translated from LeFevre et al.'s questionnaire.

²Items adapted from LeFevre et al.'s questionnaire to account for the fact that children in the present study are older.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255400.t002>

considered filler items and were not analyzed in the present study. Activities were taken from the questionnaire used in LeFevre et al. [20, 22], which is widely used in studies on studies of the HNE (for a review see [25]). Because this questionnaire [20] was designed for parents of children in kindergarten, activities were adapted so that they were appropriate for parents of children in 2nd and 3rd grade (see Tables 2 and 3 for a list of activities and whether they were directly taken or adapted from the original questionnaire). For each activity, parents could choose among 8 response options. If they engaged in the activity with their child at home during the past month, they could indicate the frequency among 5 options: 1–3 times per month (scored 1), Once per week (scored 2), 2–4 times per week (scored 3), Almost daily (scored 4), Daily (scored 5). If they did not engage in the activity with the child within the past month, they had the choice between 3 response options. First, they could indicate that the child did practice the activity within the past month, but without parental involvement. Second, they could indicate that they used to engage in the activity with the child in the past but no longer did at the time of testing (as in [83]). Adding these response options is important because children in the present study were older than in most previous studies on the HNE, which raises the possibility that they might engage in numeracy activity by themselves at home or that some activities in our questionnaires might no longer be relevant [19, 62, 83]. It is thus critical to account for the reasons that might have led parents to not explicitly indicate that they engage in a given activity. In our main analyses, these two response options were each scored 1 because they still point to a somewhat supportive HNE, but we did not want them to weigh excessively on the overall scoring (as our study is focused on present practices that are shared between parents and children). However, we also present supplemental analyses in which these responses are kept separate to disentangle between present activities, past activities, and activities that children are doing alone. Third, the parents could also simply indicate that they did not engage in the activity or that the activity is not relevant. This last option was arguably not indicative of a supportive HNE and was therefore scored 0.

Overall, there were 77 home learning activities mentioned in the questionnaire. In order to make the present study comparable to previous studies on the HNE (see [26]), we used a theoretical rather than data-driven definition of practices [22]. Thirty-six of these activities were math-related, of which 17 were considered *informal* (see Table 2) and 19 were considered *formal* (see Table 3) [20, 38]. Following Skwarchuk et al. [22], formal activities were also considered either *basic* or *advanced*, depending on the complexity of the shared activity. As shown in S1 Table, level of complexity was determined based on the school curriculum (i.e., activities were considered advanced if they were for the most part not practiced in the classroom before Grade 2) Each *advanced* activity was also related to a more *basic* activity. For example, subtracting, multiplying or dividing numbers were considered either *basic* or *advanced* depending on the size of the operands (i.e., single-digit versus double-digit). Similarly, whereas activities such as reading and writing numbers up to 100 were considered relatively *basic*, reading and writing numbers up to 1,000 were considered more *advanced* in 8-year-olds. To disguise the goal of the experiment, the same structure was applied to activities that were not math-related. For instance, S2 and S3 Tables show how literacy activities were also divided into formal versus informal and basic versus advanced.

This design, however, implied that parents had to repeatedly answer questions that were about the same topic but only differed in terms of the complexity of the activity (e.g., “Did you count up to 100 with your child?” followed by “Did you count up to 1,000 with your child?”). Pilot testing revealed that this can make participants feel uncomfortable if they had never engaged in those activities (because they would have had to say so multiple times). To avoid such situations, and because the questionnaire was presented in an electronic format, advanced formal activities (both math and non-math-related) were not presented to parents if

Table 3. Ratings associated with frequencies of formal home numeracy practices.

Skill level	Item	Mean (SD)	Min	Max	N
Basic	Counting objects ²	1.74 (1.44)	0	5	66
	Counting without objects ²	1.03 (0.94)	0	4	66
	Memorizing results of simple addition problems ²	1.7 (1.38)	0	5	66
	Memorizing multiplication tables ²	2.03 (1.4)	0	5	66
	Comparing quantities ²	1.86 (1.54)	0	5	66
	Adding numbers ²	2.38 (1.3)	0	5	66
	Subtracting single-digit numbers (e.g., 8-1) ²	2.41 (1.51)	0	5	66
	Multiplying single-digit numbers (e.g., 2x3) ²	2.26 (1.34)	0	5	66
	Talking about sharing ¹	2.39 (1.81)	0	5	66
	Dividing small numbers (e.g., 6÷2) ²	1.17 (1.29)	0	5	66
	Writing numbers up to 20 ²	1.14 (0.92)	0	5	66
	Writing numbers up to 100 ²	1.17 (0.98)	0	5	66
	Reading numbers up to 20 ²	1 (1.13)	0	5	66
	Reading numbers up to 100 ²	1.21 (1.05)	0	5	66
<i>Average</i>	<i>1.68 (1.41)</i>			66	
Advanced	Subtracting double-digit numbers (e.g., 34-16) ²	1.52 (1.42)	0	5	61
	Multiplying double-digit numbers (e.g., 12x6) ²	0.94 (1.09)	0	4	59
	Dividing double-digit numbers (e.g., 12÷4) ²	0.29 (0.62)	0	3	39
	Writing numbers up to 1,000 ²	0.89 (0.94)	0	4	57
	Reading numbers up to 1,000 ²	1.12 (1.01)	0	5	56
<i>Average</i>	<i>0.95 (1.12)</i>				

N, number of parents who were presented with the item. Rating: Did not occur/Activity is not relevant to my child was coded 0, Child is doing the activity without parent was coded 1, Parents used to engage in the activity in the past was coded 1, 1-3 times per month was coded 1, Once per week was coded 2, 2-4 times per week was coded 3, Almost daily was coded 4, Daily was coded 5.

¹Items directly translated from LeFevre et al.'s questionnaire.

²Items adapted from the LeFevre et al.'s questionnaire to account for the fact that children in the present study are older.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255400.t003>

they stated that the corresponding more basic activity had never occurred at home. In other words, we assumed that parents who had never engaged in a basic activity in the past would be unlikely to now engage in the same activity with a more advanced content (i.e., questions that were not presented were thus considered indicative of activities that parents were not engaged in at present). Table 3 indicates the number of parents who were presented with each item. Frequency ratings associated with informal and formal home numeracy practices are listed on Tables 2 and 3.

Parent measures. Parents' math skills as well as attitudes and expectations towards math were assessed using tests and questionnaires. First, arithmetic fluency was assessed using the Math Fluency subtest of the Woodcock-Johnson-III Tests of Achievement (WJ-III) [79]. A standardized score was obtained for each parent using norms from a large sample of adults in the US.

Second, parents completed an electronic questionnaire aimed at evaluating their expectations and attitudes towards math. The questionnaire, which was adapted from LeFevre et al. [20], also included questions about domains other than math (e.g., reading, history, geography). As for the home numeracy practices, this was done to reduce the math focus of the study and these items were not analyzed. After responding to demographic questions and questions about their family (e.g., number of books and games at home, number of hours per day they typically spend with their child, whether the child attended preschool before the age of 3), parents used a five-point rating scale (i.e., Not sure, Strongly disagree, disagree, Agree,

Strongly agree) to describe their current attitudes toward math (e.g. “I find math enjoyable”, “I avoid situations that involve math” or “My job involves using math”) and their past school experiences (“When I was at school, I was good at math”). These questions were directly taken from the LeFevre et al.’s questionnaire [20] and were simply translated into French. Using a six-point rating scale, they were then asked to provide a subjective estimate of their child’s skills in math and other domains (i.e., Not sure, Severe difficulty, Difficulty, Average skills, Good skills, Very good skills). Again, this was directly taken from the LeFevre et al.’s questionnaire [20] and simply translated into French.

Parental expectations regarding math learning for their child were also explored using an adaptation of the LeFevre et al.’s questionnaire [20], in which parents originally rated how important it was for them that their child acquires a given skill by the end of kindergarten. Specifically, we made 3 modifications to the original questionnaire. First, because our questionnaire was presented in an electronic format, parents were forced to give an answer to each item. Therefore, we added a “no opinion” option to the original scale to give them the option to skip an item if they wished to do so. In other words, there were 6 options for each item: Really not important (coded -3), Not important (coded -1), No opinion (coded 0), Important (coded 1), Very important (coded 2), Extremely important (coded 3). Second, parents rated how important it was that their child acquires a given skill by the end of *elementary school* (rather than kindergarten). Third, although we kept all of the original items from the LeFevre et al.’s questionnaire [20] (with the exception of “count to 10” and “count to 20” which were deemed no longer relevant for elementary school children), we added several items that were more appropriate for elementary school children according to the French math curriculum. These are indicated in Table 4. These expectations were considered either *basic* or *advanced*, depending on the corresponding grade level in the French curriculum. Ratings associated with parental expectations are listed on Table 4.

The data and the parental questionnaire can be found on OSF (<https://osf.io/vty3c/files/>).

Table 4. Parental expectations regarding math skills to be acquired by children at the end of elementary school.

Skill level	Item	Mean (SD)	Min	Max
Basic	Count up to 100 ¹	2.27 (.93)	-1	3
	Count up to 1,000 ¹	1.94 (1.04)	-1	3
	Read numbers up to 100 ¹	2.20 (0.89)	-1	3
	Read numbers up to 1,000 ¹	2.02 (1.02)	-1	3
	Know simple sums without counting on fingers (e.g., 2+2) ¹	2.36 (0.75)	-1	3
	Know how to solve complex addition problems (e.g., 15+12) ¹	2 (0.78)	1	3
	Know simple multiplication problems (e.g., 2x6) ¹	2.32 (0.70)	1	3
	<i>Average</i>	2.14 (0.75)		
Advanced	Know complex multiplication problems (e.g., 14x7) ²	1.85 (.96)	-1	3
	Know fractions and how to use them (e.g., 2/3) ²	1.23 (1.16)	-1	3
	Know how to solve division problems (e.g., 30÷5) ²	1.72 (0.98)	-1	3
	Know decimal numbers (e.g., 3.2) ²	1.38 (1.00)	-1	3
	Know how to calculate with decimal numbers ²	1.12 (1.07)	-1	3
	Know probabilities and how to use them ²	0.02 (1.33)	-3	2
	<i>Average</i>	1.84 (0.85)		

N = 66; Rating: Really not important was coded -3, Not important was coded -1, No opinion was coded 0, Important was coded 1, Very important was coded 2, Extremely important was coded 3.

¹Items directly translated from LeFevre et al.’s questionnaire.

² Items added for the purpose of our study.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255400.t004>

Data analysis

First, we tested whether math skills increased with the frequency of home numeracy practices (informal, formal basic and formal advanced) using one-tailed bivariate Pearson correlations. We then used scores on math subtests as outcomes of multiple regression analyses that included the predictors frequency of informal, formal basic and formal advanced practices. To test whether any of the relations observed were explained by other measured variables, we adjusted these regressions for children's overall cognitive functioning, parental SES, parental math skills, and time spent with the child at home. Finally, we performed a series of supplemental analyses in which (i) we controlled for the fact that a variable number of participants were presented with advanced items, (ii) we dissociated present practices with parent from present practices without parent and past practices, and (iii) we assessed the discriminant validity of numeracy practices (by investigating literacy practices).

Second, we tested whether home numeracy practices increased with parental traits using one-tailed bivariate Pearson correlations. We then used reported frequency of home numeracy practices as outcomes of multiple regression analyses that included parental traits (parental arithmetic fluency, basic and advanced expectations towards math and math attitudes) as predictors. These regressions were also adjusted for parental SES, parental estimates of their child's math skills time spent with the child at home. Supplemental analyses also dissociated present practices with parent from present practices without parent and past practices. All analyses were conducted in Jamovi version 1.6.3.

Results

How do math skills relate to home numeracy practices in early elementary schoolers?

The relations between math skills and home numeracy practices (informal, formal basic and formal advanced) were explored using bivariate Pearson correlations (Table 5) as well as

Table 5. Pearson correlation coefficients between home numeracy practices and children's math skills (as well as IQ) across all participants.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
<i>Home numeracy practices</i>										
1. Informal										
2. Formal / basic	0.46***									
3. Formal / advanced	0.28*	0.76***								
<i>Zareki-R</i>										
4. Quantity estimation	0.04	0.13	0.13							
5. Symbolic number understanding	0.09	0.04	0.09	0.39***						
6. Counting	0.03	-0.18	-0.14	0.28*	0.31**					
7. Transcoding	0.10	-0.04	-0.05	0.35**	0.44***	0.40***				
8. Arithmetic calculation	0.16	0.02	0.17†	0.35**	0.46***	0.11	0.19†			
<i>WJ-III</i>										
9. Arithmetic fluency	-0.04	0.10	0.28*	0.45***	0.44***	0.16	0.16†	0.53***		
<i>Nemi-2</i>										
10. Full-scale IQ	0.07	<0.01	0.03	0.33**	0.40***	0.13	0.33**	0.41***	0.25*	

N = 66

***, $p < .001$

** , $p < .01$

* , $p < .05$.

†, $p < .1$. P values are one-tailed (testing for a positive association).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255400.t005>

Table 6. Effect sizes and t-values associated with multiple regression analyses of numeracy practices on math subtests across all participants.

Practice	Quantity Estimation ¹		Symbolic number understanding ¹		Counting ¹		Transcoding ¹		Arithmetic calculation ¹		Arithmetic fluency ²	
	η^2p	t	η^2p	t	η^2p	t	η^2p	t	η^2p	t	η^2p	t
Informal	<0.001	-0.115	0.010	0.773	0.016	1.008	0.016	0.992	0.045	1.715	0.003	-0.461
Formal basic	0.002	0.326	0.008	-0.687	0.026	-1.279	0.002	-0.356	0.064	-2.055	0.019	-1.096
Formal advanced	0.003	0.435	0.013	0.892	<0.001	0.124	<0.001	-0.174	0.077	2.282	0.091	2.487
R²	0.019		0.021		0.049		0.018		0.105		0.108	

N = 66; $p < .05$ (two-tailed) in bold; η^2ps represent effect sizes that can be considered small (0.01), medium (0.06) or large (0.14) [84].

¹Zareki-R

²WJ-III.

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255400.t006>

multiple regression analyses with numeracy practices as predictors and math subtests as outcomes (Table 6).

As can be seen on Table 5, we only observed a positive correlation between practices that were considered both formal and advanced and the two measures of arithmetic skills: arithmetic calculation and arithmetic fluency. This was confirmed by multiple regression analyses (see Table 6), showing a positive effect of formal advanced numeracy practices on both arithmetic calculation (standardized coefficient or SC = 0.426, 95% confidence interval, or CI = [0.053, 0.799], $p = 0.026$) and arithmetic fluency (SC = 0.463, 95% CI = [0.091, 0.836], $p = 0.016$) when controlling for informal and formal basic practices. Critically, these associations remained significant when we added in the models as control variables parental education and income (arithmetic calculation: SC = 0.413, 95% CI = [0.024, 0.803], $t = 2.124$, $p = 0.038$, $\eta^2p = 0.070$; arithmetic fluency: SC = 0.441, 95% CI = [0.053, 0.829], $t = 2.271$, $p = 0.027$, $\eta^2p = 0.079$), child's IQ (arithmetic calculation: SC = 0.392, 95% CI = [0.047, 0.737], $t = 2.273$, $p = 0.027$, $\eta^2p = 0.078$; arithmetic fluency: SC = 0.442, 95% CI = [0.078, 0.806], $t = 2.430$, $p = 0.018$, $\eta^2p = 0.088$), parental math fluency (arithmetic calculation: SC = 0.428, 95% CI = [0.049, 0.807], $t = 2.257$, $p = 0.028$, $\eta^2p = 0.077$; arithmetic fluency: SC = 0.490, 95% CI = [0.116, 0.865], $t = 2.618$, $p = 0.011$, $\eta^2p = 0.101$), and number of hours spent with the child (arithmetic calculation: SC = 0.429, 95% CI = [0.053, 0.805], $t = 2.281$, $p = 0.026$, $\eta^2p = 0.079$; arithmetic fluency: SC = 0.461, 95% CI = [0.085, 0.836], $t = 2.453$, $p = 0.017$, $\eta^2p = 0.090$). Therefore, home numeracy practices that are formal and relatively challenging are positively associated with children's arithmetic skills, over and above differences in SES, children's overall cognitive functioning, parental math skills, and time spent with the child at home.

We then performed a series of supplemental analyses to control for different factors. First, to minimize parents' discomfort while answering questions about their home practices, we did not present advanced numeracy items to participants who responded that they never engaged in the same activity with a more basic content (see above). This results in a variable number of participants who were presented with each advanced question (and also relies on the assumption that parents who were not presented with a given advanced item never engaged in the practice) (see Table 3). To ensure that this design feature did not affect our findings, we performed a second set of analyses on a subset of participants who were systematically presented with advanced numeracy items (data for this subset of participant are available on <https://osf.io/vty3c/files/>). To further limit the decrease in sample size associated with such an analysis, we only kept subjects who were presented with the two most frequently seen advanced items (i.e., subtracting and multiplying double-digit numbers) and removed the other 3 advanced

items from the calculation of the frequency of formal advanced home numeracy practices. This resulted in a sample size of 58 participants who were presented with all items. This additional analysis indicated that formal advanced home numeracy practices remained significantly related to both measures of arithmetic skills: arithmetic calculation (SC = 0.482, 95% CI = [0.175, 0.789], $p = 0.003$) and arithmetic fluency (SC = 0.413, 95% CI = [0.095, 0.731], $p = 0.012$) (see [S4 Table](#)). This was also the case after controlling for parental education and income, child's IQ, parental math fluency, and number of hours spent with the child (arithmetic calculation: all $ps < 0.006$; arithmetic fluency: all $ps < 0.020$).

Second, as is standard in studies on the HNE, parents rated the frequency of present numeracy practices with children using a frequency scale. However, because the current study focuses on children who are older than in previous studies on the HNE, we also included two additional response options so that parents had the opportunity to indicate (i) that they used to engage in the activity in the past or (ii) that children engaged in the activity at present but without parental involvement. Although these response options weigh minimally on the calculation of the overall score (see Methods), we ran another set of analyses in which we dissociated present practices with parents from present practices without parents and past practices. [S5 Table](#) shows all bivariate relations when practices are dissociated, though these need to be interpreted with caution as all response options were presented concurrently (e.g., it is difficult to interpret a simple relation between skills and present practices with parent as two other response options were also available and not accounted for in such bivariate relations). When present practices with parent, present practices without parent and past practices were all included as separate predictors of multiple regression analyses, there remained a significant positive effect of present formal advanced numeracy practices on arithmetic fluency (SC = 0.484, 95% CI = [0.080, 0.888], $p = 0.020$) ([S6 Table](#)). The positive effect of present formal advanced numeracy practices on arithmetic calculation tended to be significant (SC = 0.392, 95% CI = [-0.020, 0.804], $p = 0.061$). These associations remained significant for arithmetic fluency (or near significant for arithmetic calculation) when we added in the models as control variables parental education and income (arithmetic fluency: SC = 0.469, 95% CI = [0.050, 0.889], $t = 2.245$, $p = 0.029$, $\eta^2 p = 0.085$; arithmetic calculation: SC = 0.401, 95% CI = [-0.025, 0.828], $t = 1.887$, $p = 0.065$, $\eta^2 p = 0.062$); child's IQ (arithmetic fluency: SC = 0.481, 95% CI = [0.081, 0.881], $t = 2.411$, $p = 0.019$, $\eta^2 p = 0.096$; arithmetic calculation: SC = 0.386, 95% CI = [0.002, 0.771], $t = 2.012$, $p = 0.049$, $\eta^2 p = 0.069$), parental math fluency (arithmetic fluency: SC = 0.510, 95% CI = [0.101, 0.919], $t = 2.497$, $p = 0.016$, $\eta^2 p = 0.102$; arithmetic calculation: SC = 0.393, 95% CI = [-0.027, 0.812], $t = 1.877$, $p = 0.066$, $\eta^2 p = 0.060$), and number of hours spent with the child (arithmetic fluency: SC = 0.484, 95% CI = [0.076, 0.892], $t = 2.375$, $p = 0.021$, $\eta^2 p = 0.093$; arithmetic calculation: SC = 0.395, 95% CI = [-0.019, 0.810], $t = 1.912$, $p = 0.061$, $\eta^2 p = 0.062$). Therefore, present practices with parents uniquely contributed to the relation between formal advanced practices and arithmetic skills (particularly arithmetic fluency).

Next, we tested whether the relation between formal advanced practices and arithmetic skills was specific to numeracy activities or could also be obtained with formal advanced literacy practices. In other words, what is the discriminant validity of the math practices items? To answer this question, we analyzed the responses given to the reading practices items (see [S2](#) and [S3 Tables](#) for a list of informal and formal literacy practices). We reasoned that these items are comparable to math items in terms of distinction between informal, formal basic and formal advanced practices but that reading activities lack numeracy content. Therefore, if the relation between formal advanced practices and arithmetic skills is specific to the numeracy content, it should not be (or should be more weakly) observed with a literacy content. As can be seen in [S7 Table](#), there was no association between literacy practices and any measures of

math skills (including arithmetic). Therefore, the relation between formal advanced home numeracy practices and arithmetic skills appears to be domain specific. Relatedly, our questionnaire appears to discriminate between different types of activity (even if both are advanced and pertain to academic learning).

What are the determinants of home numeracy practices in parents of early elementary schoolers?

Finally, the determinants of home numeracy practices were assessed using Pearson correlations (Table 7) and then tested in 3 separate multiple regression analyses with frequencies of informal, formal basic, and formal advanced practices as outcome measures (Table 8).

In each of these analyses, we included as predictors parental arithmetic fluency, parental expectations for math learning (both basic and advanced) and parental attitudes towards math (see Table 8). Overall, multiple regression analyses only revealed positive relations between parental advanced expectations and both formal basic practices (SC = 0.419, 95% CI = [0.125, 0.713], $p = 0.006$) and formal advanced practices (SC = 0.403, 95% CI = [0.109, 0.696], $p = 0.008$). These associations remained significant when we added in the models as control variables parental education and income (formal basic practices: SC = 0.377, 95% CI = [0.080, 0.660], $t = 2.555$, $p = 0.013$, $\eta^2p = 0.100$; formal advanced practices: SC = 0.414, 95% CI = [0.100, 0.635], $t = 2.751$, $p = 0.008$, $\eta^2p = 0.114$), parental estimation of children's numerical skills (formal basic practices: SC = 0.420, 95% CI = [0.122, 0.704], $t = 2.838$, $p = 0.006$, $\eta^2p = 0.118$; formal advanced practices: SC = 0.403, 95% CI = [0.095, 0.620], $t = 2.720$, $p = 0.009$, $\eta^2p = 0.110$) and number of hours spent with the child (formal basic practices: SC = 0.431, 95% CI = [0.135, 0.712], $t = 2.938$, $p = 0.005$, $\eta^2p = 0.126$; formal advanced practices: SC = 0.407, 95% CI = [0.098, 0.624], $t = 2.749$, $p = 0.008$, $\eta^2p = 0.112$). Therefore, parents who had the highest expectations for their child in terms of math learning were those who engaged the most frequently in formal home numeracy activities, over and above differences in SES, parental estimates of the child's math skills, and number of hours spent with the child.

Table 7. Pearson correlation coefficients between home numeracy practices and parental traits across all participants.

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
<i>Home numeracy practices</i>											
1. Informal											
2. Formal / basic	0.28*										
3. Formal / advanced	0.46***	0.76***									
<i>Parental traits</i>											
4. Parental education	-0.12	-0.07	-0.25								
5. Parental income	0.02	-0.11	-0.09	0.41***							
6. Parental basic expectations	0.17†	0.12	0.03	0.09	0.11						
7. Parental advanced expectations	0.23*	0.35**	0.28*	-0.10	0.03	0.56***					
8. Parental math attitude	-0.09	-0.02	-0.11	0.45***	0.24*	0.12	0.12				
9. Parental arithmetic fluency	0.01	-0.08	0.00	0.56***	0.37**	0.17†	-0.03	0.42***			
10. Numbers of hours spent with the child	0.05	0.07	0.12	-0.03	-0.36	0.27*	0.10	-0.01	-0.03		
11. Parental estimates of the child's math skills	0.08	0.02	0.02	0.07	0.09	0.22*	0.12	0.21*	0.09	0.08	

N = 66

***, $p < .001$

** , $p < .01$

* , $p < .05$.

†, $p < .1$. P values are one-tailed (testing for a positive association).

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255400.t007>

Table 8. Standardized coefficients, 95% confidence intervals (CI), and effect sizes for the multiple regression analysis of numeracy practices.

Predictor	Informal practices		Formal basic practices		Formal advanced practices	
	η^2p	t	η^2p	t	η^2p	t
Parental arithmetic fluency	0.005	0.527	0.013	0.899	0.001	-0.257
Parental basic expectations	0.002	0.373	0.030	-1.367	0.007	-0.638
Parental advanced expectations	0.032	1.422	0.117	2.850	0.110	2.743
Parental attitudes	0.019	-1.099	0.030	-1.367	0.002	-0.357
R²	0.073		0.130		0.132	

N = 66; $p < .01$ (two-tailed) in bold; η^2ps represent effect sizes that can be considered small (0.01), medium (0.06) or large (0.14) [84].

<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255400.t008>

We then tested whether the relation between parental advanced expectations and formal practices hold when only present practices with parent are considered (i.e., when ratings associated with present practices without parent and past practices are excluded). [S8 Table](#) shows all bivariate relations when practices are dissociated. As can be seen on [S9 Table](#), multiple regression analyses of present practices revealed that positive relations between parental advanced expectations and both formal basic practices (SC = 0.415, 95% CI = [0.121, 0.708], $p = 0.006$) and formal advanced practices (SC = 0.402, 95% CI = [0.108, 0.696], $p = 0.008$) remained positive. These associations remained significant when we added in the models as control variables parental education and income (formal basic practices: SC = 0.361, 95% CI = [0.071, 0.650], $t = 2.491$, $p = 0.016$, $\eta^2p = 0.095$; formal advanced practices: SC = 0.402, 95% CI = [0.099, 0.704], $t = 2.656$, $p = 0.010$, $\eta^2p = 0.107$), parental estimation of children's numerical skills (formal basic practices: SC = 0.416, 95% CI = [0.120, 0.712], $t = 2.810$, $p = 0.007$, $\eta^2p = 0.116$; formal advanced practices: SC = 0.403, 95% CI = [0.106, 0.699], $t = 2.713$, $p = 0.009$, $\eta^2p = 0.109$) and number of hours spent with the child (formal basic practices: SC = 0.427, 95% CI = [0.133, 0.721], $t = 2.903$, $p = 0.005$, $\eta^2p = 0.123$; formal advanced practices: SC = 0.409, 95% CI = [0.112, 0.705], $t = 2.756$, $p = 0.008$, $\eta^2p = 0.112$).

Discussion

In the present study, we took advantage of the extensive behavioral testing of a sample of French 8-year-olds to assess the relation between the HNE and children's mathematical skills in elementary school, while considering the variety of math abilities and types of home numeracy practices. We also aimed to characterize the determinants of a high quality HNE in parents of these children.

The relation between numeracy practices and math skills in 8-year-olds is restricted to arithmetic skills and practices that are both formal and advanced

Although we tested a wide range of math skills in children, we were only able to find a relation between home numeracy practices and children's arithmetic skills, as measured by both the Zareki-R and the WJ-III tests. To some extent, this finding is consistent with the fact that arithmetic skills are a primary focus of math learning in elementary school and that most of the formal numeracy activities reported by parents of 8-year-olds involve practicing symbolic arithmetic (see [Table 3](#)). In fact, previous research in younger children has shown similar correlations between home activities involving arithmetic and children's abilities in basic calculation skills [8, 18, 40, 85, 86]. However, because these studies involved younger children, activities involved more basic arithmetic, such as practicing simple sums. In our study, the positive

relation between formal activities and arithmetic skills was restricted to activities that are not (for the most part) practiced before 2nd grade in school (see [S1 Table](#)) and notably involve practicing double-digit arithmetic with children (see [Table 3](#)). In other words, the relation between formal math activities and math skills was only observed for activities that were challenging for 8-year-olds. This distinction between basic and advanced formal activities has been suggested before [[22](#)] and is broadly supported in the literature [[22](#), [23](#), [42](#), [43](#)]. For example, several studies have found a unique positive relation between children's math skills and the frequency of advanced formal numeracy activities [[22](#), [23](#), [42](#)]. In contrast, the relation between basic numeracy activities and math skills is less clear. For example, the frequency of basic numeracy practices has been found to be either negatively correlated (like in the present study, see [Table 6](#)) [[42](#)] or not associated with children's math skills [[22](#), [44](#)]. Overall, then, our results confirm that there remains a positive relation between HNE and math skills in elementary school children. However, this relation is specific to practices that must be formal and challenging for children.

Advanced formal numeracy practices are related to arithmetic skills over and above differences in SES, child's IQ, parent's math skill and number of hours the parent spends at home with the child

An advantage of our study is that we obtained a range of background variables in both children and parents. This makes it possible to dissociate the effect of home numeracy practices from other effects that may also affect math achievement in children. For example, it has long been established that math achievement is associated with family SES [[87–89](#)] and with children's overall cognitive functioning [[90](#), [91](#)]. Because these factors are not systematically controlled in studies of the HNE [[8](#), [18](#), [19](#), [23](#), [34](#), [35](#), [41](#), [42](#)], it is not always clear to what extent home numeracy practices specifically relate to math performance. Here, we found that the relation between advanced formal home numeracy practices and children's arithmetic skills remained significant after controlling for SES (i.e., parental income and education) and cognitive functioning (full-scale IQ).

Our analyses also controlled for differences in parent's arithmetic fluency. This is noteworthy because a relation between quality of HNE and academic skills is often interpreted as reflecting a purely environmental influence on children's abilities. However, it is also possible that this association is due (at least in part) to genetic heritability [[62](#), [63](#)]. For example, genetic predispositions to high math or reading achievement from parents may be passed on to children [[66](#)]. These parents may also be more likely to maintain high HNE [[29](#), [64](#), [65](#)]. This is notably suggested by a study from van Bergen and colleagues [[63](#)], in which many (but not all) associations between home literacy practices and children's reading fluency were accounted for by parental reading fluency. This suggests that the relation between the HNE and literacy skills may reflect a mixture of environmental and genetic effects. By controlling for differences in arithmetic fluency among parents, our study adds to recent evidence that the relation between the HNE and math skills might not simply reflect a passive gene–environment correlation [[29](#), [62](#), [67–69](#)]. However, our measure of parental math skills is limited (i.e., it is a 3-minute fluency test) and gathered on one parent only. As such, more research including a more complete assessment of both parents' abilities with a range of measures is needed to completely dissociate effects of heritability from the HNE.

Finally, it is important to consider that the HNE of children in elementary school is likely to be qualitatively different from the HNE of children in preschool. For example, elementary school children are likely to spend less time at home with parents, partly because of increased opportunities for extracurricular involvement and after-school activities. This might also differ from one family to the other. To control for this factor, we included in our analyses the time

spent by the parent with the child at home. Thus, our effect of formal advanced numeracy practices on arithmetic skills may not be (at least completely) accounted for by differences in time spent at home between parent and child. However, two important additional factors in the HNE of elementary school children (as compared to younger children) may deserve further exploration. The first one is related to the introduction of homework. In France, written assignments are fairly limited in elementary school. However, children can still be assigned readings and this may qualitatively affect the HNE. The second one is that, because late elementary schoolers are increasingly involved in extracurricular activities (e.g., clubs, sports) [92, 93], they may be exposed to informal opportunities to practice numerical skills (e.g., keeping track of the score in a basketball game). Given that the present study focused on numeracy activities *at home*, our questionnaire did not specifically test for these opportunities. However, future studies may further explore the potential relation between numeracy practices during extracurricular activities and children's math skills.

Frequency of formal numeracy practices is related to academic expectations in parents of 8-year-olds

Little is known about the reasons why some parents engage in math activities with their children more than others, though it has been suggested that parental attitudes toward math, beliefs about child math ability and academic expectations may be important factors (at least in parents of younger children) [22, 26, 30, 94, 95]. To date, evidence for an effect of parental attitudes is mixed. While some studies have found that attitudes play a role in the HNE [24, 42, 43, 96, 97], others have failed to find such an effect [20, 22]. However, there is more consistent evidence that parents who have relatively high expectations regarding their child's math achievement also report more frequent numeracy practices with their children [18, 19, 22, 24, 30, 46, 98–100]. For example, both Zippert and Rittle-Johnson and Hart and colleagues [62, 95] have shown that parents' beliefs about their children math abilities are related to the early math environment.

In the present study, we also found a positive relation between frequency of formal practices (both basic and advanced) and parents' math expectations. However, this relation was only observed for expectations that were relatively high. That is, parents of 8-year-olds who reported the most frequent numeracy activities at home were those who had the highest academic expectations for their child in terms of math learning. In contrast, consistent with prior studies on younger children [20, 22], we did not find any relation between parent's math attitude and reported frequency of home numeracy activities. Thus, only high academic expectations appeared to be related to frequency of both basic and advanced home numeracy practices in our sample of 8-year-olds.

Limitations

To our knowledge, our study is the first to show a specific relation between the HNE and math performance in children from elementary school, while controlling for a wide range of factors and testing a range of math skills. However, it is important to acknowledge several limitations. A first limitation is that our measure of the HNE (as well as our measures of attitudes and expectations) comes from an electronic questionnaire filled out by parents. There are several drawbacks with such questionnaires. First, as in all questionnaires, it is possible that parents may have reported more frequent math practices (and more positive math attitudes and expectations) in an effort to avoid embarrassment and project a more favorable image to the experimenters (i.e., a social desirability bias) [101]. Although we attempted to limit this bias by asking parents to report information about a very wide range of home activities and

expectations (e.g., reading, sport, music), this social desirability bias may still be present. Second, parents may have had difficulty remembering or identifying the math related activities they engaged in at home. This concern may be relatively prevalent in our electronic questionnaire because parents were not able to skip questions (though they often had the option to indicate that they had no opinion or that the question was not relevant). Third, to minimize parents' discomfort, advanced numeracy items were only presented to participants who responded that they had at some point engaged in the same activity with a more basic content. This means that all parents were not presented with all questions. Although these drawbacks may raise concerns about the validity of our questionnaire, it is important to emphasize that the relation we found was quite specific. That is, it was neither found with basic numeracy practices nor with advanced literacy practices. Therefore, our questionnaire appears to be able to discriminate between different related home practices. Nonetheless, it is clear that many of the concerns above could be at least partly alleviated by using direct observations in the lab [40, 85, 102] or at home [85, 103–105] instead of relying on questionnaires. Therefore, our findings would benefit from being replicated by studies using direct observations.

A second limitation is that, although all children were extensively tested on a broader range of measures than what is typically found in the HNE literature, the overall sample size remains limited. Therefore, our results will need to be replicated in larger samples. Nonetheless, given the relative scarcity of data about effects of the HNE on children's math skills outside of the US, we also believe that our data are valuable and may inform future meta-analysis.

A third limitation is that questionnaires were filled by the one parent who was present during the child's testing in the lab. Because this parent was mainly the mother, mothers represent 89% of the parents in our sample. Thus, our measures of the HNE might have been sensibly different had fathers been included in the study. Because most prior studies also predominantly focus on mothers [106], it may be beneficial for future research to gather a more accurate measure of the HNE by presenting surveys to both mothers and fathers.

A fourth limitation is that our questionnaire focused on activities that involved numerical content *per se*. However, math learning has been found to be associated with the development of other non-numerical skills, such as patterning and spatial processing [95, 107]. For example, it has been shown that children's exposure to spatial activities at home is related to arithmetic skills in first grade [108]. Therefore, future studies should assess the effect of home practices beyond numeracy on math skills of older children.

Finally, as is also the case in most previous studies [11, 35, 41, 44, 104], a final limitation is that our data are correlational. In other words, although our results are consistent with the idea that home numeracy practices may foster math skills in children, it is also possible that parents may adapt their activities to their child's interest and skill [109]. To control for this factor, we asked parents to estimate the skill level of their child and included this estimate when assessing the factors predicting the frequency of practices. In other words, there was an effect of high academic expectations on frequency of numeracy practices irrespective of the child's skill (as perceived by the parent). Yet, interventional studies are needed to establish the causality of the relations found here.

Implications

Our study adds to the growing body of literature indicating that home numeracy experiences may relate to the growth of children's math skills [26, 96]. More specifically, our results suggest that this relation may not only be observed with preschoolers and early elementary schoolers, but also in children who are already learning formal math in elementary school. Importantly, the relation between advanced numeracy practices and math skills in 2nd and 3rd graders can

be considered of medium size in the present study (with a partial η^2 between 0.08 and 0.09, see **Table 6**). Even though this estimate is not causal but correlational (and might therefore be overestimated), an effect of this size may have clear educational significance [110, 111]. Specifically, our findings support the idea that children's math achievement might potentially be improved by enhancing the HNE.

We can think of at least 3 ways our findings may inform such interventions. First, our results suggest that such interventions should not be limited to parents of preschoolers, but should also include parents of children in elementary school. Second, our findings indicate that interventions should focus on the content of the numeracy activities, in addition to their frequency. That is, children are more likely to benefit from home numeracy activities that are sufficiently challenging for them (at their grade level or beyond) than from home numeracy activities that they may already be used to. This would require making parents feel capable and helping them identify and plan for opportunities to engage in such relatively advanced activities (for which they may not necessarily feel comfortable at first). This may also require giving parents explicit feedback to maintain their motivation [96]. Third, as in previous studies on younger children [20, 42], we found that expectations of parents towards children's math learning are linked to the quality of the HNE in older children. Therefore, interventions may also benefit from attempting to raise expectations of parents regarding children's math skills. This might involve helping parents overcome math anxiety and misconceptions regarding math (e.g., that some children are 'math persons' and others not; [112]), as well as convincing them of the importance of math skills for the future of their children. This might also require giving them concrete examples of what children in elementary school can learn through daily activities with their parents (in addition to what they learn at school).

Conclusions

In sum, our study demonstrates that the HNE that parents provide for their children remains related to math skills when children are in elementary school. However, we found that this relation is restricted to activities that are formal and relatively challenging for children. The effect is also specifically present on arithmetic skills, which constitute a main focus of math learning in elementary school. Furthermore, parents who report the most frequent numeracy activities at home are those who tend to have the highest academic expectations for their child. Overall, our study adds to the literature on the HNE by showing that the relation between home numeracy practices and math skills remains present in elementary school children. Although our findings are correlational in nature, they broadly support interventions that may attempt to raise math skills of elementary school children by involving parents and caregivers.

Supporting information

S1 Appendix. Subtests of the Zareki-R by math skill.

(DOCX)

S1 Table. Formal numeracy activities and approximate grades in which they are mainly practiced in school according to the French math curriculum.

(DOCX)

S2 Table. Frequency ratings associated with informal home literacy practices.

(DOCX)

S3 Table. Frequency ratings associated with formal home literacy practices.

(DOCX)

S4 Table. Effect sizes and t-values associated with multiple regression analyses of numeracy practices on math subtests across the subset of participants who were all presented with the frequency items “subtracting double-digit numbers” and “multiplying double-digit numbers”.

(DOCX)

S5 Table. Pearson correlation coefficients between present and past home numeracy practices with parent and children’s math skills (as well as IQ) across all participants.

(DOCX)

S6 Table. Effect sizes and t-values associated with multiple regression analyses of present and past numeracy practices on math subtests across all participants.

(DOCX)

S7 Table. Effect sizes and t-values associated with multiple regression analyses of literacy practices on math subtests across all participants.

(DOCX)

S8 Table. Pearson correlation coefficients between present and past home numeracy practices with parent and parental traits across all participants.

(DOCX)

S9 Table. Standardized coefficients, 95% confidence intervals (CI), and effect sizes for the multiple regression analysis of present numeracy practices with parent.

(DOCX)

S1 Data. Data all participants.

(CSV)

S2 Data. Data subset participants.

(CSV)

Author Contributions

Conceptualization: Cléa Girard, Jérôme Prado.

Data curation: Cléa Girard.

Formal analysis: Cléa Girard, Jérôme Prado.

Funding acquisition: Jérôme Prado.

Methodology: Cléa Girard, Jérôme Prado.

Project administration: Justine Epinat-Duclos, Léa Longo.

Resources: Cléa Girard, Thomas Bastelica, Jessica Léone, Justine Epinat-Duclos, Léa Longo.

Supervision: Jérôme Prado.

Writing – original draft: Cléa Girard.

Writing – review & editing: Jérôme Prado.

References

1. Parsons S, Bynner J. Does Numeracy Matter More? National Research and Development Centre for adult literacy and numeracy. London, UK: The Basic Skills Agency. 2005.
2. Jones LR, Wheeler G, Centurino VA. TIMSS 2015 science framework. In 2015. p. 29–59. (TIMSS).

3. Dowker A. Individual differences in numerical abilities in preschoolers. *Dev Sci.* 2008; 11(5):650–4. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00713.x> PMID: 18801119
4. Kilbanoff RS, Levine SC, Huttenlocher J, Vasilyeva M, Hedges LV. Preschool children's mathematical knowledge: The effect of teacher « math talk. » *Dev Psychol.* 2006; 42(1):59–69. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.42.1.59> PMID: 16420118
5. Starkey P, Klein A, Wakeley A. Enhancing Young Children's Mathematical Knowledge through a Pre-Kindergarten Mathematics Intervention. *Early Child Res Q.* 2004; 19(1):99–120.
6. Zill N, West J. Entering Kindergarten: A Portrait of American Children When They Begin School. Findings from the Condition of Education, 2000 [Internet]. ED Pubs, P; 2001.
7. Kleemans T, Segers E, Verhoeven L. Relations between Home Numeracy Experiences and Basic Calculation Skills of Children with and without Specific Language Impairment. *Early Child Res Q.* 2013; 28(2):415–23.
8. Manolitsis G, Georgiou GK, Tziraki N. Examining the effects of home literacy and numeracy environment on early reading and math acquisition—ScienceDirect. *Early Child Res Q.* 2013; 28(4):692–703.
9. Melhuish EC, Sylva K, Sammons P, Siraj-Blatchford I, Taggart B, Phan MB, et al. Preschool Influences on Mathematics Achievement. *Science.* 29 août 2008; 321(5893):1161–2. <https://doi.org/10.1126/science.1158808> PMID: 18755959
10. Niklas F, Schneider W. Casting the die before the die is cast: the importance of the home numeracy environment for preschool children. *Eur J Psychol Educ.* 1 sept 2014; 29(3):327–45.
11. Tamis-LeMonda CS, Luo R, McFadden KE, Bandel ET, Vallotton C. Early home learning environment predicts children's 5th grade academic skills. *Appl Dev Sci.* 2017; 0(0):1–17.
12. Taylor LC, Clayton JD, Rowley SJ. Academic socialization: Understanding parental influences on children's school-related development in the early years. *Rev Gen Psychol.* 2004; 8(3):163–78.
13. Powers SJ, Wang Y, Beach SD, Sideridis GD, Gaab N. Examining the relationship between home literacy environment and neural correlates of phonological processing in beginning readers with and without a familial risk for dyslexia: an fMRI study. *Ann Dyslexia.* oct 2016; 66(3):337–60. <https://doi.org/10.1007/s11881-016-0134-2> PMID: 27550556
14. Sénéchal M, LeFevre JA. Storybook reading and parent teaching: links to language and literacy development. *New Dir Child Adolesc Dev.* 2001;(92):39–52; discussion 91–98. <https://doi.org/10.1002/cd.14> PMID: 11468865
15. Sylva K, Chan L, Melhuish E, Sammons P, Siraj-Blatchford I, Taggart B. Emergent literacy environments: Home and preschool influences on children's literacy development. *Fac Soc Sci—Pap.* 1 jan 2011;97–117.
16. Romeo RR, Leonard JA, Robinson ST, West MR, Mackey AP, Rowe ML, et al. Beyond the 30-Million-Word Gap: Children's Conversational Exposure Is Associated With Language-Related Brain Function. *Psychol Sci.* 2018; 29(5):700–10. <https://doi.org/10.1177/0956797617742725> PMID: 29442613
17. Sénéchal M, LeFevre JA, Thomas EM, Daley KE. Differential effects of home literacy experiences on the development of oral and written language. *Read Res Q.* 1998; 33(1):96–116.
18. LeFevre JA, Clarke T, Stringer AP. Influences of Language and Parental Involvement on the Development of Counting Skills: Comparisons of French- and English-Speaking Canadian Children. *Early Child Dev Care.* 2002; 172(3):283–300.
19. LeFevre JA, Polyzoi E, Skwarchuk S-L, Fast L, Sowinski C. Do Home Numeracy and Literacy Practices of Greek and Canadian Parents Predict the Numeracy Skills of Kindergarten Children? *Int J Early Years Educ.* march 2010; 18(1):55–70.
20. LeFevre JA, Skwarchuk S-L, Smith-Chant B, Fast L, Kamawar D, Bisanz J. Home Numeracy Experiences and Children's Math Performance in the Early School Years. *Can J Behav Sci Can Sci Comput.* 2009; 41:55–66.
21. Dunst CJ, Hamby DW, Wilkie H, Dunst KS. Meta-Analysis of the Relationship Between Home and Family Experiences and Young Children's Early Numeracy Learning. In: Phillipson S, Gervasoni A, Sullivan P, éditeurs. *Engaging Families as Children's First Mathematics Educators: International Perspectives.* Singapore: Springer Singapore; 2017. p. 105–25. (Early Mathematics Learning and Development). https://doi.org/10.1007/978-981-10-2553-2_7
22. Skwarchuk S-L, Sowinski C, LeFevre JA. Formal and informal home learning activities in relation to children's early numeracy and literacy skills: the development of a home numeracy model. *J Exp Child Psychol.* may 2014; 121:63–84. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2013.11.006> PMID: 24462995
23. Thompson RJ, Napoli AR, Purpura DJ. Age-related differences in the relation between the home numeracy environment and numeracy skills. *Infant Child Dev [Internet].* 25 janv 2017 [cité 22 juin 2018]; 26(5). <https://doi.org/10.1002/icd.2013> PMID: 29062266

24. Susperreguy MI, Douglas H, Xu C, Molina-Rojas N, LeFevre J-A. Expanding the Home Numeracy Model to Chilean children: Relations among parental expectations, attitudes, activities, and children's mathematical outcomes. *Early Child Res Q.* 2020; 50:16–28.
25. Mutaf-Yildiz B, Sasanguie D, De Smedt B, Reynvoet B. Probing the Relationship Between Home Numeracy and Children's Mathematical Skills: A Systematic Review. *Front Psychol.* 2020; 11:2074. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.02074> PMID: 33071838
26. Elliott L, Bachman HJ. How Do Parents Foster Young Children's Math Skills? *Child Dev Perspect.* 2018; 12(1):16–21.
27. Anders Y, Rossbach HG, Weinert S, Ebert S, Kuger S, Lehl S, et al. Home and preschool learning environments and their relations to the development of early numeracy skills. *Early Child Res Q.* 2012; 27(2):231–44.
28. Cheung SK, Dulay KM, McBride C. Parents' characteristics, the home environment, and children's numeracy skills: How are they related in low- to middle-income families in the Philippines? *J Exp Child Psychol.* avr 2020;192:104780.
29. Dearing E, Casey BM, Ganley CM, Tillinger M, Laski E, Montecillo C. Young girls' arithmetic and spatial skills: The distal and proximal roles of family socioeconomics and home learning experiences. *Early Child Res Q.* 1 juill 2012; 27(3):458–70.
30. Kleemans T, Peeters M, Segers E, Verhoeven L. Child and home predictors of early numeracy skills in kindergarten. *Early Child Res Q.* 2012; 27(3):471–7.
31. Purpura DJ, King YA, Rolan E, Hornburg CB, Schmitt SA, Hart SA, et al. Examining the Factor Structure of the Home Mathematics Environment to Delineate Its Role in Predicting Preschool Numeracy, Mathematical Language, and Spatial Skills. *Front Psychol.* 2020; 11:1925. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01925> PMID: 32849131
32. Soto-Calvo E, Simmons FR, Adams A-M, Francis HN, Giofre D. Pre-schoolers' home numeracy and home literacy experiences and their relationships with early number skills: Evidence from a UK study. *Early Educ Dev.* 2020; 31(1):113–36.
33. DeFlorio L, Beliakoff A. Socioeconomic Status and Preschoolers' Mathematical Knowledge: The Contribution of Home Activities and Parent Beliefs. *Early Educ Dev.* 3 avr 2015; 26(3):319–41.
34. Missall K, Hojnoski RL, Caskie GIL, Repasky P. Home Numeracy Environments of Preschoolers: Examining Relations Among Mathematical Activities, Parent Mathematical Beliefs, and Early Mathematical Skills. *Early Educ Dev.* 3 apr 2015; 26(3):356–76.
35. Napoli AR, Purpura DJ. The home literacy and numeracy environment in preschool: Cross-domain relations of parent-child practices and child outcomes. *J Exp Child Psychol.* 2 nov 2017; 166:581–603. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.10.002> PMID: 29102840
36. De Keyser L, Bakker M, Rathé S, Wijns N, Torbeyns J, Verschaffel L, et al. No Association Between the Home Math Environment and Numerical and Patterning Skills in a Large and Diverse Sample of 5- to 6-year-olds. *Front Psychol.* 2020; <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.547626> PMID: 33362620
37. Ciping D, Silinskaskas G, Wei W, Georgiou GK. Cross-lagged relationships between home learning environment and academic achievement in Chinese. *Early Child Res Q.* 1 oct 2015; 33:12–20.
38. Sénéchal M, LeFevre JA. Parental involvement in the development of children's reading skill: a five-year longitudinal study. *Child Dev.* apr 2002; 73(2):445–60. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00417> PMID: 11949902
39. Huntsinger CS, Jose PE, Luo Z. Parental facilitation of early mathematics and reading skills and knowledge through encouragement of home-based activities. *Early Child Res Q.* 1 oct 2016; 37(Supplement C):1–15.
40. Ramani GB, Rowe ML, Eason SH, Leech KA. Math Talk During Informal Learning Activities in Head Start Families. *Cogn Dev.* 2015; 35:15–33.
41. Mutaf-Yildiz B, Sasanguie D, De Smedt B, Reynvoet B. Frequency of Home Numeracy Activities Is Differentially Related to Basic Number Processing and Calculation Skills in Kindergartners. *Front Psychol.* 2018; 9:340. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00340> PMID: 29623055
42. Skwarchuk SL. How Do Parents Support Preschoolers' Numeracy Learning Experiences at Home? *Early Child Educ J.* dec 2009; 37(3):189–97.
43. Río MF del Susperreguy MI, Strasser K, Salinas V. Distinct Influences of Mothers and Fathers on Kindergartners' Numeracy Performance: The Role of Math Anxiety, Home Numeracy Practices, and Numeracy Expectations. *Early Educ Dev.* 17 nov 2017; 28(8):939–55.
44. Zippert EL, Ramani GB. Parents' Estimations of Preschoolers' Number Skills Relate to at-Home Number-Related Activity Engagement. *Infant Child Dev.* 2016; 26(2):e1968.
45. Blevins-Knabe B, Musun-Miller L. Number Use at Home by Children and Their Parents and Its Relationship to Early Mathematical Performance. *Early Dev Parent.* march 1996; 5(1):35–45.

46. Silver AM, Elliott L, Libertus ME. When beliefs matter most: Examining children's math achievement in the context of parental math anxiety. *J Exp Child Psychol.* jan 2021; 201:104992. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2020.104992> PMID: 33007705
47. Vasilyeva M, Laski E, Veraksa A, Weber L, Bukhalenkova D. Distinct Pathways From Parental Beliefs and Practices to Children's Numeric Skills. *J Cogn Dev.* aug 2018; 19(4):345–66.
48. Sammons P, Toth K, Sylva K, Melhuish E, Siraj I, Taggart B. The long-term role of the home learning environment in shaping students' academic attainment in secondary school. *J Child Serv.* 21 sept 2015; 10(3):189–201.
49. Eccles JS, Harold RD. Family involvement in children's and adolescents' schooling. In: *Family–school links: How do they affect educational outcomes?* Hillsdale, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates, Inc; 1996. p. 3–34.
50. Singh K, Bickley PG, Trivette P, Keith TZ, et al. The effects of four components of parental involvement on eighth-grade student achievement: Structural analysis of NELS-88 data. *Sch Psychol Rev.* 1995; 24(2):299–317.
51. Hill NE, Taylor LC. Parental School Involvement and Children's Academic Achievement: Pragmatics and Issues. *Curr Dir Psychol Sci.* aug 2004; 13(4):161–4.
52. Grolnick WS, Slowiaczek ML. Parents' Involvement in Children's Schooling: A Multidimensional Conceptualization and Motivational Model. *Child Dev.* 1994; 65(1):237–52. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1994.tb00747.x> PMID: 8131650
53. Krajewski K, Schneider W. 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. *J Exp Child Psychol.* aug 2009; 103(4):516–31. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.03.009> PMID: 19427646
54. LeFevre J-A, Fast L, Skwarchuk S-L, Smith-Chant BL, Bisanz J, Kamawar D, et al. Pathways to Mathematics: Longitudinal Predictors of Performance. *Child Dev.* 1 nov 2010; 81(6):1753–67. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2010.01508.x> PMID: 21077862
55. Purpura DJ, Hume LE, Sims DM, Lonigan CJ. Early literacy and early numeracy: The value of including early literacy skills in the prediction of numeracy development. *J Exp Child Psychol.* 1 dec 2011; 110(4):647–58. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2011.07.004> PMID: 21831396
56. Savage R, Carless S, Ferraro V. Predicting curriculum and test performance at age 11 years from pupil background, baseline skills and phonological awareness at age 5 years. *J Child Psychol Psychiatry.* 2007; 48(7):732–9. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7610.2007.01746.x> PMID: 17593154
57. Smedt BD, Taylor J, Archibald L, Ansari D. How is phonological processing related to individual differences in children's arithmetic skills? *Dev Sci.* 2010; 13(3):508–20. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00897.x> PMID: 20443971
58. Baker CE. Does Parent Involvement and Neighborhood Quality Matter for African American Boys' Kindergarten Mathematics Achievement? *Early Educ Dev.* 2015; 26(3):342–55.
59. Niklas F, Schneider W. Home learning environment and development of child competencies from kindergarten until the end of elementary school. *Contemp Educ Psychol.* 1 apr 2017; 49:263–74.
60. Lehl S, Ebert S, Blaurock S, Roszbach H-G, Weinert S. Long-term and domain-specific relations between the early years home learning environment and students' academic outcomes in secondary school. *Sch Eff Sch Improv.* 2 jan 2020; 31(1):102–24.
61. Segers E, Kleemans T, Verhoeven L. Role of Parent Literacy and Numeracy Expectations and Activities in Predicting Early Numeracy Skills. *Math Think Learn.* 3 apr 2015; 17:219–36.
62. Hart SA, Ganley CM, Purpura DJ. Understanding the Home Math Environment and Its Role in Predicting Parent Report of Children's Math Skills. *PLOS ONE.* 22 dec 2016; 11(12):e0168227. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168227> PMID: 28005925
63. van Bergen E, van Zuijlen T, Bishop D, F. de Jong P. Why Are Home Literacy Environment and Children's Reading Skills Associated? What Parental Skills Reveal. *Read Res Q.* 1 aug 2016;
64. Plomin R, DeFries JC, Loehlin JC. Genotype-environment interaction and correlation in the analysis of human behavior. *Psychol Bull.* march 1977; 84(2):309–22. PMID: 557211
65. Scarr S, McCartney K. How people make their own environments: a theory of genotype greater than environment effects. *Child Dev.* apr 1983; 54(2):424–35. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1983.tb03884.x> PMID: 6683622
66. Hart SA, Little C, van Bergen E. Nurture might be nature: Cautionary tales and proposed solutions. *Npj Sci Learn.* in press.
67. Braham EJ, Libertus ME. Intergenerational associations in numerical approximation and mathematical abilities. *Dev Sci.* 2017; 20(5). <https://doi.org/10.1111/desc.12436> PMID: 27496658

68. Brown S, McIntosh S, Taylor K. Following in Your Parents' Footsteps? Empirical Analysis of Matched Parent–Offspring Test Scores*. *Oxf Bull Econ Stat.* 2011; 73(1):40–58.
69. Crane J. Effects of Home Environment, SES, and Maternal Test Scores on Mathematics Achievement. *J Educ Res.* 1996; 89(5):305–14.
70. Ashcraft MH. Math Anxiety: Personal, Educational, and Cognitive Consequences. *Curr Dir Psychol Sci.* 1 oct 2002; 11(5):181–5.
71. Casad BJ, Hale P, Wachs FL. Parent-child math anxiety and math-gender stereotypes predict adolescents' math education outcomes. *Front Psychol.* 3 nov 2015 <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01597> PMID: 26579000
72. Soni A, Kumari S. The Role of Parental Math Anxiety and Math Attitude in Their Children's Math Achievement. *Int J Sci Math Educ.* 1 febr 2017; 15(2):331–47.
73. Nihira K, Meyers CE, Mink IT. Home environment, family adjustment, and the development of mentally retarded children. *Appl Res Ment Retard.* 1980; 1(1-2):5–24.
74. Schmiegeler S, Niklas F, Schneider W. Symptoms of attention-deficit hyperactivity disorder (ADHD) and home learning environment (HLE): Findings from a longitudinal study. *Eur J Psychol Educ.* 2014; 29(3):467–82.
75. Ehren BJ. Speech-Language Pathologists Contributing Significantly to the Academic Success of High School Students: A Vision for Professional Growth. *Top Lang Disord.* jan 2002; 22(2):60–80.
76. Faul F, Erdfelder E, Lang A-G, Buchner A. G* Power 3: A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behav Res Methods.* 2007; 39(2):175–91. <https://doi.org/10.3758/bf03193146> PMID: 17695343
77. Von Aster M, Dellatolas G. ZAREKI-R: Batterie pour l'évaluation du traitement des nombres et du calcul chez l'enfant. ECPA/Pearson; 2005.
78. von Aster M, Zulauf MW, Horn R. Neuropsychologische Testbatterie für Zahlenverarbeitung und Rechnen bei Kindern—ZAREKI-R. Harcourt. 2006
79. Woodcock TA, McGrew KS, Mather N. Woodcock-Johnson III Tests of achievement. Itasca, IL: Riverside Publishing; 2001.
80. Schwartz F, Epinat-Duclos J, Léone J, Poisson A, Prado J. Impaired neural processing of transitive relations in children with math learning difficulty. *NeuroImage Clin.* 1 jan 2018; 20:1255–65. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2018.10.020> PMID: 30389345
81. Schrank FA, McGrew KS, Woodcock RW. Technical Abstract(Woodcock-Johnson III Assessment Service Bulletin No. 2). Itasca, IL: Riverside Publishing; 2001.
82. Cognet G. NEMI-2: Nouvelle Echelle Métrique de l'Intelligence-2. ECPA; 2006.
83. Silinskas G, Aunola K, Lerkkanen M-K, Raiziene S. Parental Teaching of Reading and Spelling Across the Transition From Kindergarten to Grade 1. *Front Psychol.* 2021 <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.610870> PMID: 33510687
84. Cohen J. Statistical Power Analysis for the Behavioral Sciences. New York; 1988. (Routledge Academic).
85. Casey BM, Lombardi CM, Thomson D, Nguyen HN, Paz M, Theriault CA, et al. Maternal Support of Children's Early Numerical Concept Learning Predicts Preschool and First-Grade Math Achievement. *Child Dev.* 1 nov 2016; 89(1):156–73. <https://doi.org/10.1111/cdev.12676> PMID: 27861760
86. Pan Y, Gauvain M, Liu Z, Cheng L. American and Chinese parental involvement in young children's mathematics learning. *Cogn Dev.* 2006; 21(1):17–35.
87. Denton K, West J. Children's Reading and Mathematics Achievement in Kindergarten and First Grade. *Wash DC Natl Cent Educ Stat.* 2002;4.
88. Entwisle DR, Alexander KL. Beginning School Math Competence: Minority and Majority Comparisons. *Child Dev.* 1 apr 1990; 61(2):454–71. PMID: 2344782
89. Jordan NC, Huttenlocher J, Levine SC. Assessing early arithmetic abilities: Effects of verbal and non-verbal response types on the calculation performance of middle- and low-income children. *Learn Individ Differ.* 1 jan 1994; 6(4):413–32.
90. Gustafsson J-E, Undheim JO. Individual differences in cognitive functions. In: Handbook of educational psychology. London, England: Prentice Hall International; 1996. p. 186–242.
91. Passolunghi MC, Vercelloni B, Schadee H. The precursors of mathematics learning: Working memory, phonological ability and numerical competence. *Cogn Dev.* 2007; 22(2):165–84.
92. Lagacé-Séguin DG, Case E. Extracurricular activity and parental involvement predict positive outcomes in elementary school children. *Early Child Dev Care.* 1 may 2010; 180(4):453–62.

93. Sautory O, Biaisque V, Vidalenc J. Le temps périscolaire et les contraintes professionnelles des parents. *Insee Prem*. 2011;(1370).
94. Elliott L, Bachman HJ, Henry DA. Why and how parents promote math learning with their young children: A mixed-methods investigation. *Parenting*. 2020; 20(2):108–40.
95. Zippert EL, Rittle-Johnson B. The home math environment: More than numeracy. *Early Child Res Q*. 2020; 50:4–15.
96. Berkowitz T, Schaeffer MW, Maloney EA, Peterson L, Gregor C, Levine SC, et al. Math at home adds up to achievement in school. *Science*. 9 oct 2015; 350(6257):196–8. <https://doi.org/10.1126/science.aac7427> PMID: 26450209
97. Maloney EA, Ramirez G, Gunderson EA, Levine SC, Beilock SL. Intergenerational Effects of Parents' Math Anxiety on Children's Math Achievement and Anxiety. *Psychol Sci*. sept 2015; 26(9):1480–8. <https://doi.org/10.1177/0956797615592630> PMID: 26253552
98. Galindo C, Sheldon SB. School and home connections and children's kindergarten achievement gains: The mediating role of family involvement. *Early Child Res Q*. 1 jan 2012; 27(1):90–103.
99. Martini F, Sénéchal M. Learning Literacy Skills at Home: Parent Teaching, Expectations, and Child Interest. *Can J Behav Sci Can Sci Comport*. 1 july 2012; 44:210–21.
100. Musun-Miller L, Blevins-Knabe B. Adults' beliefs about children and mathematics: how important is it and how do children learn about it? *Early Dev Parent*. 1 dec 1998; 7(4):191–202.
101. King MF, Bruner GC. Social desirability bias: A neglected aspect of validity testing. *Psychol Mark*. 2000; 17(2):79–103.
102. Elliott L, Braham EJ, Libertus ME. Understanding sources of individual variability in parents' number talk with young children. *J Exp Child Psychol*. july 2017; 159:1–15. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.01.011> PMID: 28266331
103. Levine SC, Suriyakham LW, Rowe ML, Huttenlocher J, Gunderson EA. What counts in the development of young children's number knowledge? *Dev Psychol*. sept 2010; 46(5):1309–19. <https://doi.org/10.1037/a0019671> PMID: 20822240
104. Susperreguy MI, Davis-Kean PE. Maternal Math Talk in the Home and Math Skills in Preschool Children. *Early Educ Dev*. 17 aug 2016; 27(6):841–57.
105. Vandermaas-Peeler M, Nelson J, Bumpass C, Sassine B. Numeracy-Related Exchanges in Joint Storybook Reading and Play. *Int J Early Years Educ*. march 2009; 17(1):67–84.
106. Saracho O, Spodek B. Fathers: The « invisible » parents. *Early Child Dev Care*. 1 oct 2008; 178.
107. Rittle-Johnson B, Zippert EL, Boice KL. The roles of patterning and spatial skills in early mathematics development. *Early Child Res Q*. 1 jan 2019; 46:166–78.
108. Casey BM, Dearing E, Dulaney A, Heyman M, Springer R. Young girls' spatial and arithmetic performance: The mediating role of maternal supportive interactions during joint spatial problem solving. *Early Child Res Q*. 1 oct 2014; 29(4):636–48.
109. Blevins-Knabe B. Early Mathematical Development: How the Home Environment Matters. In: *Early childhood mathematics skill development in the home environment*. 2016. p. 7–28.
110. Bloom H, Hill C, Black A, Lipsey M. Performance Trajectories and Performance Gaps as Achievement Effect-Size Benchmarks for Educational Interventions. *J Res Educ Eff*. 15 oct 2008; 1:289–328.
111. Polanin J, Tanner-Smith E, Hennessy E. Estimating the Difference Between Published and Unpublished Effect Sizes: A Meta-Review. *Rev Educ Res*. 16 apr 2015; 86.
112. Rattan A, Good C, Dweck CS. "It's ok—Not everyone can be good at math": Instructors with an entity theory comfort (and demotivate) students. *J Exp Soc Psychol*. 1 may 2012; 48(3):731–7.

Chapitre 6 : Deuxième étude

Nurturing the mathematical brain: Home numeracy practices are associated with children's neural responses to symbolic numbers.

Article 2: Girard Cléa, Bastelica Thomas, Léone Jessica., Epinat-Duclos Justine., Longo Léa & Prado Jérôme (*In Press*). Nurturing the mathematical brain: Home numeracy practices are associated with children's neural responses to symbolic numbers, *Psychological Science*

Abstract

Disparities in home numeracy environment contribute to large variations in children's mathematical skills. However, the neural mechanisms underlying the relation between home numeracy experiences and mathematical learning are unknown. Here, parents of 66 8-year-olds completed a questionnaire assessing the frequency of home numeracy practices. Neural adaptation to the repetition of Arabic numerals and words was measured in children using fMRI (n=50), thereby assessing how sensitive was the brain to the presentation of numerical and non-numerical information. Disparities in home numeracy practices were related to differences in digit (but not word) processing in a region of the left intraparietal sulcus (IPS) that was also related to child arithmetic fluency. Furthermore, digit-related processing in the IPS influenced the relation between home numeracy practices and arithmetic fluency. Results are consistent with a model hypothesizing that home numeracy practices may affect children's mathematical skills by modulating the IPS response to symbolic numerical information.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Nurturing the mathematical brain:

Home numeracy practices are associated with children's neural responses to Arabic numerals

Cléa Girard¹, Thomas Bastelica¹, Jessica Léone¹, Justine Epinat-Duclos¹, Léa Longo¹ & Jérôme
Prado¹

¹ Centre de Recherche en Neurosciences de Lyon (CRNL), INSERM, CNRS, & Université de Lyon,
France

Corresponding Authors: C. Girard (clea.girard@etu.univ-lyon1.fr) or J. Prado (jerome.prado@univ-lyon1.fr), CRNL, 95 bd Pinel, 69675 Bron cedex, France.

Running head: Home numeracy practices and the numerical brain

Keywords: Home numeracy practices and the numerical brain

Article type: Research Article

Submitted: 6/12/20

Revision accepted: 6/20/21

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Number of words (Introduction, Discussion, and Acknowledgements): 2000.

Conflict of interest statement: The authors declare no competing interests.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Abstract

Disparities in home numeracy environment contribute to large variations in children's mathematical skills. However, the neural mechanisms underlying the relation between home numeracy experiences and mathematical learning are unknown. Here, parents of 66 8-year-olds completed a questionnaire assessing the frequency of home numeracy practices. Neural adaptation to the repetition of Arabic numerals and words was measured in children using fMRI (n=50), thereby assessing how sensitive was the brain to the presentation of numerical and non-numerical information. Disparities in home numeracy practices were related to differences in digit (but not word) processing in a region of the left intraparietal sulcus (IPS) that was also related to child arithmetic fluency. Furthermore, digit-related processing in the IPS influenced the relation between home numeracy practices and arithmetic fluency. Results are consistent with a model hypothesizing that home numeracy practices may affect children's mathematical skills by modulating the IPS response to symbolic numerical information.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Statement of Relevance

Both before and after they enter school, children are exposed to vastly different numeracy experiences at home. Although these disparities are increasingly thought to affect mathematical achievement, little is known about how children's environment and experiences beyond the classroom impact the development of the numerical brain. Using functional magnetic resonance imaging (fMRI) in 8-year-olds, we found that brain responses to the repeated presentation of symbolic numerical magnitudes (Arabic numerals) in the intraparietal sulcus (IPS) are related to differences in the frequency of numeracy practices shared with parents. Our findings are consistent with the proposal that the processing of symbolic magnitudes in the IPS mediates the relation between home numeracy practices and children's mathematical skills. Thus, children's home environment may not only affect language-related brain functions, as suggested by prior research. It might also influence the way symbolic numerical magnitudes are processed in the brain.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Introduction

Children's mathematical development is characterized by large individual differences that critically impact career prospects in a technology-driven society. Although these individual differences are often attributed to school-related factors (Sokolowski & Ansari, 2018), variations in mathematical achievement through elementary and middle school are predicted by disparities in numerical knowledge even before children enter kindergarten (Duncan et al., 2007). This suggests that experiences with numeracy outside of the classroom might influence the acquisition of numerical skills (Elliott & Bachman, 2018).

Current neuroimaging research suggests that children's home environment and experiences mainly affect mathematical learning by influencing language-related brain functions. For example, several studies have investigated the relation between brain development and family socio-economic status (SES), a construct that includes measures of parental education and income and therefore serves as a proxy for children's environmental inputs and experiences (Farah, 2017). This literature has predominantly associated SES with structural differences in left perisylvian and prefrontal areas supporting language and executive functions (Farah, 2017). SES has also been associated with tasks that involve the left perisylvian/language system in children (Merz et al., 2019). Finally, studies suggest that even the link between SES and mathematical knowledge is supported by language-related brain systems (Demir et al., 2015; Demir-Lira et al., 2016).

But prior studies have two major limitations. First, SES is a *distal* construct that may affect mathematical development through more *proximal* environmental factors. For instance, SES may be associated with the quality and frequency of mathematical activities and resources that are provided by parents at home, i.e., the *home numeracy environment* (Dunst et al., 2017; Elliott & Bachman, 2018; Mutaf-Yıldız et al., 2020). Indeed, children who benefit from more frequent home numeracy practices than their peers show improved mathematical knowledge, though this relation depends upon the type (formal versus informal) and complexity (advanced versus basic) of home practices (Elliott & Bachman, 2018). Thus, home numeracy practices may provide a more proximal index of a child's home numeracy environment than family SES.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Second, previous studies investigating the relation between SES and mathematical processing have exclusively focused on single-digit arithmetic (Demir et al., 2015; Demir-Lira et al., 2016). However, single-digit arithmetic largely relies on the retrieval of phonological information from long-term memory (Zamarian et al., 2009). This raises the possibility that the relation between SES and language-related areas observed in these studies may be due to the phonological nature of the task.

Cognitive neuroscience research suggests that human mathematical competence is likely *not* grounded in the brain systems for language (Amalric & Dehaene, 2016). Instead, studies show that non-symbolic numerical processing (e.g., estimating the numerosity of an array of dots) as well as symbolic numerical processing (e.g., understanding the meaning of an Arabic numeral) involves brain circuits in and around the intraparietal sulcus (IPS) (Nieder, 2016). Although a growing number of studies suggest that non-symbolic and symbolic numerical processing does not rely on similar mechanisms in the IPS (Wilkey & Ansari, 2020), the progressive recruitment of that region is largely believed to support mathematical learning in children (Dehaene & Cohen, 2007). Individual differences in mathematical skills have also been shown to be associated with symbolic number processing in the IPS (Bugden et al., 2012), a finding in line with accumulating evidence suggesting that symbolic number understanding strongly predicts mathematical skills in children (to a greater extent than non-symbolic estimation skills) (De Smedt et al., 2013). Therefore, it is possible that children who experience more frequent numeracy activities at home may show enhanced response to symbolic numerical information in the IPS, which in turn may influence mathematical skills. This hypothesized model (**Fig. 1a**) parallels models arguing that a supportive home literacy environment may influence the structure and function of language-related brain regions, which are then thought to affect children's linguistic skills (see Romeo et al., 2018 and Fig. 1 in Merz, Maskus, Melvin, He, & Noble, 2020 for an example of such a model).

In the present study, we explored the relation between home numeracy practices and the brain circuits underlying symbolic numerical processing in children. We recruited 73 8-year-olds with their parents. While both parents and children completed the same test of arithmetic fluency (thereby

1
2
3 measuring a skill that is at the heart of elementary mathematics and relates to higher-level
4 mathematical competence; Price, Mazocco, & Ansari, 2013), parents also responded to a
5 questionnaire assessing home numeracy practices (final behavioral sample, n=66). Finally, children
6 underwent fMRI scanning (final fMRI sample, n=50). In the scanner, children were presented with a
7 blocked passive visual adaptation task inspired by Perrachione and colleagues (2016). fMRI-
8 adaptation paradigms rely on the idea that presenting a given stimulus repeatedly leads to a decrease of
9 signal in the region that processes this stimulus (because firing rates of the neuronal population
10 decrease; Grill-Spector and Malach, 2001). Thus, comparing activity associated with blocks of
11 different stimuli (no-adaptation) versus activity associated with blocks of identical stimuli (adaptation)
12 captures a *neural adaptation effect* in task-relevant regions. Here, children were presented with
13 adaptation and no-adaptation blocks of either digits or words (the latter being considered a control)
14 (Fig. 1b).
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27

28 Testing the causal aspects of the assumptions in Fig. 1a requires interventional designs, which
29 are particularly challenging in pediatric neuroimaging. However, our cross-sectional design may still
30 provide critical evidence for the plausibility of this model. Specifically, we aim to test whether
31 associations between home numeracy practices, digit processing in the IPS, and mathematical skills
32 observed at age 8 are *consistent* with this model. This would mirror recent studies showing that
33 relations between home literacy, language-related structure and function, and literacy skills are
34 consistent with a model of how home literacy experiences affect literacy skills (Merz et al., 2020;
35 Romeo et al., 2018).
36
37
38
39
40
41
42
43
44

45 Here we first aimed to confirm that home numeracy practices relate to children's arithmetic
46 fluency (consistent with Path c in Fig. 1a). We then used the framework of mass-univariate Mediation
47 Effect Parametric Mapping (MEPM; Wager, Davidson, Hughes, Lindquist, & Ochsner, 2008) to
48 assess (1) whether home numeracy practices relate to digit-related (but not word-related) activity in
49 the IPS (consistent with Path a in Fig. 1a), (2) whether digit-related (but not word-related) activity in
50 the IPS relate to child arithmetic fluency, controlling for home numeracy practices (consistent with
51 Path b in Fig. 1a), and (3) whether digit-related (but not word-related) IPS activity may explain some
52 of the relation between home numeracy practices and child arithmetic fluency. This would be
53
54
55
56
57
58
59
60

1
2
3 consistent with the idea that home numeracy practices may affect children's numerical skills through
4
5 symbolic numerical processing in the IPS.
6
7
8
9
10
11
12
13
14

15 **Method**

16 *Participants*

17
18
19
20 Seventy-three right-handed elementary school children of approximately 8 years of age and
21
22 one of their parents were invited to participate in the experiment. Participants were contacted through
23
24 flyers sent to schools and advertisements on social media. All parents and children came to the lab for
25
26 a first behavioral session during which they were given tests and questionnaires. Seven children were
27
28 excluded from the behavioral analyses because they (1) were seeing a speech-language pathologist on
29
30 a regular basis (n=3), (2) had an intelligence quotient (IQ) lower than the 25th percentile (n=2), (3)
31
32 had a delay in speech and language acquisition (n=1), and (4) were diagnosed with attention deficit
33
34 disorder (n=1). Therefore, 66 participants were included in the behavioral analyses of this first session.
35
36 Fifty-eight of these children participated a second session involving fMRI scanning with the digit and
37
38 word adaptation tasks. After fMRI motion correction (see below), 50 children had at least one run of
39
40 usable data in the digit adaptation task (22 of these participants had two usable runs in that task) and
41
42 44 children had at least one run of usable data in the word adaptation task (22 of these participants had
43
44 two usable runs in that task). Details about justification of final fMRI sample sizes are given in
45
46 Supplemental information, as well as sensitivity curves across a range of effect sizes for our samples
47
48 (**Fig. S1**). Demographic information about children and parents can be found in **Table 1**. All children
49
50 and parents were native French speakers. Parents gave written informed consent and children gave
51
52 their assent to participate in the study. The study was approved by a French ethics committee (Comité
53
54 de Protection des Personnes Sud-Est 2). Families were paid 80 euros for their participation.
55
56
57
58
59
60

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Testing

Arithmetic fluency of children and parents were assessed during the first session using the Math-Fluency subtest of the Woodcock-Johnson-III Tests of Achievement (WJ-III) (Woodcock et al., 2001). In this test, participants solve simple addition, subtraction, and multiplication problems within a 3-min time limit. The test consists of 2 pages of 80 problems involving operands from 0 to 10. A raw score corresponding to the number of correct responses was obtained for each child and parent. An age-normalized score was also calculated based on US and French norms for adults and children, respectively (Schwartz et al., 2018). Given the homogeneity of the sample in terms of age (**Table 1**), raw scores were used in all analyses. In addition to mathematical skills, children's IQ was estimated using the NEMI-2 standardized intelligence test (Cognet, 2006). The test uses measures of verbal intelligence and matrix reasoning to provide a standardized score of full-scale IQ. Math-Fluency and IQ scores are indicated in **Table 1**.

Parental questionnaires

Parents were given electronic questionnaires on a tablet to gather measures of home numeracy practices. First, information about family SES was collected based on parent's education level and monthly income. Education level was measured using the number of years pre- or post- high school graduation, with high school graduation set at 0 (i.e., positive numbers indicated that parents completed some years of education after graduating). Approximate monthly income was measured using ranges with increments of €1,000. The minimum possible range was €0 to €999 and the maximum possible range was more than €10,000. For all analyses, we used the median of the reported income range (e.g., €500 for a range between €0 to €1,000) as an approximation of parents' income.

Second, parents were asked how often they engaged in home learning activities that involve mathematics with their child. To reduce the math-focus of the study, parents were also asked about activities involving other academic and non-academic domains (e.g., reading, music, biology). These items were considered filler items and were not analyzed in the present study. Activities were adapted from the questionnaire used in LeFevre et al. (LeFevre et al., 2009). For each activity, parents rated the

1
2
3 frequency with which they engaged in that activity with their child at home during the past month. A
4
5 six-point rating scale was used (Did not occur/Activity is not relevant to my child, 1-3 times per
6
7 month, Once per week, 2-4 times per week, Almost daily, Daily). Parents could also indicate if they
8
9 used to engage in an activity in the past but no longer did at the time of testing (“The activity occurred
10
11 in the past but no longer occurs; rated 1 point). Finally, they could indicate if the child engaged in that
12
13 activity on her own (“My child does this activity without my help”; rated 1 point).
14

15
16 Among the 77 home learning activities mentioned in the questionnaire, 36 were related to
17
18 mathematics. Following previous studies (LeFevre et al., 2009), 17 of these activities were considered
19
20 *informal* (Fig. 2) and 19 were considered *formal* (Fig. 3). Informal activities are those whose purpose
21
22 is not to teach numerical skills but nonetheless expose children to various mathematical concepts (e.g.,
23
24 fraction when cooking) (Elliott & Bachman, 2018; LeFevre et al., 2009; Mutaf-Yıldız et al., 2020).
25
26 Formal activities are those in which parents explicitly intend to teach numerical skills to their child
27
28 (e.g., multiplication tables). Formal activities were further considered *basic* or *advanced*, depending
29
30 on their complexity for an 8-year-old child (Elliott & Bachman, 2018; Mutaf-Yıldız et al., 2020). For
31
32 example, subtracting, multiplying or dividing numbers were considered either *basic* or *advanced*
33
34 depending on the size of the operands (i.e., single-digit versus double-digit). Similarly, whereas
35
36 activities such as reading and writing numbers up to 100 were considered relatively *basic*, reading and
37
38 writing numbers up to 1,000 were considered more *advanced* in 8-year-olds. Thus, each *advanced*
39
40 activity was always related to a more *basic* activity. To avoid having parents repeatedly answering no
41
42 to questions that were about the same topic but only differed in terms of the complexity of the activity
43
44 (e.g., “Did you count up to 100 with your child?” followed by “Did you count up to 1,000 with your
45
46 child?”), advanced formal activities were not presented to parents if they stated that the corresponding
47
48 more basic activity had never occurred at home. To account for the inherent relation between basic
49
50 and advanced formal practices, the frequency of basic practices was systematically included as
51
52 covariate in models investigating effects of advanced practices in both behavioral and fMRI analyses
53
54 (and vice versa). Parental responses to the questionnaire are shown on Fig. 2 and Fig. 3. Finally,
55
56 parents were asked to provide a subjective estimate of their child’s skills in mathematics (and other
57
58
59
60

1
2
3 domains) using a six-point rating scale (i.e., Not sure, Severe difficulty, Difficulty, Average skills,
4
5 Good skills, Very good skills).
6
7

8 9 *Experimental tasks*

10
11 We directly adapted from Perrachione et al. (2016) a task in which series of symbolic stimuli
12
13 were passively presented in blocks at the center of the screen. We chose this task because (1) it does
14
15 not require an active response (thereby avoiding confounding individual differences in activity with
16
17 individual differences in performance; Luna, Velanova, & Geier, 2010), and (2) block designs have
18
19 more power and reliability than even-related designs (which makes them particularly well-suited for
20
21 pediatric neuroimaging; Bennett & Miller, 2013). As in Perrachione et al., one version of the task (i.e.,
22
23 word adaptation task) involved series of words. Words were 3 to 5 letters monosyllabic French nouns
24
25 of equal frequency (mode=4) (<http://www.lexique.org/shiny/openlexicon/>). None of these words were
26
27 number words or quantifiers. This word adaptation task served as a control task in the present study. In
28
29 another version of the task specifically developed for the purpose of the current study (i.e., digit
30
31 adaptation task), words were replaced by Arabic numerals ranging from 1 to 8. Word and digit
32
33 adaptation tasks were each composed of 2 runs. In each of these runs, participants were presented with
34
35 adaptation and no-adaptation blocks (**Fig. 1b**). Adaptation blocks consisted in the repetition of the
36
37 same stimulus (word or digit) 8 times. No-adaptation blocks consisted in the presentation of 8
38
39 different stimuli.
40
41
42
43
44
45

46 *Experimental timeline*

47
48 Experimental timeline was identical to Perrachione et al. (2016). The task was presented using
49
50 Psychopy (Peirce et al., 2019). In each block of the adaptation tasks, stimuli (word or digit) remained
51
52 on the screen for 700 ms, with a 500 ms inter-stimulus interval (for a total block duration of 9.6
53
54 seconds). Ten adaptation blocks and 10 no-adaptation blocks were presented along with 10 blocks of
55
56 visual fixation (duration = 9.6 seconds) in each run. Block presentation was pseudo-randomized such
57
58 that 2 blocks of the same type could not follow each other.
59
60

1
2
3 To ensure that tasks did not differ in levels of attentional engagement, 10 target stimuli (a
4 picture of rocket) randomly appeared in each run (outside of blocks). Participants were asked to press
5 a button every time this target appeared. On average, children detected 90% of targets (SD = 18) in the
6 digit adaptation task and 89% of targets (SD = 15) in the word adaptation task. There was no
7 difference in target detection rate between tasks (Wilcoxon rank sum test: $p=.73$), indicating that
8 children paid equal attention to the stimuli in both tasks. Spearman rank correlations indicated that
9 target detection rates were not correlated with education, income, home numeracy practices, or child
10 arithmetic fluency in any of the tasks (digit adaptation: all ρ s < .16, all p s > .14; word adaptation: all
11 ρ s < .19, all p s > .11).

22 23 24 *fMRI data preprocessing*

25
26 Details about fMRI data acquisition are given in Supplemental information. Functional images
27 were corrected for slice acquisition delays and spatially realigned to the first image of the first run to
28 correct for head movements. Realigned images were smoothed with a Gaussian filter (4×4×7 mm full-
29 width at half maximum). Following Romeo et al. (2018), ArtRepair
30 (<https://cibsr.stanford.edu/tools/human-brain-project/artrepair-software.html>) was used to identify
31 functional volumes with a global mean intensity greater than 3 standard deviations from the average of
32 the run or a volume-to-volume motion greater than 2 mm. These outlier volumes were substituted by
33 the interpolation of the 2 nearest non-repaired volumes. Participants with outliers in more than 20% of
34 volumes were excluded from the analyses. After outlier exclusion, the movement range was on
35 average 0.02 (SD = 0.07), 0.14 (SD = 0.30), and 0.18 (SD = 0.60) mm in the x, y, and z direction, with
36 0.24 (SD = 0.82), 0.32 = (SD 1.10), 0.40 = (SD 0.37) degrees of roll, pitch, and yaw. Finally,
37 functional images were normalized into the standard Montreal Neurological Institute (MNI) space
38 (normalized voxel size, 2×2×3.5 mm³).

44 45 46 47 48 49 50 51 52 53 54 55 56 *fMRI data analysis*

57
58 Statistical analysis of fMRI data was performed according to the GLM. Brain activity
59 associated with periods of adaptation and no-adaptation was modeled as epochs with onsets time-

1
2
3 locked to the beginning of each block and a duration of 9.6 sec. All epochs were convolved with a
4 canonical hemodynamic response function. The time series data were high-pass filtered (1/128Hz),
5 and serial correlations were corrected using an auto-regressive AR(1) model.
6
7
8

9 For each subject and task, the neural adaptation effect was measured across the whole brain by
10 subtracting activity associated with adaptation blocks from activity associated with no-adaptation
11 blocks. Relations between home numeracy practices, neural adaptation effects, and arithmetic fluency
12 were assessed using the mass-univariate MEPM framework implemented in the M3 toolbox (Wager et
13 al., 2008). MEPM is a form of structural equation modeling that allows for the voxelwise mapping of
14 multiple brain regions that satisfy the formal criteria for mediators in a standard three-variable path
15 model involving a predictor, a brain response, and an outcome. For each voxel, MEPM estimates 3
16 paths: (1) Path a (i.e., the relation between the predictor and the brain response), (2) Path b (i.e., the
17 relation between the brain response and the outcome, controlling for the predictor), and (3) Path a*b
18 (i.e., the formal test of mediation, indicating whether the relation between the predictor and the
19 outcome, or Path c, is significantly reduced by including the brain response in the model). Here, Path a
20 reflects whether home numeracy practices relate to neural adaptation. Path b reflects whether neural
21 adaptation predicts arithmetic fluency (controlling for home numeracy practices). Path a*b is the
22 formal test of mediation, reflecting whether these effects are jointly strong enough to mediate the
23 relation between home numeracy practices and arithmetic fluency (see **Fig. 1a**).
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40

41 Bias-corrected bootstrap tests with 1,000 iterations were performed to estimate statistical
42 significance at each voxel. Bootstrapping was used as formal test of mediation because this method is
43 more powerful to assess mediation than the Sobel test for small to moderate sample sizes (Shrout &
44 Bolger, 2002). One-sided voxelwise maps of p values for the Paths a, b, and a*b were corrected for
45 multiple comparisons using AFNI 3dClustSim, version AFNI_20.3.01 (Oct 19 2020; version update
46 accounts for software bugs identified by Eklund, Nichols, & Knutsson, 2016). Smoothness estimates
47 entered into 3dClustSim were spatial autocorrelation function (acf) parameters averaged from each
48 individual's first level model residuals as calculated by 3dFWHMx using a whole brain mask (acf
49 parameters: 0.452647 4.07555 16.563). Given the a priori focus on the study on the IPS, clusters were
50 considered significant at a Family-Wise Error- (FWE) corrected threshold of $p < 0.05$, either across
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

1
2
3 the whole-brain or within an anatomical mask of the IPS (i.e., small volume correction) defined using
4
5 the Anatomy Toolbox v2.2 (Eickhoff et al., 2005). The IPS mask consisted in voxels with at least 50%
6
7 probability of belonging to one of the IPS subdivisions (hIP1, hIP2, and hIP3) as defined in the
8
9 Anatomy Toolbox. The same mask was used for similar small volume corrections in our previous
10
11 studies (e.g. Schwartz et al., 2018). FWE-corrected clusters are reported using an uncorrected voxel-
12
13 wise threshold of $p=.0025$ ($NN=1$). Note that because Path a and Path b effects are conditionally
14
15 independent, the probability of voxels from each path being significant by chance is therefore $p =$
16
17 0.00000625 or lower. Because our hypotheses were directional (i.e., we were only interested in lesser
18
19 activity in adaptation than no-adaptation blocks, as well as increases in either arithmetic fluency or
20
21 neural adaptation effects as a function of home numeracy practices), p values for behavioral and fMRI
22
23 results are one-sided. Accordingly, only 95% lower bound confidence intervals (95% CI Lower) are
24
25 reported.
26
27
28
29

30 **Results**

31 ***Behavioral results***

32
33 We first investigated the relations between SES, home numeracy practices, and arithmetic
34
35 fluency across the entire behavioral sample ($n=66$). As can be seen on **Fig. 2** and **Fig. 3**, there was
36
37 large individual variability in the reported frequencies of home numeracy practices. Between parents,
38
39 average responses on the rating scale ranged from 0.65 to 2.88 for informal practices ($M = 1.47$, $SD =$
40
41 0.50), from 0.143 to 4.64 for basic formal practices ($M = 1.68$, $SD = 0.85$), and from 0 to 3.80 for
42
43 advanced formal practices ($M = 0.95$, $SD = 0.76$). After adjusting for differences in parental income,
44
45 relatively higher education was not associated with more frequent informal practices (partial $r(64) = -$
46
47 $.14$, $p = .865$, 95% CI Lower = $-.33$). There was also no positive relation between education and basic
48
49 formal practices (adjusting for parental income and advanced formal practices, partial $r(64) = -.32$, $p =$
50
51 $.996$, 95% CI Lower = $-.49$). However, relatively higher education was associated with more frequent
52
53 advanced formal practices (adjusting for parental income and basic formal practices, partial $r(64) =$
54
55 $.23$, $p = .034$, 95% CI Lower = $.02$) (**Fig. 4a**). Finally, there was no positive relation between parental
56
57 income and any numeracy practices after adjusting for parental education (all r s $< .13$, all p s $> .163$).
58
59
60

1
2
3 Therefore, more educated (but not necessarily wealthier) parents engaged in more frequent advanced
4 formal numeracy practices with their children. Parental education was thus included as covariate in all
5 further analyses of home numeracy practices.
6
7
8
9
10

11
12 Child arithmetic fluency was positively correlated with advanced formal practices (adjusting
13 for parental education and basic formal practices, partial $r(64) = .29, p = .008, 95\% \text{ CI Lower} = .09$)
14 (Fig. 4b). However, there was no positive correlation between child arithmetic fluency and basic
15 formal practices (adjusting for parental education and advanced formal practices, partial $r(64) = -.09, p$
16 $= .775, 95\% \text{ CI Lower} = -.29$) or between child arithmetic fluency and informal practices (adjusting
17 for parental education, partial $r(64) = .08, p = .274, 95\% \text{ CI Lower} = -.13$). Thus, higher child
18 arithmetic fluency was associated with more frequent home numeracy practices, but only when these
19 practices were formal and relatively advanced. The MEPM analyses below thus focus on these
20 advanced formal practices.
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31

32 33 **MEPM results: Digit adaptation**

34
35 We used the framework of MEPM to evaluate the relations between advanced formal
36 numeracy practices, neural adaptation to digits, and child arithmetic fluency (controlling for education
37 and basic formal numeracy practices). The results of these analyses are shown in Fig. 5. First,
38 consistent with Path a in Fig. 1a, we found a significant positive relation between the frequency of
39 advanced formal home numeracy practices and digit adaptation in a cluster of the left IPS ($x = -34, y =$
40 $-60, z = 55, \text{ cluster size} = 0.1 \text{ cc}, -\log_{10}(\text{max p-value}) = 2.75, r(48) = .35$) (Fig. 5a, left). This
41 indicates greater neural adaptation to digits in children who were exposed to more frequent numeracy
42 practices. Second, controlling for advanced formal practices, there was a significant positive relation
43 between digit adaptation and child arithmetic fluency in several frontal, parietal and occipital regions,
44 including the right Middle Occipital Gyrus ($x = 32, y = -84, z = 6, \text{ cluster size} = 9.2 \text{ cc}, -\log_{10}(\text{max p-}$
45 $\text{value}) = 6.84, r(48) = .59$), left Superior Frontal Gyrus ($x = -18, y = 50, z = 17, \text{ cluster size} = 4.9 \text{ cc}, -$
46 $\log_{10}(\text{max p-value}) = 6.53, r(48) = .54$), right Middle Frontal Gyrus ($x = 42, y = 26, z = 17, \text{ cluster}$
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

1
2
3 size = 1.9 cc, $-\log_{10}(\text{max p-value}) = 3.77$, $r(48) = .45$), and left IPS ($x = -34$, $y = -60$, $z = 55$, cluster
4 size = 0.3 cc, $-\log_{10}(\text{max p-value}) = 4.51$, $r(48) = .44$). This showed that children who exhibited
5 greater neural adaptation in these regions also showed higher level of arithmetic fluency (**Fig. 5a**,
6 right). Finally, the formal test of mediation identified one cluster in the left IPS ($x = -34$, $y = -60$, $z =$
7 55, cluster size = 0.1 cc, $-\log_{10}(\text{max p-value}) = 3.05$) in which digit adaptation explained the relation
8 between advanced numeracy practices and child arithmetic fluency (**Fig. 5b**). This suggests that the
9 neural processing of symbolic numerical information in the IPS mediates the relation between home
10 numeracy practices and children's mathematical skills (Path a*b). The partially standardized effect
11 size of this indirect effect (i.e., ratio of the indirect effect to the standard deviation of the outcome;
12 Hayes, 2018) in the left IPS cluster was .35. Therefore, arithmetic fluency increased by .35 standard
13 deviations for every one-unit increase in frequency of reported advanced formal practices indirectly
14 via digit adaptation in the IPS. The relation between advanced formal practices and child arithmetic
15 fluency in the fMRI sample (total effect, or Path c: partial $r(48) = .30$, $p = .017$, 95% CI Lower = .07,
16 **Fig. 5c**, left) was no longer significant after accounting for digit adaptation in the left IPS cluster
17 identified in the formal test of mediation (direct effect, or Path c': partial $r(48) = .15$, $p = .146$, 95% CI
18 Lower = -.09, **Fig. 5c**, right).

19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39 It is important, however, to acknowledge that our design is cross-sectional. Therefore,
40 advanced formal home numeracy practices may be related to child arithmetic fluency and digit
41 adaptation in the IPS (1) because practices impact arithmetic fluency and brain activity (as
42 hypothesized in the model in **Fig. 1a**), or (2) because parents engage in more frequent advanced
43 numeracy practices as they perceive that their child is skilled in mathematics (which may be reflected
44 in both greater arithmetic fluency and enhanced brain sensitivity to numerical information). To
45 disentangle between these possibilities, we asked parents to indicate their perception of their child's
46 mathematical skills. As expected, this parental estimate was positively correlated with child arithmetic
47 fluency ($r(48) = .32$, $p = .012$, 95% CI Lower = .09). However, this parental perception was neither
48 correlated with advanced home numeracy practices (adjusting for parental education and basic formal
49 practices, partial $r(64) = -.01$, $p = .528$, 95% CI Lower = -.21), nor with digit adaptation in the IPS
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

1
2
3 (adjusting for parental education, partial $r(48) = .19, p = .099$, 95% CI Lower = $-.05$). When adjusting
4
5 for this parental estimate of child's mathematical skill, advanced formal numeracy practices also
6
7 remained related to child arithmetic fluency (adjusting for parental education and basic formal
8
9 practices, partial $r(48) = .33, p = .01$, 95% CI Lower = $.01$) (**Fig. S2a**, left) and digit adaptation in the
10
11 IPS (adjusting for parental education and basic formal practices, partial $r(48) = .37, p = .004$, 95% CI
12
13 Lower = $.14$) (**Fig. S2a**, right). Therefore, even though parents were aware of their child's
14
15 mathematical competence, this awareness did not appear to drive an increase in the frequency of
16
17 numeracy practices. This is consistent with the causal assumptions of the model in **Fig. 1a**.

18
19
20 It has also been argued that associations between home practices and children's skills may not
21
22 uniquely reflect environmental influences but may also stem (at least in part) from genetic
23
24 predispositions to high academic achievement that parents may pass on to children (these parents are
25
26 likely to maintain higher quality learning environments than others; Hart et al., 2021). Following a
27
28 recent proposal by Hart et al. (2021), we attempted to control for this confound by measuring parental
29
30 arithmetic fluency as a genetic proxy for predisposition to mathematical achievement. There was no
31
32 significant positive correlation between parent and children arithmetic fluency ($r(64) = .01, p = .477$,
33
34 95% CI Lower = $-.23$). The relation between advanced formal numeracy practices and child arithmetic
35
36 fluency also remained significant when controlled for parent arithmetic fluency (adjusting for parental
37
38 education and basic formal practices, partial $r(64) = .32, p = .004$, 95% CI Lower = $.12$). Overall, then,
39
40 the association between advanced formal home numeracy practices and child arithmetic fluency may
41
42 not be easily explained by the idea that parents have a predisposition to high mathematical
43
44 achievement.

45 46 47 48 49 **MEPM results: Word adaptation**

50
51 Because digits were systematically presented at the center of the screen in the digit adaptation
52
53 task, it is possible that the relations found above reflect general perceptual adaptation effects to any
54
55 kind of symbolic stimuli. To test for this possibility, we ran another MEPM analysis in which we used
56
57 neural adaptation to words as brain mediator of the relation between advanced formal numeracy
58
59 practices and child arithmetic fluency. Indeed, much like in the digit adaptation task, the word
60

1
2
3 adaptation task involved symbols (i.e., words) that were repeatedly presented at the center of the
4 screen. Critically, however, these symbols did not carry any numerical information. We did not find
5 any region in which word adaptation was significantly related to numeracy practices (Path a) or child
6 arithmetic fluency (Path b) (see unthresholded maps of p values on **Fig. 6**). We also did not find any
7 brain region in which word adaptation affected the relation between numeracy practices and child
8 arithmetic fluency (Path a*b). Therefore, the relation between advanced formal numeracy practices
9 and child arithmetic fluency was specifically explained by symbolic numerical information in the IPS.
10
11
12
13
14
15
16
17
18

19 **Supplemental analyses**

20
21 Finally, we performed four sets of supplemental analyses to rule out alternative explanations
22 of our findings. First, the MEPM analyses above show that word adaptation did not account for the
23 relation between advanced formal numeracy practices and child arithmetic fluency (see above).
24 However, this lack of effect might result from a general lack of sensitivity to detect adaptation to
25 words across our sample. To test for this possibility, we examined the significance of word adaptation
26 effects (i.e., difference between no-adaptation and adaptation blocks) across all participants (n=44).
27 Adaptation to words was significant in the left Inferior Frontal Gyrus and left Inferior Temporal Gyrus
28 (**Fig. S3a** and **Table S1**), which are regions of the left language-related network that were also found
29 in Perrachione et al. (2016) (see Fig. 3b in Perrachione et al., 2016). Thus, findings from Perrachione
30 et al. regarding overall adaptation to English words were largely replicated using the same task in a
31 different language (i.e., French), demonstrating the reliability of the task.
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44

45 Second, the MEPM analyses also show that digit adaptation relates to both numeracy practices
46 and arithmetic fluency. However, it remains unclear whether adaptation to digits may be significant *in*
47 *itself* in the IPS across participants. Averaging across all participants (n=50), digit adaptation effects
48 were significant in a network of frontal and occipital brain regions, but not the IPS (**Fig. S3b** and
49 **Table S1**). Because digit adaptation in these regions was neither related to numeracy practices nor
50 arithmetic fluency, these regions might support perceptual or domain-general aspects of digit
51 processing that are not dependent upon skills or environmental stimulations. Interestingly, however,
52 overall adaptation to digits was significant ($x = 32, y = -94, z = -5$, cluster size = 2.3 cc, $-\log_{10}(\max p-$
53
54
55
56
57
58
59
60

1
2
3 value) = 5.23, $d = 0.62$) when considering the participants with the highest levels of arithmetic fluency
4
5 (n = 23 after median split of the sample as a function of arithmetic fluency) (**Fig. S3c**). This was not
6
7 the case for participants with the lowest levels of fluency ($d = -0.36$, n = 23). Therefore, the presence
8
9 of significant adaptation to digits in the IPS might index a relatively high level of arithmetic fluency,
10
11 which points to a link between automaticity in symbolic number processing in the IPS and symbolic
12
13 math skills

14
15 Third, as is standard in mediation models, the relation between the mediator (i.e., brain
16
17 activity) and the outcome (i.e., child arithmetic fluency) in our MEPM analysis of digit adaptation was
18
19 controlled for the predictor (i.e., home numeracy practices). However, the same variable cannot be
20
21 both the outcome and a covariate. Thus, the relation between home numeracy practices and brain
22
23 activity was not adjusted for child arithmetic fluency. This raises the question of whether the relation
24
25 between advanced formal numeracy practices and digit adaptation in the IPS was entirely driven by
26
27 child arithmetic fluency. When adjusting for child arithmetic fluency (as well as education and basic
28
29 formal numeracy practices), advanced formal numeracy practices remained positively related to digit
30
31 adaptation in the left IPS (partial $r(48) = .24$, $p = .043$, 95% CI Lower = .01; **Fig. S2a**). Therefore, the
32
33 relation between home numeracy practices and digit adaptation in the IPS does not appear to be
34
35 uniquely driven by child arithmetic fluency.

36
37 Fourth, because previous studies show that symbolic mathematical skills relate more strongly
38
39 to symbolic than non-symbolic number processing (De Smedt et al., 2013), the present study focuses
40
41 on symbolic number processing in the IPS. Nonetheless, non-symbolic numerical skills have also been
42
43 related to both mathematical skills (Chen & Li, 2014) and home numeracy practices (Elliott &
44
45 Bachman, 2018), though evidence for these relations are inconsistent and disputed (De Smedt et al.,
46
47 2013; Mutaf-Yıldız et al., 2020; Wilkey & Ansari, 2020). To investigate whether the effects shown
48
49 above would also be obtained using non-symbolic numerical stimuli, we also presented participants
50
51 with an exploratory non-symbolic numerical adaptation task in which dot arrays were repeatedly
52
53 presented, either with the same numerosity (adaptation blocks) or with a different numerosity (no-
54
55 adaptation blocks). Stimuli were controlled for a variety of parameters (see Supplemental information
56
57 and **Fig. S4**). In contrast to digit adaptation, we did not find any relation between adaptation to
58
59
60

1
2
3 numerosities and advanced formal numeracy practices anywhere in the brain. However, numerosity
4
5 adaptation increased with the frequency of basic formal numeracy practices in a network of fronto-
6
7 parietal regions that included the left IPS (**Fig. S4** and **Table S1**). This suggests that non-symbolic
8
9 numerical processing may relate to different aspects of the home numeracy environment than
10
11 symbolic numerical processing. We also found a significant positive relation between arithmetic
12
13 fluency and numerosity adaptation in the right (rather than the left) IPS, in keeping with studies
14
15 demonstrating that symbolic and non-symbolic numerical processing rely on different neural
16
17 mechanisms (Wilkey & Ansari, 2020) (**Fig. S4** and **Table S1**). MEPM analyses, however, showed that
18
19 numerosity adaptation did not explain the relation between either basic or advanced formal practices
20
21 and arithmetic fluency anywhere in the brain. Thus, only symbolic (not non-symbolic) number
22
23 processing appears to account for the relation between numeracy practices and mathematical skills.
24
25
26
27

28 **Discussion**

29
30 Here we set out to explore the relations between home numeracy practices, number-related
31
32 brain regions, and mathematical skills in 8-year-olds. First, consistent with previous studies (Elliott &
33
34 Bachman, 2018), we found that children's mathematical skills increased with the frequency of home
35
36 numeracy practices, but only if those activities were formal and relatively challenging.
37
38

39 Second, we found an association between children's arithmetic skills and digit-related activity
40
41 in the IPS, a region that is at the core of human mathematical competence (Nieder, 2016). Such a
42
43 relation has been suggested in the past (e.g., Bugden et al., 2012). However, previous studies have
44
45 tended to use active tasks in relatively heterogenous samples (Arsalidou et al., 2018), such that
46
47 differences in brain activity can be confounded by differences in age and task performance (Church et
48
49 al., 2010). Here, we demonstrate that this relation can be captured using a passive digit adaptation task
50
51 in a homogeneous sample of 8-year-olds, thereby measuring how sensitive is the IPS to the passive
52
53 presentation of symbolic numerical information.
54
55

56 Third, a major novel finding of the present study is that home numeracy practices also relate to
57
58 digit-related activity in the IPS. This suggests that children benefiting from a higher quality home
59
60 numeracy environment may have heightened sensitivity to symbolic magnitudes in the IPS. Our

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

results are noteworthy because the only two prior studies that have investigated the relation between the neural bases of mathematical skills and children's home environment (using family SES as a proxy) have found such a relation in language-related regions (Demir et al., 2015; Demir-Lira et al., 2016). Therefore, our study provides the first evidence that disparities in children's home numeracy environment may relate to functional differences in how IPS mechanisms process symbolic magnitudes.

Fourth, we found that the relation between advanced formal numeracy practices and children's arithmetic skills was influenced by the neural response to digits in the left IPS. This is consistent with a model positing that core numerical processing mechanisms in the IPS mediate the relation between home numeracy environment and children's mathematical skills (**Fig. 1a**). Critically, the relation between advanced formal numeracy practices and children's arithmetic skills was not influenced by neural adaptation to words, demonstrating that this effect was not explained by a domain-general processing of symbolic information. That relation was also not influenced by neural adaptation to non-symbolic numerosities, in line with a growing body of studies showing that symbolic number processing is a more consistent predictor of mathematical skills than non-symbolic processing in children (De Smedt et al., 2013).

Finally, we highlight two main limitations of this work. A first limitation is that our design is cross-sectional and therefore cannot speak to the causal aspects of the model in **Fig. 1a**. That is, although the relations observed are consistent with this model, other models may be compatible with our results. Several of our analyses attempt to undermine alternative models. However, the choice of the most plausible mediation model ultimately rests on prior findings, logic, and theoretical considerations (Fiedler et al., 2018). Specifically, the model in **Fig. 1a** is derived from similar research on how the home literacy environment may influence literacy skills. It also rests on the general theoretical framework that disparities in environmental experiences affect brain development, which in turn influence behavioral traits (Farah, 2017). Finally, it should be noted that, although parents filled out our questionnaire at the time of scanning, it was retrospective in that it asked parents to reflect on practices that they engaged in the past. Furthermore, because the HNE is relatively stable over the years (Tamis-LeMonda et al., 2019), our measure might have captured the quality of the home

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

numeracy environment not only at the time of the study but also when children were younger. Thus, we speculate that there may be temporal precedence of home numeracy practices over IPS activity and mathematical skills measured at age 8. Nonetheless, interventional studies are needed to substantiate this claim and our findings should be taken as a first critical test for the plausibility of the model in **Fig. 1a**.

A second limitation concerns our sample size. To our knowledge, our study involves the largest sample of children completing a passive number processing task in an MRI scanner (Arsalidou et al., 2018). Our sample is also in line with previous studies investigating relations between home literacy environment and language-related brain regions (Merz et al., 2020; Romeo et al., 2018). Yet, recent reports have raised concerns about the replicability of brain-behavior correlations in samples sizes that are typical in neuroimaging studies (Marek et al., 2020), though replicability depends on experimental considerations (Nee, 2019). Given the complexity of acquiring task-based neuroimaging data in children (Raschle et al., 2012), we believe that an important avenue for addressing replicability concerns in developmental cognitive neuroscience is data sharing. Here we have made available all individual neuroimaging data, which we hope will encourage meta-analyses, re-analyses, and comparisons with other datasets.

In sum, our findings show that the neural processing of symbolic numerical magnitudes may be affected by experiences beyond the classroom. Our results are consistent with a mechanistic model of how home numeracy practices might affect children's mathematical skills, inspired by similar models of the home literacy environment and children's reading skills (Merz et al., 2020; Romeo et al., 2018). Therefore, our study provides broad support for interventions that aim to foster the development of the numerical brain by improving home numeracy practices (Gibson et al., 2020).

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Action Editor

Vladimir Sloutsky

Editor

Patricia J. Bauer

Author Contributions

C. Girard and J. Prado conceived and designed the study. C. Girard programmed the experiment. C. Girard, T. Bastelica, J. Léone, J. Epinat-Duclos, and L. Longo performed the experiment. C. Girard analyzed the data under the supervision of J. Prado. C. Girard and J. Prado wrote and revised the manuscript. All authors read and approved the final manuscript for submission.

Acknowledgements

We thank Franck Lambertson and Danielle Ibarrola for their help with data collection. We are also grateful to all of the children and families who participated in the study.

Funding

This study was funded by the Agence Nationale de la Recherche (ANR-14-CE30-0002 and ANR-17-CE28-0014) to J.P.

Open Practices

The task, electronic version of the questionnaire (in French) and all behavioral data are publicly available via Zenodo at <http://doi.org/10.5281/zenodo.4965716>. The IPS mask and the whole-brain unthresholded p-maps corresponding for Fig. 5 and Fig. 6 are available via NeuroVault at <https://identifiers.org/neurovault.collection:9250>. The Matlab scripts used to analyze fMRI data are available via GitHub at <https://github.com/BBL-lab/BBL-batch-system>. The M3 toolbox is also available via GitHub at <https://github.com/canlab/MediationToolbox>. Finally, individual MRI data are available via Zenodo at <http://doi.org/10.5281/zenodo.4965716>.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

References

- Amalric, M., & Dehaene, S. (2016). Origins of the brain networks for advanced mathematics in expert mathematicians. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *113*(18), 4909-4917. <https://doi.org/10.1073/pnas.1603205113>
- Arsalidou, M., Pawliw-Levac, M., Sadeghi, M., & Pascual-Leone, J. (2018). Brain areas associated with numbers and calculations in children : Meta-analyses of fMRI studies. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *30*, 239-250. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.08.002>
- Bennett, C. M., & Miller, M. B. (2013). fMRI reliability : Influences of task and experimental design. *Cognitive, Affective & Behavioral Neuroscience*, *13*(4), 690-702. <https://doi.org/10.3758/s13415-013-0195-1>
- Bugden, S., Price, G. R., McLean, D. A., & Ansari, D. (2012). The role of the left intraparietal sulcus in the relationship between symbolic number processing and children's arithmetic competence. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *2*(4), 448-457. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2012.04.001>
- Chen, Q., & Li, J. (2014). Association between individual differences in non-symbolic number acuity and math performance : A meta-analysis. *Acta Psychologica*, *148*, 163-172. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2014.01.016>
- Church, J. A., Petersen, S. E., & Schlaggar, B. L. (2010). The "Task B problem" and other considerations in developmental functional neuroimaging. *Human Brain Mapping*, *31*(6), 852-862. <https://doi.org/10.1002/hbm.21036>
- Cognet, G. (2006). *NEMI-2 : Nouvelle Echelle Métrique de l'Intelligence-2*. ECPA.
- De Smedt, B., Noël, M.-P., Gilmore, C., & Ansari, D. (2013). How do symbolic and non-symbolic numerical magnitude processing skills relate to individual differences in children's mathematical skills? A review of evidence from brain and behavior. *Trends in Neuroscience and Education*, *2*(2), 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2013.06.001>
- Dehaene, S., & Cohen, L. (2007). Cultural Recycling of Cortical Maps. *Neuron*, *56*(2), 384-398. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.10.004>
- Demir, Ö. E., Prado, J., & Booth, J. R. (2015). Parental Socioeconomic Status and the Neural Basis of Arithmetic : Differential Relations to Verbal and Visuo-spatial Representations. *Developmental science*, *18*(5), 799-814. <https://doi.org/10.1111/desc.12268>
- Demir-Lira, Ö. E., Prado, J., & Booth, J. R. (2016). Neural Correlates of Math Gains Vary Depending on Parental Socioeconomic Status (SES). *Frontiers in Psychology*, *7*.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

- <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00892>
- 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., & Japel, C. (2007). School readiness and later achievement. *Developmental Psychology*, *43*(6), 1428-1446. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.43.6.1428>
- Dunst, C. J., Hamby, D. W., Wilkie, H., & Dunst, K. S. (2017). Meta-Analysis of the Relationship Between Home and Family Experiences and Young Children's Early Numeracy Learning. In S. Phillipson, A. Gervasoni, & P. Sullivan (Éds.), *Engaging Families as Children's First Mathematics Educators: International Perspectives* (p. 105-125). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2553-2_7
- Eickhoff, S. B., Stephan, K. E., Mohlberg, H., Grefkes, C., Fink, G. R., Amunts, K., & Zilles, K. (2005). A new SPM toolbox for combining probabilistic cytoarchitectonic maps and functional imaging data. *NeuroImage*, *25*(4), 1325-1335. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.12.034>
- Eklund, A., Nichols, T. E., & Knutsson, H. (2016). Cluster failure: Why fMRI inferences for spatial extent have inflated false-positive rates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *113*(28), 7900-7905. <https://doi.org/10.1073/pnas.1602413113>
- 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>
- Farah, M. J. (2017). The Neuroscience of Socioeconomic Status: Correlates, Causes, and Consequences. *Neuron*, *96*(1), 56-71. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.08.034>
- Fiedler, K., Harris, C., & Schott, M. (2018). Unwarranted inferences from statistical mediation tests – An analysis of articles published in 2015. *Journal of Experimental Social Psychology*, *75*, 95-102. <https://doi.org/10.1016/j.jesp.2017.11.008>
- Gibson, D. J., Gunderson, E. A., & Levine, S. C. (2020). Causal Effects of Parent Number Talk on Preschoolers' Number Knowledge. *Child Development*, *91*(6), e1162-e1177. <https://doi.org/10.1111/cdev.13423>
- Grill-Spector, K., & Malach, R. (2001). fMR-adaptation: A tool for studying the functional properties of human cortical neurons. *Acta Psychologica*, *107*(1-3), 293-321. [https://doi.org/10.1016/s0001-6918\(01\)00019-1](https://doi.org/10.1016/s0001-6918(01)00019-1).
- Hart, S. A., Little, C., & van Bergen, E. (2021). Nurture might be nature: Cautionary tales and proposed solutions. *Npj Science of Learning*, *6*(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41539-020-00079-z>
- Hayes, A. F. (2018). *More than one mediator In Introduction to Mediation, Moderation, and Conditional Process Analysis: A Regression-Based Approach*, (2nd edition). Guilford Press: New York, NY, USA.
- LeFevre, J. A., Skwarchuk, S.-L., Smith-Chant, B., 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*, 55-66.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

- <https://doi.org/10.1037/a0014532>
- Luna, B., Velanova, K., & Geier, C. F. (2010). Methodological approaches in developmental neuroimaging studies. *Human Brain Mapping, 31*(6), 863-871. <https://doi.org/10.1002/hbm.21073>
- Marek, S., Tervo-Clemmens, B., Calabro, F. J., Montez, D. F., Kay, B. P., Hatoum, A. S., Donohue, M. R., Foran, W., Miller, R. L., Feczko, E., Miranda-Dominguez, O., Graham, A. M., Earl, E. A., Perrone, A. J., Cordova, M., Doyle, O., Moore, L. A., Conan, G., Uriarte, J., ... Dosenbach, N. U. F. (2020). Towards Reproducible Brain-Wide Association Studies. *BioRxiv*, 2020.08.21.257758. <https://doi.org/10.1101/2020.08.21.257758>
- Merz, E. C., Maskus, E. A., Melvin, S. A., He, X., & Noble, K. G. (2020). Socioeconomic Disparities in Language Input Are Associated With Children's Language-Related Brain Structure and Reading Skills. *Child Development, 91*(3), 846-860. <https://doi.org/10.1111/cdev.13239>
- Merz, E. C., Wiltshire, C. A., & Noble, K. G. (2019). Socioeconomic Inequality and the Developing Brain : Spotlight on Language and Executive Function. *Child Development Perspectives, 13*(1), 15-20. <https://doi.org/10.1111/cdep.12305>
- Mutaf-Yildiz, B., Sasanguie, D., De Smedt, B., & Reynvoet, B. (2020). Probing the Relationship Between Home Numeracy and Children's Mathematical Skills : A Systematic Review. *Frontiers in Psychology, 11*, 2074. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.02074>
- Nee, D. E. (2019). fMRI replicability depends upon sufficient individual-level data. *Communications Biology, 2*(1), 1-4. <https://doi.org/10.1038/s42003-019-0378-6>
- Nieder, A. (2016). The neuronal code for number. *Nature Reviews Neuroscience, 17*(6), 366-382. <https://doi.org/10.1038/nrn.2016.40>
- Peirce, J., Gray, J. R., Simpson, S., MacAskill, M., Höchenberger, R., Sogo, H., Kastman, E., & Lindeløv, J. K. (2019). PsychoPy2 : Experiments in behavior made easy. *Behavior Research Methods, 51*(1), 195-203. <https://doi.org/10.3758/s13428-018-01193-y>
- Perrachione, T. K., Del Tufo, S. N., Winter, R., Murtagh, J., Cyr, A., Chang, P., Halverson, K., Ghosh, S. S., Christodoulou, J. A., & Gabrieli, J. D. E. (2016). Dysfunction of Rapid Neural Adaptation in Dyslexia. *Neuron, 92*(6), 1383-1397. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.11.020>
- Price, G. R., Mazzocco, M. M. M., & Ansari, D. (2013). Why mental arithmetic counts : Brain activation during single digit arithmetic predicts high school math scores. *The Journal of Neuroscience: The Official Journal of the Society for Neuroscience, 33*(1), 156-163. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.2936-12.2013>
- Raschle, N., Zuk, J., Ortiz-Mantilla, S., Sliva, D. D., Franceschi, A., Grant, P. E., Benasich, A. A., & Gaab, N. (2012). Pediatric neuroimaging in early childhood and infancy : Challenges and practical guidelines. *Annals of the New York Academy of Sciences, 1252*, 43-50. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2012.06457.x>
- Robin, M. (2019). Davantage de personnes vivent dans un ménage médian dans les régions de l'Ouest.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Insee Focus, 148.

- Romeo, R. R., Leonard, J. A., Robinson, S. T., West, M. R., Mackey, A. P., Rowe, M. L., & Gabrieli, J. D. E. (2018). Beyond the 30-Million-Word Gap : Children’s Conversational Exposure Is Associated With Language-Related Brain Function. *Psychological Science*, 29(5), 700-710. <https://doi.org/10.1177/0956797617742725>
- Schwartz, F., Epinat-Duclos, J., Léone, J., Poisson, A., & Prado, J. (2018). Impaired neural processing of transitive relations in children with math learning difficulty. *NeuroImage: Clinical*, 20, 1255-1265. <https://doi.org/10.1016/j.nicl.2018.10.020>
- Shrout, P. E., & Bolger, N. (2002). Mediation in experimental and nonexperimental studies : New procedures and recommendations. *Psychological Methods*, 7(4), 422-445. <https://doi.org/10.1037/1082-989X.7.4.422>
- Sokolowski, H. M., & Ansari, D. (2018). Understanding the effects of education through the lens of biology. *Npj Science of Learning*, 3(1), 1-10. <https://doi.org/10.1038/s41539-018-0032-y>
- Tamis-LeMonda, C. S., Luo, R., McFadden, K. E., Bandel, E. T., & Valloton, C. (2019). Early home learning environment predicts children’s 5th grade academic skills. *Applied Developmental Science*, 23(2), 153-169. <https://doi.org/10.1080/10888691.2017.1345634>
- Wager, T. D., Davidson, M. L., Hughes, B. L., Lindquist, M. A., & Ochsner, K. N. (2008). Prefrontal-subcortical pathways mediating successful emotion regulation. *Neuron*, 59(6), 1037-1050. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2008.09.006>
- Wilkey, E. D., & Ansari, D. (2020). Challenging the neurobiological link between number sense and symbolic numerical abilities. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1464(1), 76-98. <https://doi.org/10.1111/nyas.14225>
- Woodcock, T. A., McGrew, K. S., & Mather, N. (2001). *Woodcock-Johnson III Tests of achievement*. Itasca, IL : Riverside Publishing.
- Zamarian, L., Ischebeck, A., & Delazer, M. (2009). Neuroscience of learning arithmetic—Evidence from brain imaging studies. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 33(6), 909-925. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.03.005>

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

Figure Captions

Figure 1. Model and experimental design. (a) Hypothesized model of the relations between SES, home numeracy practices, brain activity and mathematical skills (adapted from a model of the relations between SES, home literacy practices, brain activity and reading skills; Merz et al., 2020). (b) Experimental task. Participants were sequentially presented with digits (top) or words (bottom) that were identical (adaptation blocks) or different (no-adaptation blocks).

Figure 2. Divergent stacked bar chart showing the frequencies of informal practices among parents (n=66). Percentages on the right indicate the share of parents who engage in each practice at least once a week. Practices are ordered from the most (top) to the least frequent (bottom).

Figure 3. Divergent stacked bar chart showing the frequencies of basic formal and advanced formal practices among parents (n=66). Percentages on the right indicate the share of parents who engage in each practice at least once a week. Practices are ordered from the most (top) to the least frequent (bottom) for each level of complexity.

Figure 4. Relations between SES, home numeracy practices and children's mathematical skills (n=66). (a) Scatterplots of parental education as a function of informal numeracy practices, basic formal numeracy practices (adjusted for advanced formal numeracy practices), and advanced formal numeracy practices (adjusted for basic formal numeracy practices). Correlations are also adjusted for parental income. (b) Scatterplots of child arithmetic fluency as a function of informal numeracy practices, basic formal numeracy practices (adjusted for advanced formal numeracy practices), and advanced formal numeracy practices (adjusted for basic formal numeracy practices). Correlations are also adjusted for parental education. All variables are mean-centered.

Figure 5. MEPM analysis of the digit adaptation task (n=50). (a) Lateral views of the left hemisphere showing voxels in which digit adaptation increased with advanced formal numeracy practices (Path a, left) and child arithmetic fluency (adjusted for advanced formal numeracy practices, Path b, right). (b) Mediation diagram showing voxels in which digit adaptation explained the relation between advanced formal numeracy practices and child arithmetic fluency (Path a*b). (c) Scatterplot of child arithmetic fluency as a function of advanced formal numeracy practices (adjusted for basic formal numeracy practices) in the fMRI sample (total effect or Path c, left) and scatterplot of child arithmetic fluency as

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

a function of advanced formal numeracy practices (adjusted for basic formal numeracy practices) when digit adaptation in the left IPS was included in the model (direct effect or Path c' , right). All variables are mean-centered and all analyses were adjusted for parental education and basic formal numeracy practices.

Figure 6. Unthresholded maps of p values showing the relations between digit and word adaptation, home numeracy practices and child arithmetic fluency identified in the MEPM analyses across the whole brain ($n=50$ for digit adaptation, $n=44$ for word adaptation). (a) Lateral views of the left and right hemispheres showing voxels in which neural adaptation to digits (left) and words (right) increased with advanced formal numeracy practices (Path a). (b) Lateral views of the left and right hemispheres showing voxels in which digit adaptation (left) and word adaptation (right) increased with child arithmetic fluency (adjusting for advanced formal numeracy practices; Path b). All analyses were adjusted for parental education.

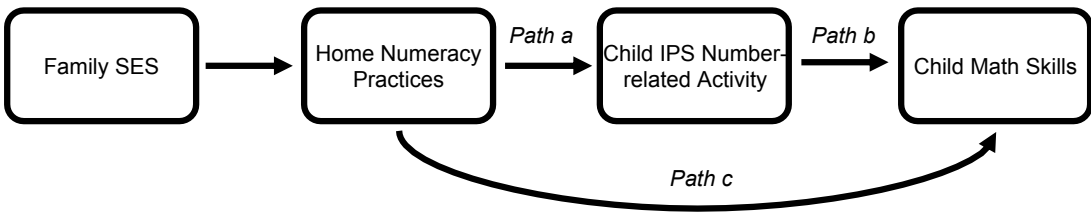
Table 1. Demographic information and test scores of children and parents.

Measure	Behavioral sample (n=66)		fMRI sample (n=50)	
	Children	Parents	Children	Parents
Age (years) ¹	8.46 (0.36)	39.53 (4.95)	8.48 (0.35)	39.74 (4.80)
Sex (female)	30%	89%	30%	86%
Child grade (2 nd grade) ²	30%	-	26%	-
Parental education ³	-	3.05 (2.36)	-	3.10 (2.57)
Approximate monthly income (euros) ⁴	-	1,727 (1,078)	-	1,680 (1,101)
Arithmetic fluency (raw score)	40 (12)	122 (22)	41 (12)	122 (23)
Arithmetic fluency (standard score)	104 (24)	102 (9)	107 (24)	102 (10)
IQ composite (standard score)	112 (11)	-	112 (12)	-

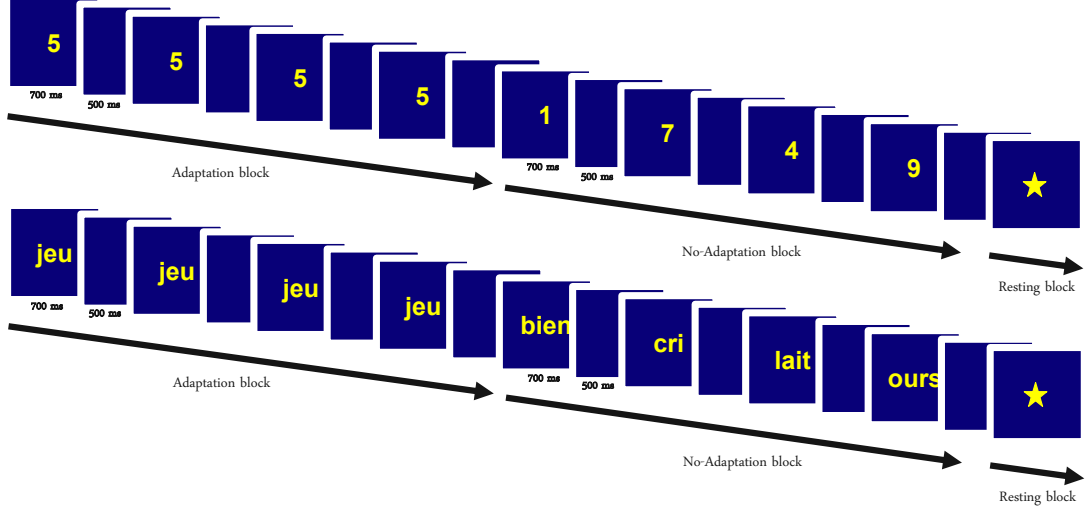
Notes. All values except sex and child grade represent mean (SD). ¹, All children were 8 years of age, except for one who was younger (7.51) and 3 who were slightly older (9.06 to 9.22) at the time of testing ², Children were either in 2nd or 3rd grade. ³, See main text for explanation about how parental education was calculated. ⁴, As a reference, the median monthly income in France is about €1,700 (Robin, 2019).

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60

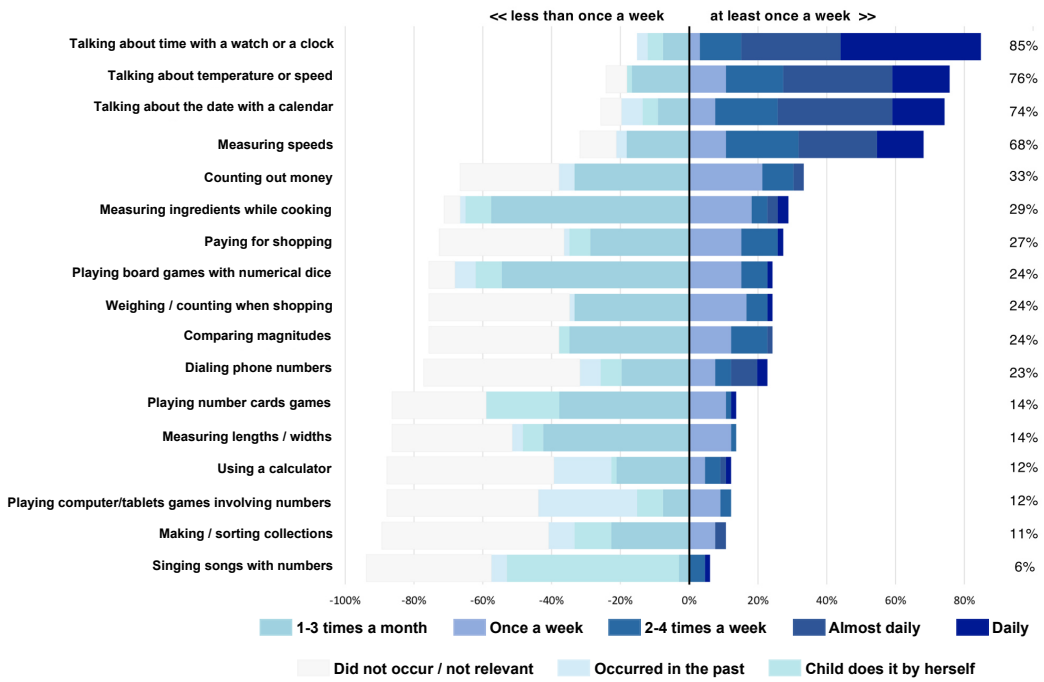
a

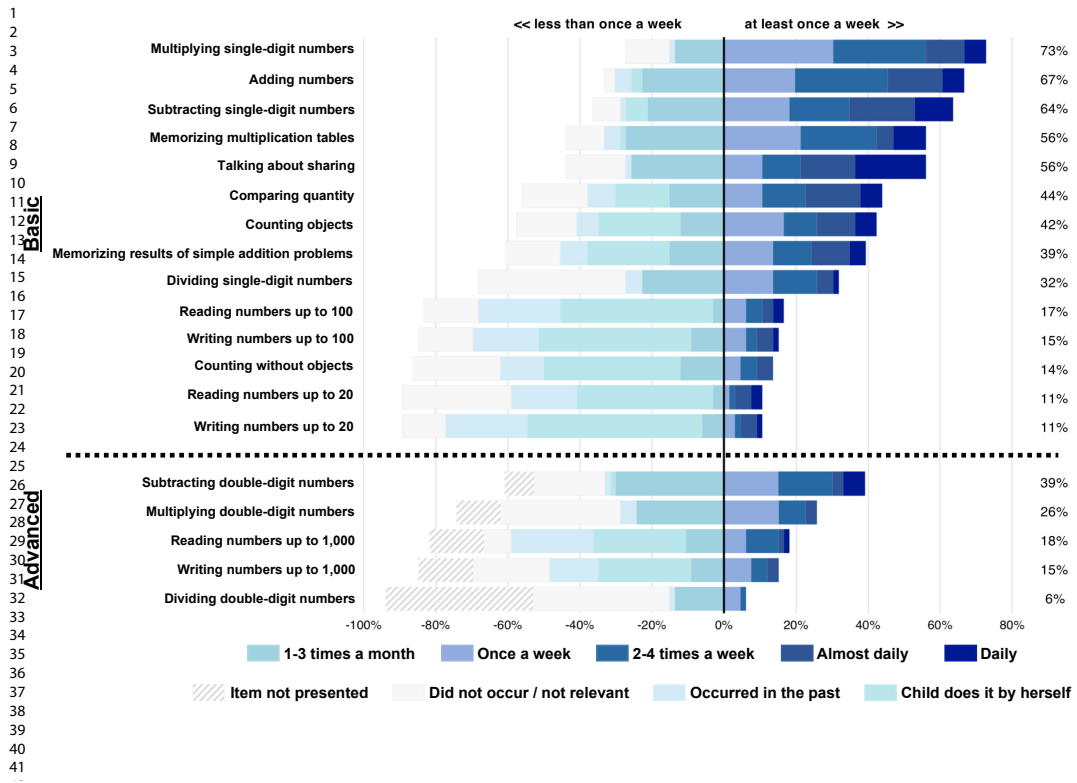


b

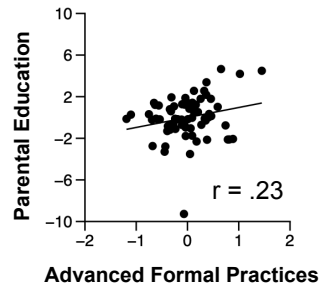
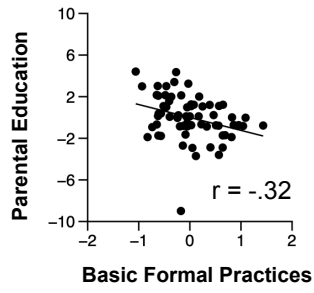
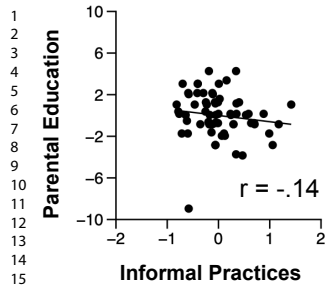


1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41

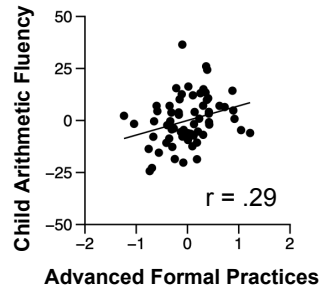
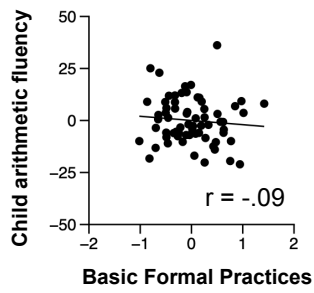
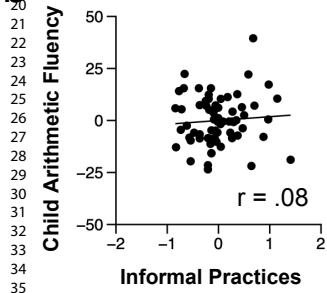




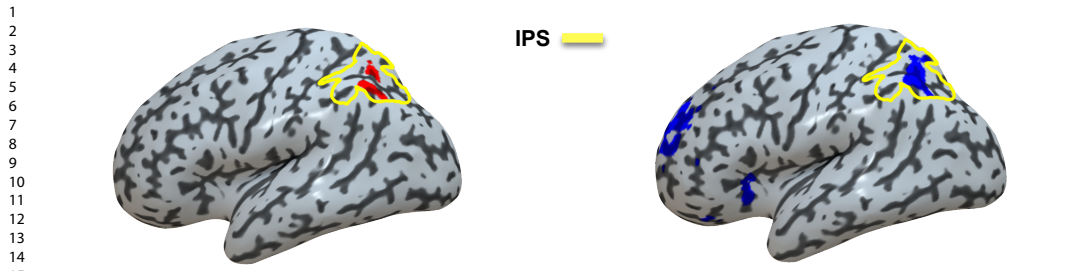
a



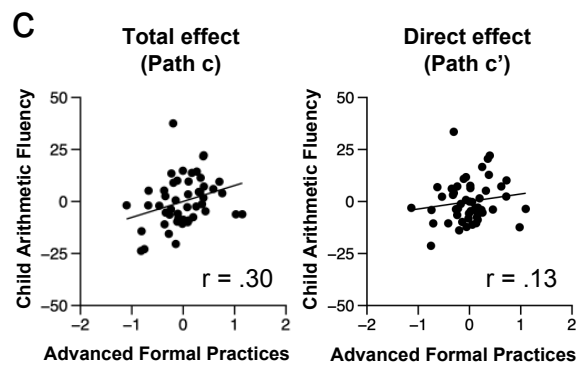
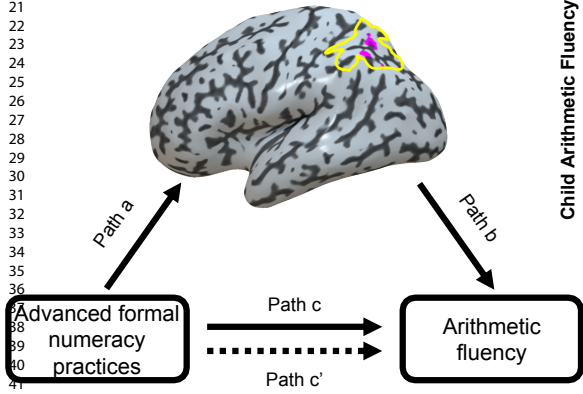
b



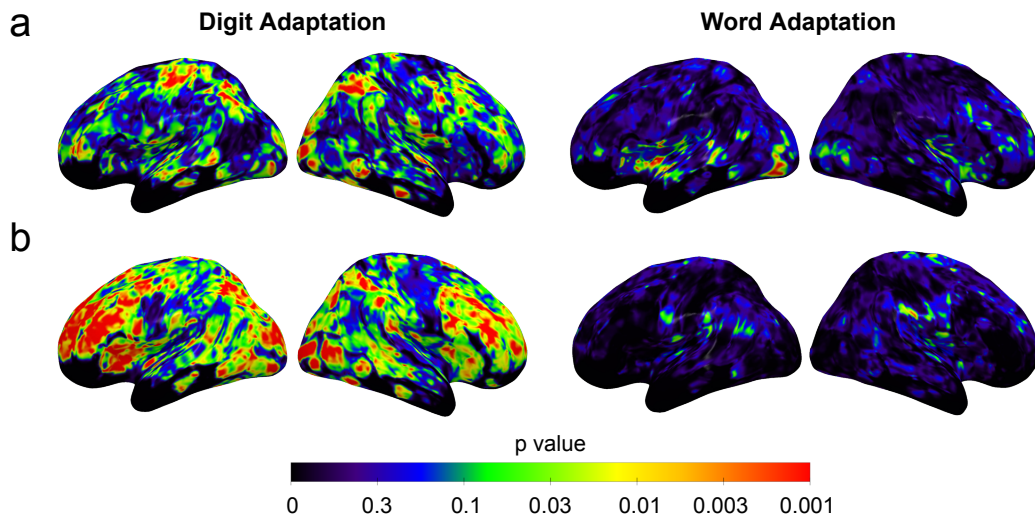
a Increases in digit adaptation with more frequent advanced formal numeracy practices (Path a) Increases in digit adaptation with higher levels of child arithmetic fluency (Path b)



b Increases in digit adaptation mediating the relation between advanced formal numeracy practices and arithmetic fluency (Path a*b)



1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41



Supplementary information

Justification of sample size

To our knowledge, no prior study has investigated the relation between home numeracy practices and the neural bases of number processing. Thus, specific estimates of effect sizes for this relation are unknown. Nonetheless, an examination of prior developmental studies investigating relations between (1) home literacy practices and language-related brain activity, (2) home numeracy practices and math skills, and (3) number-related brain activity and math skills may provide useful estimates of the power that our final fMRI sample size ($n=50$) may provide for detecting targeted brain-behavior correlations.

First, investigating the relation between home literacy practices and language-related brain activity in young children, Powers et al. (2016) ($n=50$) and Romeo et al. (2018) ($n=36$) found effect sizes ranging from $r=.40$ and $r=.58$ (see Table 5 in Powers et al., 2016; and openly available dataset in Romeo et al., 2018). Second, a meta-analysis of behavioral studies investigating the relation between home numeracy practices and children's math skills estimated the size of that correlation to be around $r = .46$ (see Table 7.4 in Dunst, Hamby, Wilkie, & Dunst, 2017). Third, cross-sectional neuroimaging studies have found correlations between arithmetic fluency and brain activity to range between $r=.30$ (e.g., see Table 2 in Cho et al., 2012) and $r=.58$ (see Fig. 3 in Bugden, Price, McLean, & Ansari, 2012). Considering all of these estimates, power analyses using G* Power version 3.1 (Faul, Erdfelder, Lang, & Buchner, 2007) indicate that our final fMRI sample size of $n=50$ would provide between 71% and more than 99% power to detect correlations between home numeracy practices and number-related activity in the expected direction ($\alpha=.05$, one-tailed).

Interestingly, Romeo also reported a mediation analysis involving language-related brain activity, conversational turns and literacy skills (Romeo et al., 2018). Given the focus of the present study on an analogous mediation involving number-related brain activity, home numeracy practices and math skills (see **Fig. 1a**), we used Romeo et al.'s exact mediation parameters to estimate the power of a similar mediation analysis given our final fMRI sample size. Monte Carlo simulations implemented in the online tool developed by Schoemann, Boulton, & Short (2017)

(https://schoemanna.shinyapps.io/mc_power_med/) indicated a power of 90% to detect an influence of the mediator (i.e., brain activity) on the relation between the predictor (i.e., home numeracy practices) and the outcome (i.e., arithmetic fluency) based on Romeo et al.'s estimates (1,000 iterations, 95% Confidence level).

Overall, then, an examination of the previous literature suggests that our final fMRI sample appears to be adequately powered to investigate brain-behavior relations between home numeracy practices, number-related activity, and arithmetic fluency. It is also worth noting that, using a task similar to the present task (a block-design word adaptation task), Perrachione et al. (2016) found correlations between adaptation effect and language skills ranging from $r=.46$ to $r=.50$ in children with dyslexia ($n=26$; age 6-9 years). Again, these effects sizes are in line with the estimates above and are therefore what could be expected in the present study as well. Sensitivity curves across a range of effect sizes for the sample sizes used in analyses of the digit and word adaptation tasks are shown in **Fig. S1**.

fMRI Data Acquisition

Images were collected with a Siemens Prisma 3T MRI scanner (Siemens Healthcare, Erlangen, Germany) at the CERMEP Imagerie du vivant in Lyon, France. The BOLD signal was measured with a susceptibility weighted single-shot EPI sequence. Imaging parameters were as follows: TR = 2000 ms, TE = 24 ms, flip angle = 80° , matrix size = 128×120 , field of view = 220×206 mm, slice thickness = 3 mm (0.48 mm gap), number of slices = 32. A high-resolution T1-weighted whole-brain anatomical volume was also collected for each participant. Parameters were as follows: TR = 3500 ms, TE = 2.24 ms, flip angle = 8° , matrix size = 256×256 , field of view = 224×224 mm, slice thickness = 0.9 mm, number of slices = 192.

Relation between SES, home numeracy practices, and digit-related brain regions

Recent studies suggest that the home literacy environment may mediate the relation between SES and language-related brain regions (Merz et al., 2020). Thus, it is possible that the home numeracy environment may also explain (to some extent) the relation between SES and digit-related

brain regions. To test this hypothesis, we assessed whether SES measures were related to digit adaptation in the IPS (measured in the left IPS cluster showing a correlation with child arithmetic fluency). Digit adaptation in the IPS increased with parental education (adjusting for parental income, partial $r = .35$, 95% CI Lower = .12, $p = .006$; **Fig. S2c**, left). Because we found that advanced formal numeracy practices also increased with parental education, we then asked whether the frequency of advanced formal numeracy practices may explain some of the relation between education and digit adaptation in the IPS. The extent to which the relation between parental education and digit adaptation was reduced by introducing advanced formal numeracy practices in the model (difference between Path c and Path c', or Path a*b) was tested using bias-corrected bootstrapping (1,000 iterations) implemented in the M3 toolbox, with a one-sided 95% confidence interval. This indirect path a*b was significant ($\beta = 0.015$, 95% CI Lower = .0001, $p = .047$; **Fig. S2c**, right), suggesting that numeracy practices might explain at least some of the relation between SES and number-related activity in the IPS (partially standardized effect size of the indirect effect = .04).

Numerosity adaptation task

In addition to the main word and digit adaptation tasks, participants were presented with a numerosity adaptation task including adaptation and no-adaptation blocks of dot arrays. Adaptation blocks consisted in the repetition of the same number of dots while no-adaptation blocks consisted in the presentation of different number of dots in the non-symbolic adaptation task (**Fig. S4a**). Arrays of dots comprised from 6 to 60 dots (up to $4.78^\circ \times 4.78^\circ$ of visual angle). They were created using the procedure described in Gebuis and Reynvoet (Gebuis & Reynvoet, 2011). That is, arrays systematically varied in terms of convex hull (i.e., smallest contour around the array of dots), aggregate surface of the dots, density (i.e., aggregate surface divided by the convex hull), average diameter, and contour length (Gebuis & Reynvoet, 2011). In no-adaptation blocks of the non-symbolic task, the number of dots in an array could differ from the previous array by a ratio from 1:2 to 1:8. Experimental timeline was identical to the digit and word adaptation task.

Supplementary Table

Table S1. Location of activated clusters in supplemental analyses

Anatomical location	MNI coordinates			Cluster size (cc)	-log ₁₀ (max p-value)	Effect size
	X	Y	Z			
<i>Effect of word adaptation across all participants</i>						
L. Middle Occipital/ Inferior Temporal Gyrus	-22	-98	-5	9.7	6.78	d=0.82
L. Inferior Frontal Gyrus	-36	32	-8	1.9	4.81	d=0.65
<i>Effect of digit adaptation across all participants</i>						
R. Middle Occipital Gyrus	32	-94	-5	2.3	5.23	d=0.62
R. Middle Occipital Gyrus	32	38	3	3.3	5.57	d=0.49
R. Superior Frontal Gyrus	16	44	45	2.2	4.60	d=0.53
L. Medial Frontal Gyrus	-16	30	34	4.5	4.57	d=0.54
<i>Increases of numerosity adaptation with basic formal numeracy practices</i>						
L. Middle Frontal Gyrus	-30	-2	44	1.8	4.10	r=.51
L. Superior Frontal Gyrus	-48	30	34	2.1	4.94	r=.39
R. Superior Parietal Lobule	24	-82	48	1.7	5.91	r=.40
L. Precuneus	-14	-80	51	1.6	5.24	r=.49
L. IPS	-30	-56	37	2.1	3.90	r=.43
<i>Increases of numerosity adaptation with arithmetic fluency (controlled for basic formal practices)</i>						
R. IPS	54	-38	58	0.4	4.07	r=.39

Notes. MNI: Montreal Neurological Institute; L. Left; R. Right; all clusters are significant at $p < .05$, FWE corrected for multiple comparisons across the whole brain or after small volume correction over an anatomical mask of the IPS (see main text). Effect sizes are calculated based on the average of activity in all voxels within a 6mm radius of the peak.

Supplementary Figures

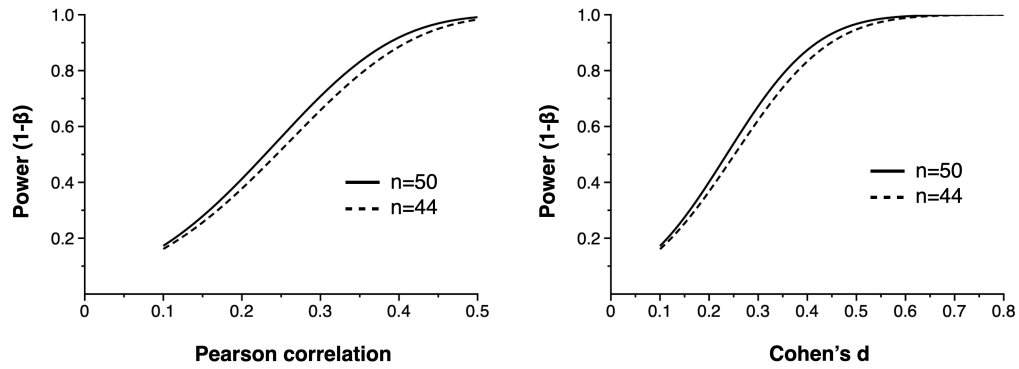


Figure S1. Sensitivity curves. Plots of power as a function of effect size (Pearson correlation and Cohen's d) for sample sizes in the digit (n=50) and word (n=44) adaptation task (alpha=.05).

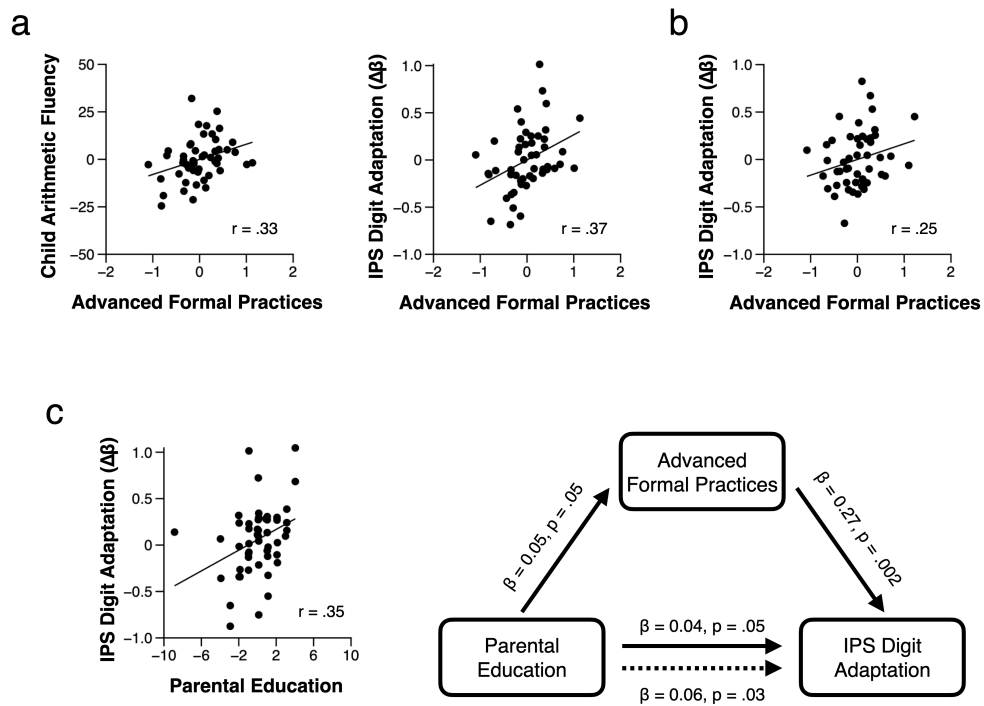


Figure S2. Supplemental plots. (a) Scatterplot of child arithmetic fluency as a function of advanced formal numeracy practices, adjusting for parental education, basic formal numeracy practices, and estimated child math skills (left) as well as scatterplot of neural adaptation to digits in the left IPS as a function of advanced formal numeracy practices, adjusting for parental education, basic formal numeracy practices, and estimated child math skills. (b) Scatterplot of neural adaptation to digits in the left IPS as a function of advanced formal numeracy practices, adjusting for parental education, basic formal numeracy practices, and measured child arithmetic fluency. (c) Scatterplot of neural adaptation to digits in the left IPS as a function of parental education (left). The relation between parental education and digit adaptation in the IPS was influenced by advanced formal numeracy practices (right). The solid line from parental education to digit adaptation in the IPS represents the total effect (Path c). The dotted line represents the direct effect (Path c'). Analyses were adjusted for parental income and basic formal numeracy practices.

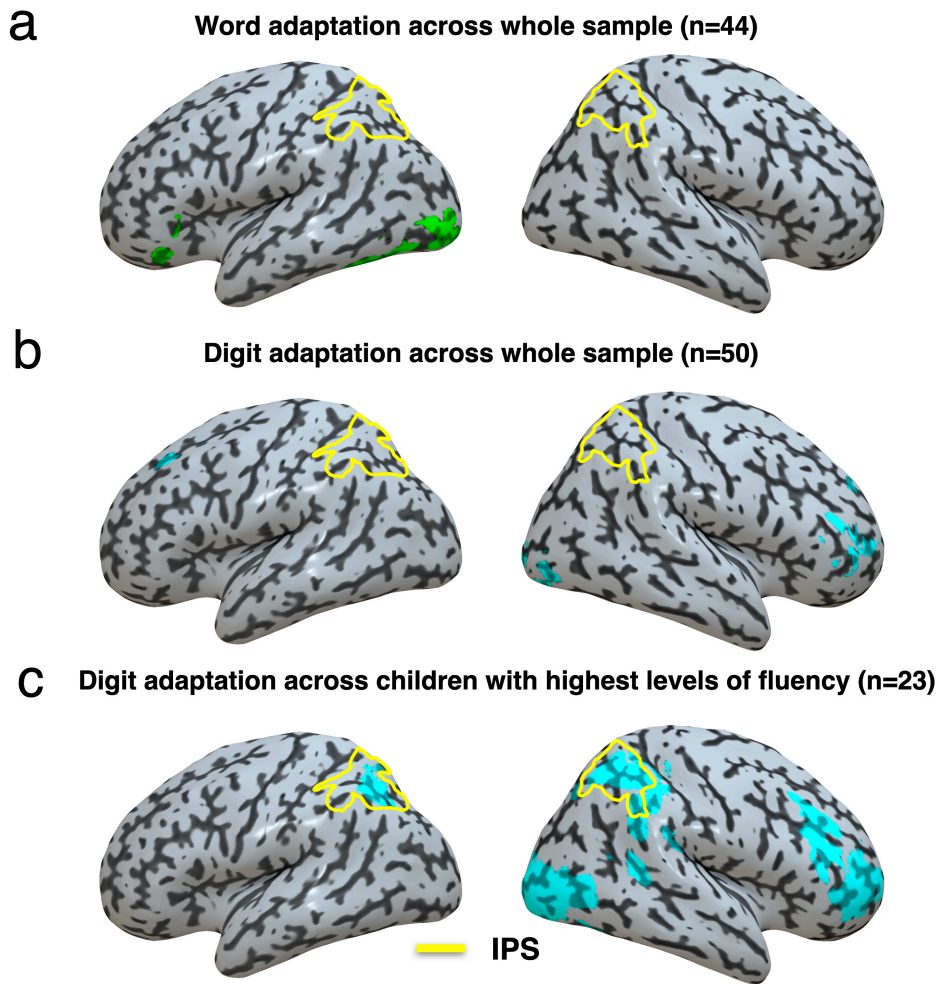


Figure S3. Lateral views of the left and right hemispheres showing voxels in which there was a significant effect of digit adaptation and word adaptation, averaging across participants. (a) Effect of word adaptation across all participants. (b) Effect of digit adaptation across all participants. (c) Effect of digit adaptation across participants with the highest levels of arithmetic fluency (after median split of the whole sample).

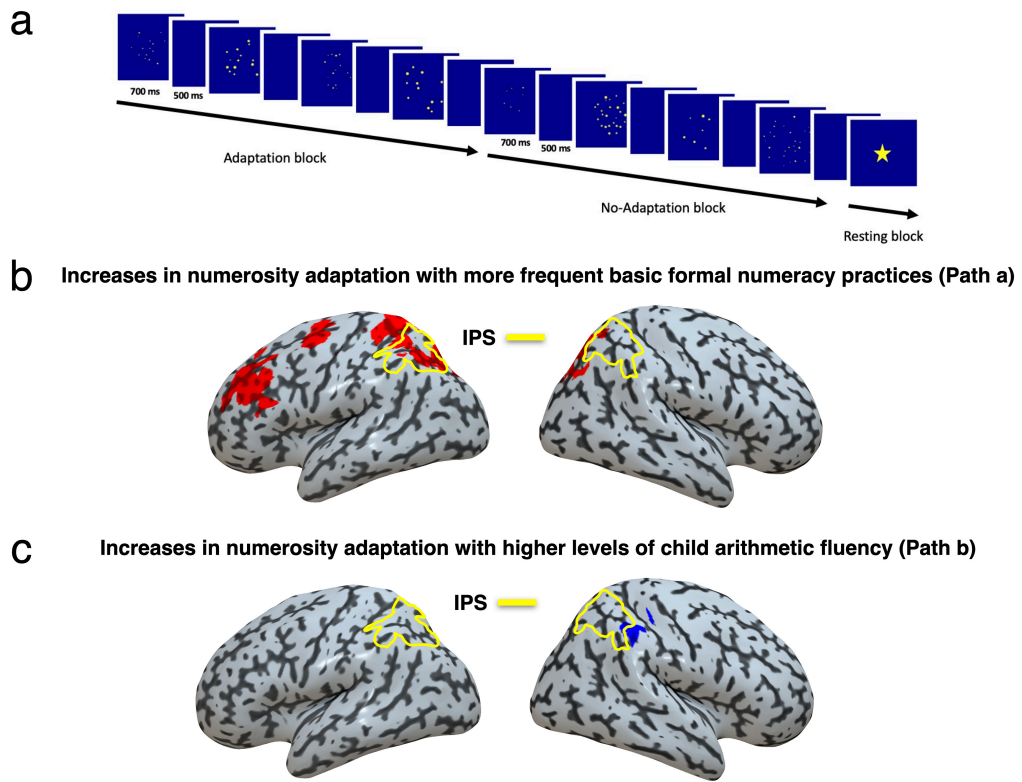


Figure S4. Numerosity adaptation task. (a) Experimental task. (b) Lateral views of the left and right hemispheres showing voxels in which numerosity adaptation increased with the frequency of basic formal numeracy practices. (c) Lateral views of the left and right hemispheres showing voxels in which numerosity adaptation increased with levels of arithmetic fluency.

Supplementary References

- Bugden, S., Price, G. R., McLean, D. A., & Ansari, D. (2012). The role of the left intraparietal sulcus in the relationship between symbolic number processing and children's arithmetic competence. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2(4), 448-457.
<https://doi.org/10.1016/j.dcn.2012.04.001>
- Cho, S., Metcalfe, A. W. S., Young, C. B., Ryali, S., Geary, D. C., & Menon, V. (2012). Hippocampal-prefrontal engagement and dynamic causal interactions in the maturation of children's fact retrieval. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 24(9), 1849-1866.
https://doi.org/10.1162/jocn_a_00246
- Dunst, C. J., Hamby, D. W., Wilkie, H., & Dunst, K. S. (2017). Meta-Analysis of the Relationship Between Home and Family Experiences and Young Children's Early Numeracy Learning. In S. Phillipson, A. Gervasoni, & P. Sullivan (Éds.), *Engaging Families as Children's First Mathematics Educators : International Perspectives* (p. 105-125). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2553-2_7
- Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G., & Buchner, A. (2007). G* Power 3 : A flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behavior research methods*, 39(2), 175-191.
- Gebuis, T., & Reynvoet, B. (2011). Generating nonsymbolic number stimuli. *Behavior Research Methods*, 43(4), 981-986. <https://doi.org/10.3758/s13428-011-0097-5>
- Merz, E. C., Maskus, E. A., Melvin, S. A., He, X., & Noble, K. G. (2020). Socioeconomic Disparities in Language Input Are Associated With Children's Language-Related Brain Structure and Reading Skills. *Child Development*, 91(3), 846-860.
<https://doi.org/10.1111/cdev.13239>
- Perrachione, T. K., Del Tufo, S. N., Winter, R., Murtagh, J., Cyr, A., Chang, P., ... Gabrieli, J. D. E. (2016). Dysfunction of Rapid Neural Adaptation in Dyslexia. *Neuron*, 92(6), 1383-1397.
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.11.020>
- Powers, S. J., Wang, Y., Beach, S. D., Sideridis, G. D., & Gaab, N. (2016). Examining the

relationship between home literacy environment and neural correlates of phonological processing in beginning readers with and without a familial risk for dyslexia : An fMRI study. *Annals of Dyslexia*, 66(3), 337-360. <https://doi.org/10.1007/s11881-016-0134-2>

Romeo, R. R., Leonard, J. A., Robinson, S. T., West, M. R., Mackey, A. P., Rowe, M. L., & Gabrieli, J. D. E. (2018). Beyond the 30-Million-Word Gap : Children's Conversational Exposure Is Associated With Language-Related Brain Function. *Psychological Science*, 29(5), 700-710. <https://doi.org/10.1177/0956797617742725>

Schoemann, A. M., Boulton, A. J., & Short, S. D. (2017). Determining Power and Sample Size for Simple and Complex Mediation Models. *Social Psychological and Personality Science*, 8(4), 379-386. <https://doi.org/10.1177/1948550617715068>

DISCUSSION GÉNÉRALE

Les travaux présentés dans la partie expérimentale ont permis de contribuer au champ de recherche sur l'environnement familial de numératie et ses relations avec les compétences neurocognitives des enfants scolarisés en école élémentaire. Dans la dernière partie de ce manuscrit, nous commencerons par rappeler et discuter les principaux objectifs et résultats des deux études présentées. Dans une deuxième section, nous discuterons des nombreuses mesures contrôles réalisées pour différents types de facteurs potentiellement confondants et des enseignements que nous pouvons tirer de ces mesures. Dans une troisième section, nous proposerons un modèle neurocognitif des relations entre environnement familial de numératie et cognition numérique chez l'enfant. Enfin, nous terminerons en discutant des apports de ce modèle en le replaçant dans un contexte plus large et proposerons des perspectives qui peuvent être tirées de l'ensemble des résultats discutés.

1. Rappel des objectifs et discussion des résultats principaux

Un nombre croissant d'études récentes suggère l'existence de relations entre différentes caractéristiques de l'environnement familial de numératie et les habiletés numériques chez l'enfant, majoritairement d'âge préscolaire ou à l'entrée en école élémentaire (Daucourt et al., 2021; Dunst et al., 2017; L. Elliott & Bachman, 2018a; Mutaf-Yıldız et al., 2020). Néanmoins ces études présentent une très grande hétérogénéité du fait de la grande diversité des mesures employées pour caractériser l'environnement familial ou les compétences numériques chez l'enfant. Un premier objectif de cette thèse était de répliquer cette relation au niveau comportemental (Chapitre 5) en cherchant à évaluer de manière exhaustive à la fois les caractéristiques de l'environnement familial d'apprentissage ainsi que les composantes des habiletés numériques chez l'enfant. Un deuxième objectif était d'identifier les médiateurs neurocognitifs de cette relation, et tout particulièrement d'évaluer si ces médiateurs étaient spécifiques au domaine de la cognition numérique ou plus généraux (Chapitre 6).

1.1. Apports principaux des résultats comportementaux

La première hypothèse concernant le versant comportemental de notre étude, exposée dans le chapitre 5, était de répliquer la relation entre activités familiales de numératie et compétences numériques chez l'enfant, notamment selon la distinction suggérée par Skwarchuk et collaborateurs (2014). Autrement dit, nous avons prévu de répliquer une association, d'une part, entre fréquences des pratiques familiales informelles de numératie et compétences non symboliques des enfants et, d'autre part, entre fréquences des pratiques formelles et complexes de numératie et compétences symboliques des enfants.

Tout d'abord, les données que nous avons obtenues ont permis de faire émerger une importante variabilité interfamiliale des fréquences rapportées pour chacun des types d'activités de numératie (pour les activités « informelles », voir **Figure 46.A**, mais aussi pour les activités formelles basiques et complexes, voir **Figure 46.B**).

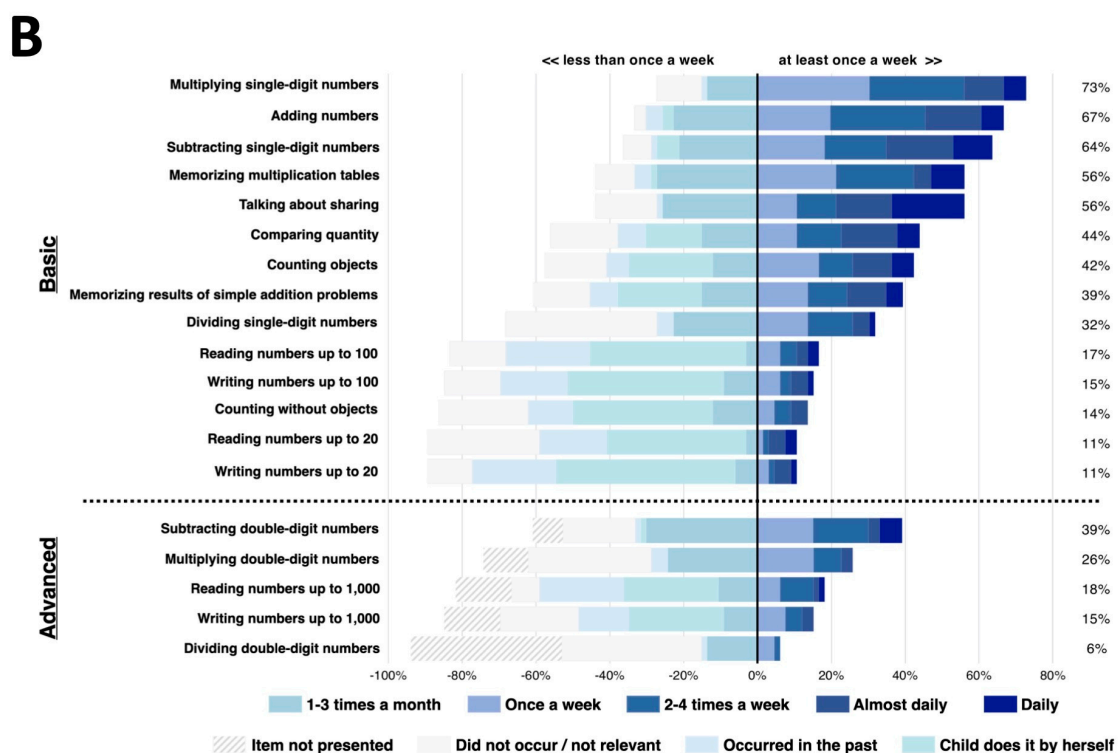
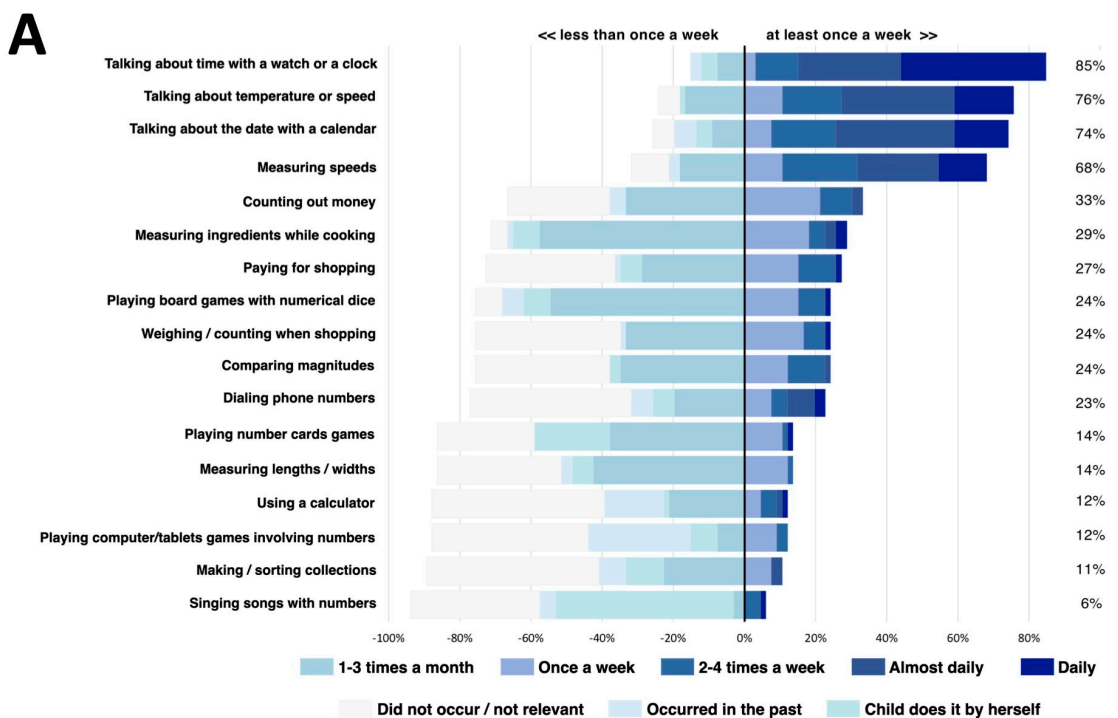


Figure 46 : Diagramme à barres (tirée du Chapitre 6 ; Girard et al., *in press*) présentant les fréquences rapportées par les parents pour chacune des activités familiales de numératie **A.** informelles et **B.** formelles (de niveau basique ou avancé). La partie droite des figures correspond aux fréquences survenant au moins une fois par semaine ; la partie gauche correspond aux fréquences survenant moins d'une fois par semaine. Les items présentés pour chaque type d'activités sont rangés de façon décroissante selon les fréquences rapportées par l'ensemble des familles (des plus fréquentes en haut, aux moins fréquentes en bas). $N=66$

1.1.1. Relation entre compétences arithmétiques des enfants et fréquences des activités formelles et complexes de numératie en famille

Malgré cette variabilité des fréquences rapportées pour chacun des types d'activités familiales de numératie, nos prédictions n'ont été que partiellement confirmées. Aucun lien n'a été trouvé entre la fréquence des activités informelles des parents et les habiletés numériques des enfants (**Figure 47.A**). Nous avons néanmoins montré une relation entre fréquence d'activités formelles de numératie et habiletés numériques des enfants. Ce lien ne concernait que les habiletés numériques les plus complexes parmi celles évaluées (c.-à-d. les performances en arithmétique, chronométrées et non chronométrées) et dépendait de la complexité des activités familiales de numératie réalisées (c.-à-d. seulement les activités formelles « avancées »). En d'autres termes, plus les parents rapportaient réaliser fréquemment des activités numériques formelles complexes (représentées en bas de la **Figure 46.B**), plus leurs enfants présentaient de bonnes performances arithmétiques (voir **Figure 47.C**). Ces résultats étaient en accord avec ceux de l'ensemble des précédentes études à avoir dissocié les activités formelles de numératie selon leur degré de complexité (Río et al., 2017; Skwarchuk et al., 2014; Susperreguy, Burr, et al., 2020; Susperreguy, Douglas, et al., 2020; Susperreguy et al., 2021; Zippert & Ramani, 2016). Mais nos résultats sont plus qu'une simple réplique des résultats précédents, ces derniers ayant tous été réalisés chez des enfants avant leur entrée en CP. En ce sens, les activités que nous avons catégorisées comme « complexes » n'étaient donc pas comparables à celles précédemment évaluées. En suivant la recommandation de Elliott et Bachman dans leur article de revue (2018a), nous avons veillé à définir le niveau de complexité des activités de numératie selon l'âge des enfants et à partir des « attendus classiques » du programme scolaire français (correspondant au Cycle 2). Nos résultats complètent donc les résultats précédemment obtenus en illustrant l'importance de la discrimination des activités formelles selon leur complexité afin de faire émerger des relations avec les habiletés numériques élaborées chez l'enfant plus âgé.

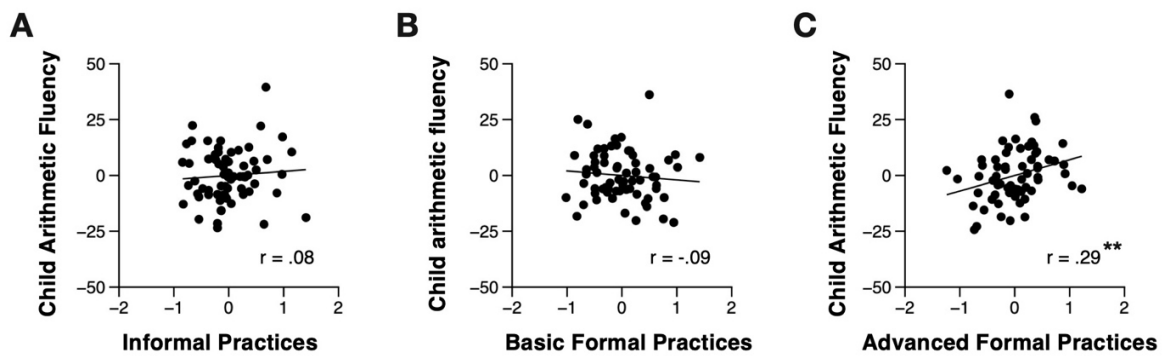


Figure 47 : Figures (tirée du Chapitre 6 ; Girard et al., *in press*) représentant les relations observées entre les compétences de fluence arithmétique chez les enfants (en ordonnée) et la fréquence des différents types d'activité de numération familiale rapportée par leur parent (en abscisse). **A.** Résultat en faveur d'une absence de relation avec les activités de type informel. **B.** Résultat en faveur d'une absence de relation avec les activités de type formel et de niveau basique. **C.** Résultats en faveur d'une relation significative avec la fréquence des activités de numération de type formel et de niveau complexe (contrôlée pour la fréquence des activités formelles et basiques).

Les variables sont toutes centrées sur la moyenne et la corrélation est contrôlée pour le niveau de diplôme parental. $**p < .01$. $N=66$

Par ailleurs, nos résultats concernant les activités informelles de numération renforcent l'hétérogénéité des précédentes études ayant visé à isoler la mesure de leur fréquence en lien avec les compétences numériques des enfants. Plus précisément, nous avons répliqué les résultats des études (Ciping et al., 2015; Huntsinger et al., 2016; LeFevre, Polyzoi, et al., 2010) ayant conclu à une absence de lien statistique entre ces deux composantes (voir **Figure 47.A**). Pour autant, sur la base des enseignements fournis par les études interventionnelles ayant montré des effets sur les compétences numériques des enfants à partir d'activités de numération informelles (comme l'usage de jeux ou de livres comportant des informations numériques ; Cheung & McBride-Chang, 2015; Gibson et al., 2020; Ramani & Scalise, 2020), il paraît compliqué de nier l'intérêt de ces activités informelles de numération au sein de l'environnement familial. À notre connaissance, seules deux précédentes études avaient veillé à obtenir des scores précis et différents pour chacune des composantes numériques chez l'enfant avant le début de leur scolarisation formelle et celles-ci avaient identifié des liens avec les activités de numération de type informel (Mutaf-Yıldız et al., 2018a; Susperreguy, Burr, et al., 2020). Il est donc tout à fait possible que l'absence de résultat dans notre étude s'explique par l'âge des enfants testés qui ne se distinguaient plus sur ces compétences précoces¹.

De façon plus générale, à notre connaissance, notre étude est la première à proposer une identification des relations *concurrentes* (et non pas longitudinales) entre activités familiales de numération et compétences mathématiques des enfants après le début de leur scolarisation formelle. De plus, les résultats ayant montré une telle relation au sein d'un ensemble d'enfants

¹ C'est d'ailleurs ce que suggèrent nos résultats préliminaires obtenus à partir d'un protocole identique à celui présenté dans la partie expérimentale, pré-enregistré et administré à des enfants de 5 ans.

français sont particulièrement rares. Cette remarque est d'autant plus importante que le système scolaire français se distingue de ceux de nombreux autres pays par la gratuité et la précocité de la scolarisation dans les écoles publiques dès la maternelle (Brougère, 2002; Tazouti et al., 2011), supposées participer à réduire les inégalités en favorisant les apprentissages dès l'âge de 3 ans (voire dès 2 ans ; Heim, 2018). Remettant en question cette « force » historique du système éducatif français (Tazouti, Thomas, & Hoareau, 2020) et de façon cohérente avec les données françaises des cohortes longitudinales (Andreu et al., 2021; Bernigole et al., 2019; Peña-López, 2019b), les relations entre activités familiales de numératie et compétences mathématiques des enfants semblent donc pouvoir être répliquées en France et cela après le début des apprentissages formels en mathématiques.

1.1.2. Relation entre niveau élevé d'attentes parentales et fréquences des activités formelles et complexes de numératie en famille

Nous avons également souhaité explorer l'une des questions fondamentales des formalisations théoriques actuelles sur l'environnement familial de numératie (Dowker, 2021; Napoli et al., 2021; Susperreguy, Douglas, et al., 2020), à savoir : participer à l'identification des « raisons » pour lesquelles certains parents seraient davantage enclins à engager des activités de numératie plus fréquentes avec leur enfant (L. Elliott & Bachman, 2018a). Notre protocole nous a permis d'étudier l'influence conjointe de différents facteurs parentaux (leur attitude vis-à-vis des mathématiques, leurs compétences en arithmétique, leur niveau d'étude et de salaire, leur niveau d'attente vis-à-vis de la réussite en mathématiques de leur enfant, leurs estimations des compétences en mathématiques de leur enfant) sur leur degré d'engagement dans des activités de numératie, notamment celles en lien avec les compétences numériques des enfants (c.-à-d. les activités formelles et complexes).

Nos résultats ont indiqué que notre mesure d'attitude des parents vis-à-vis des mathématiques était corrélée aux mesures des compétences d'arithmétiques administrées aux parents ainsi que la mesure de leur niveau de diplôme. Si l'on considère les liens étroits d'interdépendance que peut entretenir le phénomène d'anxiété en mathématiques avec les difficultés dans cette même discipline ou les conséquences sur la formation supérieure (Carey, Hill, Devine, & Szücs, 2016; Dowker et al., 2016; Núñez-Peña, Suárez-Pellicioni, & Bono, 2013), cela semble pouvoir indiquer une bonne validité de notre mesure d'attitude parentale.

Pourtant nos données ont révélé que, parmi l'ensemble des facteurs parentaux mesurés, seules les attentes parentales quant à la réussite en mathématiques de leur enfant étaient liées à la fréquence des activités de numératie (formelles et complexes). Nos données ont par ailleurs permis de répliquer l'intérêt de la dissociation du niveau d'attentes parentales (Río et al., 2017), en montrant que seules les attentes les plus élevées étaient liées à la fréquence rapportée pour les activités formelles les plus complexes. Contrairement à l'hypothèse de Hunt (Hunt, 1961; reprise par Zippert & Ramani, 2016; ainsi que dans la récente revue critique de Hornburg et al., 2021), cette relation n'était pas expliquée par la perception qu'avaient les parents des compétences de leur enfant. À notre connaissance, notre étude est la première à tester véritablement la relation entre les attentes parentales, leurs estimations des compétences de

leurs enfants et la fréquence des différents types d'activités de numération engagées avec ces derniers. Contrairement aux hypothèses théoriques suggérées, nos données pourraient indiquer que le niveau d'attentes parentales pourrait au contraire dépendre davantage de leurs propres systèmes de valeurs, plutôt que découler de leur perception des compétences de leur enfant.

Enfin, le rôle des attentes parentales mesurées dans notre étude est tel que celles-ci pourraient également être liées de façon « directe » à une part de la variabilité des compétences arithmétiques des enfants (c.-à-d. indépendamment des activités de numération mesurées ; comme pour Kleemans et al., 2012; Río et al., 2017; Segers et al., 2015). Comment interpréter cette relation directe entre attentes parentales et compétences arithmétiques de l'enfant ? Tout d'abord, la prise en compte de cette mesure dans un modèle global prédisant les compétences des enfants ne supprime pas pour autant la variabilité inhérente aux activités de numération. Par ailleurs, cette relation ne s'expliquerait pas par les activités familiales de littératie. Il nous paraît donc peu probable que ce plus haut degré d'attentes parentales se traduisait dans des caractéristiques des activités familiales d'apprentissage. Cette transmission « directe » pourrait néanmoins s'expliquer par des variables conatives chez l'enfant non mesurées dans notre étude. Il se pourrait par exemple que les attentes élevées parentales se transmettent à leurs enfants par une recherche de valorisation des compétences de ces derniers ou un soutien motivationnel (Tazouti & Jarlégan, 2010; Tazouti et al., 2020).

1.2. Apports principaux des résultats neurocognitifs

1.2.1. Rappel des hypothèses et présentation des résultats associés

Un apport fondamental de notre étude de neuro-imagerie est que celle-ci a permis de montrer que la relation entre environnement familial en numération et compétences en mathématiques pouvait s'expliquer par une influence des activités numériques sur l'activité cérébrale liée au traitement numérique dans l'IPS. Plus précisément, la réponse cérébrale de l'IPS gauche à la présentation de quantités symboliques était plus importante pour les enfants bénéficiant le plus de stimulations numériques complexes au sein de la famille et, en retour, cette spécialisation cérébrale permettait d'expliquer les différences de fluence arithmétique.

Conformément à notre prédiction concernant la relation entre la fréquence des activités familiales de numération (formelles et complexes) et l'activité cérébrale dédiée aux symboles numériques (« voie A » de notre médiation), nous avons trouvé une relation positive entre la fréquence de ces activités de numération à la maison et l'effet d'adaptation neuronale aux quantités symboliques (chiffres) dans l'IPS gauche (voir « *path A* », **Figure 48**). En d'autres termes, les enfants qui étaient les plus fréquemment exposés aux activités formelles et complexes de numération au sein de leur famille étaient également ceux qui présentaient une plus grande adaptation neuronale aux quantités symboliques au sein l'IPS gauche. Conformément à notre prédiction concernant la relation entre l'activité cérébrale dédiée aux symboles numériques et les compétences arithmétiques chez l'enfant (« voie B » de notre médiation), nous avons trouvé une relation positive entre les compétences de fluence arithmétique de l'enfant et le phénomène d'adaptation neuronale aux symboles numériques dans plusieurs régions frontales, pariétales et occipitales (voir « *path B* », **Figure 48**). Plus

précisément, les enfants qui présentaient un phénomène d'adaptation neuronale plus important dans ces régions présentaient également de meilleures compétences de fluence arithmétique. Enfin, un test formel de médiation a permis de mettre en avant que le phénomène d'adaptation neuronale aux symboles dans l'IPS gauche expliquait (dans une certaine mesure) la relation comportementale entre activités de numératie (formelles et complexes) et compétences en fluence arithmétique de l'enfant (voir « *path C'* », **Figure 48**). Cette médiation était dite « totale ». Autrement dit, après prise en compte de l'adaptation neuronale aux stimuli symboliques dans l'IPS gauche, la relation comportementale entre activités de numératie (formelles et complexes) et compétences en fluence arithmétique n'était plus significative.

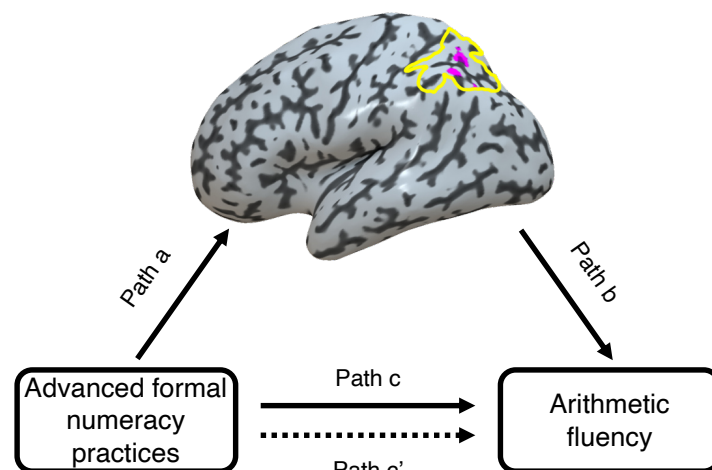


Figure 48 : Figure (tirée du Chapitre 6 ; Girard et al., *in press*) permettant d'illustrer le modèle de la médiation identifiée au sein de nos résultats où l'adaptation cérébrale aux chiffres arabes (nombres symboliques) dans l'IPS permet d'expliquer la relation entre les activités familiales de numératie (complexes et avancées) et les compétences en fluence arithmétique des enfants. $n=50$

1.2.2. Intérêt de la neuro-imagerie dans la mise en évidence de la « spécificité numérique » de la relation entre activités familiales de numératie et compétences arithmétiques

À notre connaissance, ces données sont les premières à permettre d'établir une relation entre les caractéristiques de l'environnement familial et des différences dans l'activité cérébrale directement dédiée au traitement des symboles au sein de l'IPS. Le seul précédent protocole IRMf à avoir exploré la relation entre activité cérébrale et caractéristiques de l'environnement familial (estimées à partir du niveau de diplôme parental) avait utilisé une tâche de résolution arithmétique et avait mis l'accent sur le recrutement de régions cérébrales dédiées au langage (Demir et al., 2015; Demir-Lira et al., 2016). Plus précisément, ce protocole avait montré que les enfants issus des milieux les plus favorisés se distinguaient de leurs pairs moins favorisés par le recrutement accru d'une région cérébrale dédiée au traitement verbal pendant la résolution arithmétique (région temporale gauche, recrutée par ailleurs pour une tâche de traitement phonologique ; Demir et al., 2015). Par ailleurs, d'autres protocoles, visant spécifiquement l'étude du langage et des fonctions exécutives, avaient pu établir des différences d'activité cérébrale au sein des régions cérébrales dédiées à ces fonctions selon les différences

d'environnement familial (caractérisées principalement via des mesures du SES mais aussi via des mesures des stimulations langagières et/ou en littérature ; pour revues et méta-analyses, voir Farah, 2017; Johnson et al., 2016; Merz et al., 2019; Romeo, 2019; Yaple & Yu, 2019).

Avant de revenir sur ce que nos résultats impliquent par rapport à l'étude de l'environnement familial, nous proposons d'abord de de quelle manière ils sont cohérents avec ceux de plusieurs études précédentes : concernant le phénomène de traitement automatique des symboles (sans consigne explicite), mais surtout concernant le processus d'adaptation cérébrale aux symboles numériques ainsi que la relation établie entre spécialisation de l'IPS gauche dans le traitement des symboles numériques et performances en arithmétique.

- *Une « automaticité » du traitement des symboles numériques*

Évaluer le traitement « passif » des symboles numériques suppose que l'enfant soit capable de traiter de façon « automatique » les composantes sémantiques des symboles numériques lors de leurs présentations (et pas uniquement leurs propriétés perceptives). Un tel phénomène a été établi à travers différents types de protocoles expérimentaux, chez l'enfant et l'adulte, via des données comportementales (Bugden & Ansari, 2011; Fias, Reynvoet, & Brysbaert, 2001; Girelli, Lucangeli, & Butterworth, 2000; Henik & Tzelgov, 1982; Vogel et al., 2019), mais aussi de neuro-imagerie (p. ex., interférence avec la taille ou visualisation de dessins animés contenant des informations numériques ; Cantlon & Li, 2013; Emerson & Cantlon, 2012; Kaufmann et al., 2005). Le développement relativement « tardif » de cette automatisaion a aussi été souligné (l'automaticité dans l'accès au sens cardinal du symbole émergerait autour de 8 ans, selon Girelli et al., 2000).

- *Un phénomène d'adaptation neuronale aux symboles numériques identifié dans l'IPS gauche chez l'adulte et chez l'enfant de plus de 10 ans*

Plus proches de notre protocole, quelques études ont déjà employé des paradigmes IRMf d'adaptation passive aux symboles numériques et leurs résultats avaient convergé à identifier l'IPS gauche comme une des régions cruciales de ce phénomène d'adaptation chez l'adulte (Goffin, Vogel, Slipenkyj, & Ansari, 2020; Guillaume, Poncin, Schiltz, & Van Rinsveld, 2020; Holloway et al., 2013; Notebaert et al., 2011; Piazza et al., 2007; Sokolowski et al., 2021; Vogel et al., 2015, 2017). À notre connaissance, l'étude de Vogel et collaborateurs (2015) est la seule à avoir étudié en IRMf ce phénomène d'adaptation passive aux symboles numériques chez l'enfant. Celle-ci a permis l'identification de la caractéristique « développementale » du recrutement de l'IPS gauche. Plus précisément, Vogel et collaborateurs (2015) avaient montré que, parmi des enfants âgés de 6 à 14 ans, seuls les plus âgés présentaient ce phénomène d'adaptation cérébrale au sein de l'IPS gauche lors de la visualisation passive de chiffres.

Pris au niveau du groupe, les résultats que nous avons obtenus pour l'ensemble des enfants de 8 ans sont cohérents avec ceux que Vogel et collaborateurs (2015) avaient montrés pour les enfants du même âge (c.-à-d. une adaptation neuronale aux symboles dans les régions frontales et occipitales, mais pas dans la région pariétale). Néanmoins nos résultats se

distinguent de ces précédents résultats en montrant une variation de l'activité cérébrale au sein de notre groupe d'enfants de 8 ans selon le degré de stimulations de leur environnement familial en numératie (« *path a* » de la **Figure 48**). En effet, les enfants bénéficiant d'un environnement familial de numératie plus stimulant recrutaient l'IPS gauche, de façon plus « précoce » (Vogel et al., 2015).

- *Des résultats cohérents avec ceux des tâches IRMf « actives » de traitement des propriétés sémantiques des symboles numériques*

Précisons également qu'un recrutement similaire de l'IPS gauche pour le traitement des symboles avait été mis en évidence via d'autres études utilisant des tâches IRMf actives « plus classiques », c'est-à-dire en demandant explicitement le traitement d'une dimension sémantique des symboles (« cardinale » ou « ordinale », p. ex., comparaison d'un groupe d'enfants de 7 à 10 ans versus un groupe d'adultes ; Matejko, Hutchison, & Ansari, 2019; ou comparaison d'enfants de 7 à 10 ans ; Sommerauer, Graß, Grabner, & Vogel, 2020). Enfin, le degré de recrutement de cette région cérébrale (l'IPS gauche) pendant une telle tâche IRMf de traitement « actif » des symboles avait déjà été mis en lien avec les performances arithmétiques, notamment chez des enfants de 8 ans (Bugden et al., 2012; pour une même relation chez l'adulte, voir Vogel, Faulkenberry, & Grabner, 2021; pour une méta-analyse, voir Schneider et al., 2017). En cela, nos résultats de médiation concernant la « voie b » répliquent et étendent la littérature existante en montrant une telle relation entre activité de l'IPS gauche dédiée aux symboles et performances arithmétiques, mais à l'aide d'une tâche IRMf « non active » (adaptation neuronale aux symboles, voir « *path b* » sur la **Figure 48**).

- *Le rôle des « expériences » avec les symboles numériques dans le recrutement de l'IPS gauche*

Dans une revue récente, Vogel et De Smedt (2021) ont défendu l'idée selon laquelle l'activité de l'IPS gauche mise en évidence à travers les tâches d'adaptation serait liée à la mise en place d'un phénomène d'automatisation progressive permettant le traitement fluide et précis des informations numériques symboliques au fur et à mesure que l'enfant acquiert de l'expérience avec ce « code » mathématique. Une revue de Menon et Chang (2021) renforce cette idée en soulignant que des interventions mathématiques pourraient améliorer l'automatisme du recrutement de l'IPS (plutôt que le recrutement de mécanismes compensatoires). En ce sens, ces propositions nous semblent tout à fait cohérentes avec l'aspect fondamentalement nouveau de nos résultats de médiation concernant l'apport des activités familiales de numératie au recrutement précoce de l'IPS gauche pour le traitement fluide et précis des symboles chez l'enfant.

Étant donné la part d'adéquation de nos résultats pouvant être comparés avec ceux de la littérature préexistante, il nous paraît d'autant plus légitime de donner du crédit aux résultats nouveaux concernant l'environnement familial. Ces résultats remettent en question le postulat théorique selon lequel l'influence de l'environnement familial sur les compétences

mathématiques des enfants serait uniquement le fait de composantes « non numériques », autrement dit verbales (Demir et al., 2015; N. C. Jordan & Levine, 2009). Au contraire, les différences dans l'automatisation neuronale du traitement fondamental des symboles numériques pourraient expliquer le lien entre environnement familial et cognition numérique chez l'enfant par le biais de mécanismes cérébraux foncièrement dédiés aux nombres.

2. Importance du contrôle des facteurs confondants dans l'étude des relations entre environnement familial de numératie et compétences neurocognitives en mathématiques chez l'enfant.

En plus des résultats principaux qui viennent d'être exposés, un autre objectif important du travail réalisé dans le cadre de cette thèse était de mieux comprendre la spécificité de la relation entre activités familiales de numératie et compétences arithmétiques chez l'enfant en veillant à l'isoler au mieux de différentes variables susceptibles d'entretenir des relations d'interdépendances fortes avec chacune des composantes de la relation étudiée.

2.1. Mesure conjointe des variables contrôles : facteurs neurocognitifs non numériques chez l'enfant et fréquences des activités familiales de littératie

Plusieurs limites ont pu être identifiées dans la littérature sur le HNE. Premièrement, malgré le rôle des facteurs cognitifs « non numériques » dans le développement des compétences mathématiques, leur prise en compte est très peu systématisée dans les études précédemment réalisées, qu'il s'agisse des compétences des enfants (pour une revue sur le rôle potentiel des facteurs cognitifs « non numériques » dans la relation entre HNE et habiletés numériques, voir Kleemans et al., 2016) ou des activités familiales d'apprentissage non liées à la numératie (pour une discussion sur la nécessité de veiller à mieux déterminer la part de variance expliquée par les activités de littératie comparativement à celles de numératie, voir Napoli et al., 2021). De façon générale pour mieux identifier la spécificité de la relation entre HNE et compétences neurocognitives des enfants en mathématiques, il apparaissait nécessaire de chercher à mesurer de façon conjointe non seulement les scores de fréquences d'activités familiales en littératie, mais aussi les facteurs cognitifs « non numériques » des enfants (p. ex. leurs compétences langagières et leur efficacité cognitive).

Dans la partie précédente, nous avons souligné le résultat majeur de nos données en neuro-imagerie : la « spécificité numérique » de la relation entre activités familiales de numératie et compétences arithmétiques. Nous suggérons que cette proposition est par ailleurs renforcée à double titre par les différentes mesures contrôles que nous avons réalisées, concernant à la fois la mesure des facteurs neurocognitifs « non numériques » des enfants, mais aussi celle des activités familiales d'apprentissage non dédiées à la numératie.

Tout d'abord, nous avons montré que la relation entre HNE et développement neurocognitif des compétences mathématiques pouvait être isolée de l'influence des autres

facteurs neurocognitifs chez l'enfant. Autrement dit, cette relation était conservée après le contrôle des mesures comportementales « non numériques » (de langage, de QI et de détection de cibles) ainsi que le contrôle pour le phénomène d'adaptation cérébrale aux mots (cette mesure contrôle nous permettait d'exclure un effet du HNE sur le traitement du langage, des symboles non numériques ou encore des traitements perceptifs de plus bas niveau ; Perrachione et al., 2016). De plus, nos données ont également permis d'isoler la relation entre HNE et développement neurocognitif des compétences mathématiques des stimulations familiales d'apprentissage dédiées à la littératie (Sénéchal, 2006b; dans leur revue, Napoli et al., 2021 soulignaient l'importance de mieux identifier le rôle potentiel de ces stimulations familiales « non numériques »). À notre connaissance, ces résultats sont les premiers à isoler la spécificité numérique des deux composantes de la relation, c'est-à-dire tant du point de vue de la caractérisation du domaine des stimulations familiales que du point de vue cognitif de l'enfant (pris aux niveaux comportemental et cérébral). Par conséquent, la « spécificité numérique » de la relation que nous défendons s'établit en premier par nos résultats montrant des différences d'activité cérébrale dédiées au traitement des symboles au sein de l'IPS, mais cette spécificité est également confirmée et renforcée par l'ensemble de nos mesures contrôles (chez l'enfant et sur les stimulations parentales).

2.2. Mesure de la variabilité socio-économique des familles testées

Au sein de notre échantillon de parents aux caractéristiques socio-économiques diverses, il apparaît que la relation objectivée entre HNE et développement neurocognitif des compétences numériques chez l'enfant est indépendante du niveau d'étude des parents (ou de leur niveau de salaire). Ce résultat est en accord avec un phénomène de variabilité des stimulations parentales intra-SES précédemment décrit (p. ex. pour une absence de lien entre HNE et SES ; De Keyser et al., 2020; S. A. Hart et al., 2016; Manolitsis et al., 2013; K. Missall et al., 2015; Napoli & Purpura, 2017; Wei et al., 2020). Mais plus particulièrement, le fait d'avoir montré que la relation que nous avons objectivée était indépendante des variations de SES pourrait minimiser le risque de négliger un facteur confondant d'un autre type « d'expériences » inhérentes aux différences de conditions de vie entre les enfants. En effet, les différentes « expériences » des enfants dans les diverses sphères de leur quotidien (p. ex. le stress, la nutrition, ou encore la santé ; Conger & Donnellan, 2007) pourraient être statistiquement liées entre elles et surtout aux différences de ressources socio-économiques de leurs familles. Utiliser les mesures SES comme une « mesure distale contrôle » de ces autres « expériences » ne permet pas d'informer sur celles-ci (dont la mesure n'était pas l'objectif de la thèse), mais pourrait permettre a minima de réduire la confusion avec un autre type « d'expériences » inhérentes aux conditions de vie (p. ex. risquer d'attribuer une relation entre cognition mathématique et activités familiales de numératie, si celle-ci était susceptible de s'expliquer davantage par la mesure SES distale, et donc à d'autres types « d'expériences », comme des différences de ressources sur le plan de la santé ; Conger & Donnellan, 2007; Johnson et al., 2016).

2.3. Mesure des compétences parentales en mathématiques

Nos résultats ont permis de montrer que la taille de la relation entre HNE et cognition numérique chez l'enfant, qu'elle soit considérée au niveau cérébral via le prisme de l'automatisation du traitement des symboles numériques ou au niveau comportemental via les performances arithmétiques élaborées, n'était pas réduite (voire, au contraire, s'accroissait) après la prise en considération la part de variance expliquée par les compétences arithmétiques du parent. Le cadre méthodologique de la « Familial Control Method », suggéré par Hart et collaborateurs (2021), proposait de dissocier les influences environnementales des potentiels facteurs génétiques confondants via l'évaluation d'un « trait » comportemental commun (p. ex. dans notre cas, l'évaluation des compétences de fluence arithmétique). Plus précisément, il était recommandé de tenir compte de la part de variabilité des compétences des enfants expliquée par celles des parents afin d'isoler l'effet environnemental sans « confusion génétique ». Il est important de souligner que notre protocole expérimental ne nous a permis de réaliser l'évaluation des compétences arithmétiques que d'un seul des deux parents de chaque enfant et, à ce titre, ne permet qu'une application partielle de la méthode suggérée par Hart et collaborateurs (2021). Si les résultats que nous avons obtenus en contrôlant pour les performances arithmétiques de l'un des parents semblent ne pas pouvoir être aisément expliqués par une confusion génétique, il ne nous est cependant pas possible d'exclure complètement cette possibilité. Néanmoins au-delà de cette question « d'héritabilité » des compétences, notre résultat indique que la relation objectivée entre la fréquence des activités de numératie déclarées par le parent évalué et les compétences neurocognitives des enfants se maintient indépendamment des performances de ce parent. Autrement dit, quelles que soient les forces ou les faiblesses du parent en matière d'arithmétique, les activités de numératie qu'il engage avec son enfant seraient tout autant susceptibles d'être liées aux compétences de ce dernier. En ce sens, nos résultats vont à l'inverse de ceux de Maloney et collaborateurs (2015) qui avaient montré un effet délétère de la participation des parents anxieux vis-à-vis des mathématiques (c.-à-d. déclarant notamment avoir de très faibles compétences dans ce domaine et chercher à l'éviter) dans l'aide apportée aux devoirs de leurs enfants en mathématiques sur les compétences de ces derniers dans cette discipline. Cette différence pourrait s'expliquer par le caractère différent de l'aide apportée aux devoirs (Pomerantz, Moorman, & Litwack, 2007) par rapport aux activités familiales d'apprentissage initiées hors du cadre des injonctions formelles du système scolaire (Poncelet et al., 2020). Par ailleurs, nos résultats répliquent ceux de l'étude de Cheung et collaborateurs (2020) qui avaient montré que la relation objectivée entre compétences arithmétiques de l'enfant et stimulations familiales de numératie serait indépendante des compétences arithmétiques d'un des parents.

2.4. Résultats corrélationnels et inférence de la causalité : mesure de l'estimation des compétences de l'enfant par son parent, une tentative limitée pour réduire cette limite majeure

La limite principale de nos études est que les données obtenues sont uniquement corrélationnelles. Ainsi, bien que l'ensemble de nos résultats soit cohérent avec l'idée selon

laquelle des pratiques familiales de numératie fréquentes et adaptées au niveau des enfants pourraient favoriser le développement des compétences en mathématiques chez ces derniers, il faut envisager que le sens de lecture de cette relation puisse être « inversé ». Autrement dit il est tout à fait possible que la relation objectivée s'explique davantage par le fait que les parents adaptent la fréquence et le niveau des activités de numératie qu'ils réalisent avec leur enfant aux compétences de celui-ci (comme le suggèrent les données longitudinales de Ciping et al., 2015).

En conséquence, nous avons cherché à contrôler ce facteur en demandant aux parents d'estimer le niveau de compétence de leur enfant en mathématiques. Tout d'abord, nous avons constaté que les parents avaient tendance à estimer correctement les compétences de leurs enfants. Pour autant, le fait d'inclure cette estimation des compétences n'a pas modifié notre modèle liant HNE et compétences neurocognitives en mathématiques des enfants. Plus spécifiquement, la prise en compte de cette variable confondante n'a pas affecté les résultats obtenus à partir de notre modèle de médiation (l'adaptation cérébrale aux chiffres arabes dans l'IPS continuait à expliquer la relation liant les activités familiales de numératie complexes et avancées aux compétences de fluence arithmétique des enfants). Quoi qu'il en soit, nos données restent fondamentalement corrélationnelles et de futures études interventionnelles sont nécessaires pour établir la causalité des relations que nous avons établies au cours de cette thèse.

3. Vers un modèle neurocognitif des liens entre activités familiales de numératie et cognition numérique chez l'enfant

Au-delà des caractéristiques spécifiques isolées entre activités familiales de numératie et caractéristiques neurocognitives des mathématiques chez l'enfant, nous suggérons que les travaux réalisés au cours de cette thèse pourraient conduire à proposer un modèle neurocognitif des liens entre environnement familial d'apprentissage et cognition numérique.

Nos mesures exhaustives des différentes caractéristiques familiales confirment leurs caractères interdépendants. En effet, ces différentes mesures sont apparues corrélées entre elles, qu'il s'agisse des mesures les plus distales (comme le niveau de revenu ou le niveau d'étude), des mesures moins distales (les caractéristiques parentales propres comme leur attitude ou leurs compétences) ou des caractéristiques de plus en plus proximales de l'expérience des enfants (comme les attentes spécifiques concernant la réussite de l'enfant ou la perception de leurs compétences) jusqu'à la mesure de la fréquence des différentes activités familiales réalisées (activités de numératie ou de littératie, décomposées selon leurs caractéristiques informelles ou formelles et leur niveau de complexité). Par conséquent, toutes ces mesures entretiennent un faisceau de relations qu'il est important de ne pas négliger (voir **Figure 49**). Pour autant, la prise en considération conjointe de l'ensemble de ces mesures permet de faire émerger une voie tout à fait spécifique de compréhension des activités familiales de numératie : le rôle du niveau élevé des attentes parentales, et cela indépendamment d'autres caractéristiques parentales, plus

ou moins « distales ». Concernant les activités proposées aux enfants, notre protocole nous a permis d'étudier, de façon conjointe, différents types d'activités (informelles ou formelles, basiques ou complexes) et dans différents domaines (numératie et littératie). Si ces différentes activités ont également montré des relations d'interdépendance, seules les activités de numératie, formelles et suffisamment complexes, se sont révélées être en lien avec les caractéristiques neurocognitives des enfants spécifiques au seul domaine des mathématiques. En effet, bien que présentant également des liens d'interdépendance, ces activités de numératie n'ont pas révélé de lien avec les autres facteurs cognitifs mesurés, au niveau comportemental (QI et langage) ou au niveau cérébral (automatisation de la lecture) (voir **Figure 49**).

Le modèle que nous proposons revendique ainsi une véritable « spécificité numérique » du « chemin » identifié entre environnement familial et compétences neurocognitives chez l'enfant. Plus spécifiquement, la relation qui émerge est spécifique au domaine numérique, qu'il s'agisse des caractéristiques familiales (attentes ou activités) ou des caractéristiques neurocognitives de la cognition numérique (modulation de l'activité cérébrale pour le traitement des symboles numériques, au sein d'une structure dédiée au traitement numérique ou aux compétences arithmétiques), indépendamment des mesures réalisées dans le domaine de la littératie (attentes ou activités, activité cérébrale pour le traitement des mots, composantes cognitives de lecture, de QI ou d'attention ; voir **Figure 49**). Sans négliger pour autant le rôle joué par le « langage mathématique » dans la transmission familiale, notre modèle se positionne en opposition avec certaines propositions récentes qui tendent à replacer les composantes verbales au centre de la relation qui lie environnement familial et compétences mathématiques (p. ex. la revue critique de Hornburg et al., 2021 qui suggère que l'étude de l'environnement familial de numératie pourrait être « trop centrée sur elle-même »; voir aussi Özkan & Baydar, 2021). De façon générale cependant, cette question a été très peu explorée par la littérature sur le HNE. En plus de nos mesures contrôles, nos mesures cérébrales permettent ici de dissocier des mécanismes non objectivables d'un point de vue comportemental.

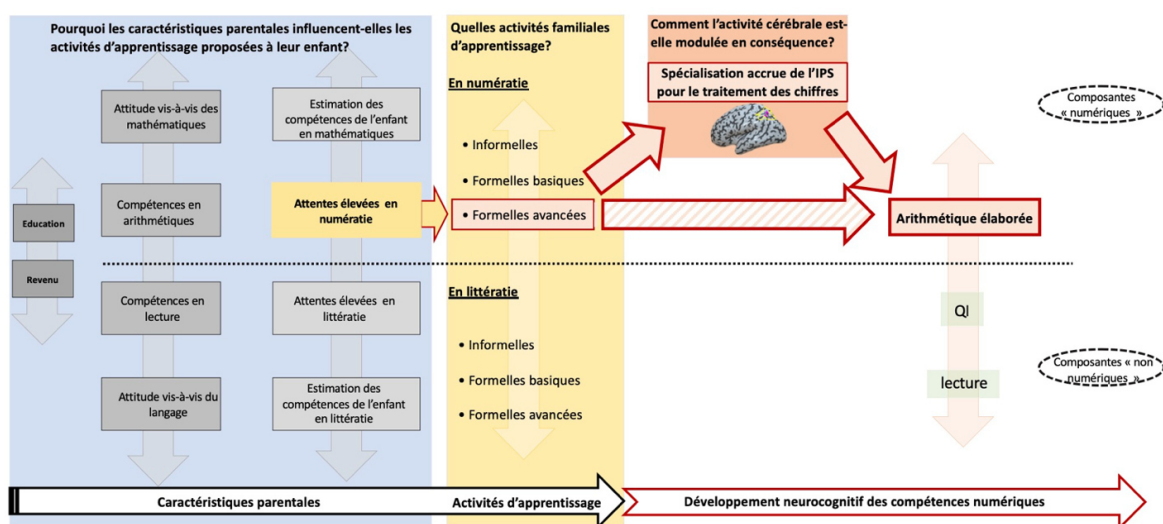


Figure 49 : Modèle global de la relation spécifique entre environnement familial de numératie et compétences neurocognitives des mathématiques chez l'enfant. Les relations d'interdépendance entre les caractéristiques parentales (en bleu), entre les activités d'apprentissage (en jaune), mais aussi entre les facteurs cognitifs chez l'enfant (en rose et vert à droite) sont représentées par de

doubles flèches. La prise en considération conjointe de ces différents facteurs fait émerger une relation spécifique entre attentes parentales dans le domaine de la numération (indépendamment des autres facteurs parentaux) et activités familiales de numération (formelles et complexes, indépendamment des autres activités familiales d'apprentissage). Ces activités de numération formelles et complexes sont par ailleurs liées aux compétences en arithmétique chez l'enfant par l'intermédiaire de son « automaticité cérébrale » à traiter les symboles numériques, et cela indépendamment des autres facteurs mesurés. La ligne pointillée délimite les composantes numériques (en haut) et les composantes non numériques (majoritairement verbales, en bas).

D'un point de vue neurodéveloppemental, nos résultats sont cohérents avec la représentation dominante concernant le traitement des quantités numériques au sein de l'IPS et nous permettent à ce titre de proposer un modèle neurocognitif centré sur la latéralisation du recrutement de cette région spécifique (voir **Figure 50**). Sur la base des travaux ayant établi une spécialisation précoce du traitement des quantités analogiques dans l'IPS droit (p. ex. Cantlon et al., 2006; Edwards, Wagner, Simon, & Hyde, 2016; Izard et al., 2009), une dissociation développementale quant à la latéralisation de l'activité de l'IPS avait en effet été suggérée. Plus précisément, Pinel et Dehaene (2013) ont proposé que le phénomène stable de représentation des quantités dans l'IPS droit tout au long de la vie soit principalement façonné par des facteurs de prédispositions génétiques. À l'inverse, le recrutement de l'IPS gauche pour la représentation (et la manipulation) des quantités symboliques précises relèverait davantage d'un mécanisme environnemental (entendu au sens large, éducatif compris). Autrement dit, selon l'hypothèse dite de « recyclage neuronal » (Dehaene & Cohen, 2007), le traitement cérébral de l'arithmétique, et avant cela des symboles numériques, pourrait différer du traitement des quantités analogiques, car résultant d'une « invention culturelle » (Pica et al., 2004) qui s'imposerait aux circuits cérébraux. L'automaticité du traitement des symboles, telle qu'illustrée dans notre tâche IRMf, ne suppose pas seulement une compétence de dénomination (c.-à-d. savoir lire et nommer les chiffres arabes d'après leurs étiquettes verbales de « mots-nombre »), mais aussi un traitement sémantique (cardinal ; pour revue, voir Matejko & Ansari, 2018; et ordinal ; pour revue, voir Vogel & De Smedt, 2021). Selon l'hypothèse de l'« échafaudage neuro-anatomique », le traitement fondamental des nombres symboliques pourrait constituer la base à partir de laquelle les compétences arithmétiques plus élaborées sont acquises (Matejko & Ansari, 2018).

Si l'aspect développemental de l'automaticité du recrutement de l'IPS gauche selon les apprentissages scolaires ou après des interventions de remédiation en mathématiques avait déjà été discuté (pour une revue récente, voir Menon & Chang, 2021), notre étude est la première à étendre ce schéma développemental aux stimulations parentales (en numération). Au-delà d'une remise en question du postulat de Jordan et Levine (2009) en montrant que l'environnement familial peut affecter directement la cognition numérique, nos données semblent indiquer que l'enrichissement des stimulations familiales en numération n'engage pas de réseau « alternatif » (ou « compensatoire ») dans le traitement des symboles (voir **Figure 50**). Au contraire, le recrutement de l'IPS gauche dans le traitement automatique des symboles numériques correspond au décours développemental connu, et jusqu'à présent mis en évidence à un âge plus tardif (Vogel et al., 2015). Bugden et collaborateurs (2012) avaient déjà suggéré que le recrutement de l'IPS gauche pour le traitement des symboles (notamment dans sa relation avec

les compétences arithmétiques) serait susceptible de jouer un rôle critique dans la cognition numérique comme conséquence d'une appropriation culturelle.

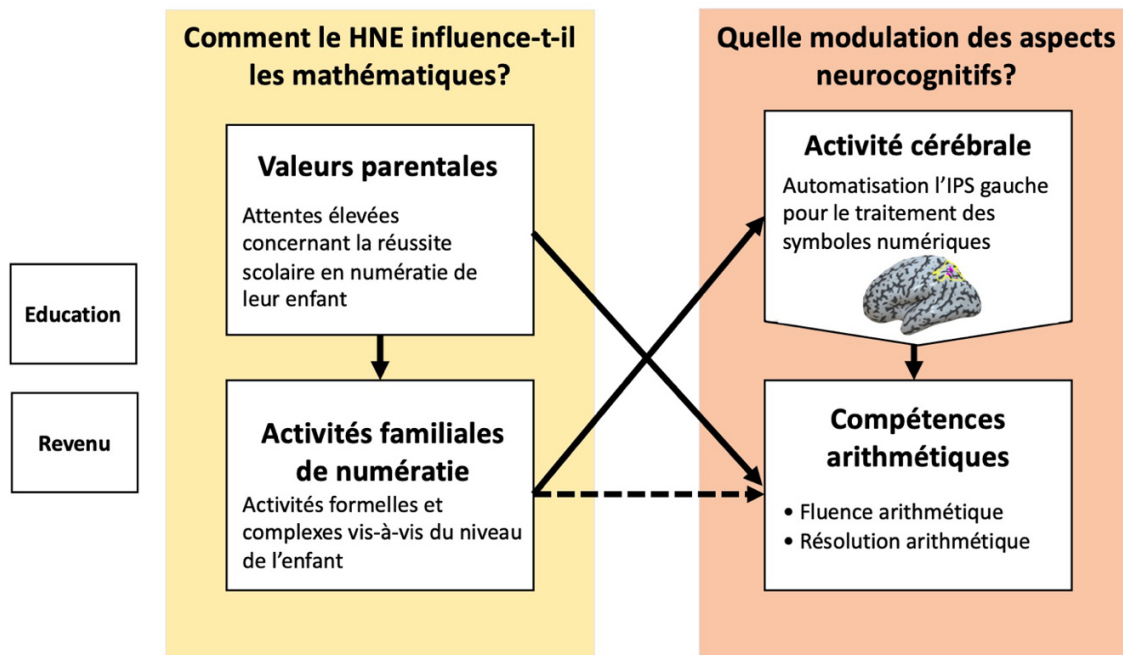


Figure 50 : Modèle neurocognitif simplifié des éléments clés identifiés dans la relation entre environnement familial de numératie et compétences mathématiques chez l'enfant via l'engagement précoce de l'IPS gauche dans le traitement automatique des quantités symboliques.

4. Perspectives et conclusions

4.1. Un modèle de lecture des relations entre famille et capacités cognitives compatibles avec certaines théories sociologiques

Si le rôle de l'environnement familial dans la constitution des différences de performances cognitives (et par la suite de différences de réussite scolaire) est un objet relativement récent en psychologie¹ et neurosciences cognitives au cours de ces vingt dernières années, il a été historiquement un important objet de recherche en sociologie. Par conséquent, il nous paraît utile de montrer en quoi la revue de la littérature et les études présentées dans le cadre de cette thèse sont finalement assez cohérentes avec les travaux issus de cette autre discipline (qu'il s'agisse du phénomène de variabilité intra-SES ou de l'importance des variables de pratiques et d'attentes identifiées au sein de nos données).

¹ Ou en tout cas peu répandu, il n'est pas question ici de négliger les travaux de psychologues comme Bruner, Vygotsky ou Wallon par exemple (J. Bruner, 1990; J. S. Bruner, 1965; Vygotsky & Cole, 1978; Wallon, 1954, 1959).

Les travaux de Bourdieu avaient montré comment, à partir du concept « d'habitus » (ou avec la métaphore de « l'héritage » ; Bourdieu & Passeron, 1970) les comportements scolaires pouvaient être analysés et compris par la catégorie socioprofessionnelle des parents. Mais ce concept, très déterministe, a pu être remis en question en raison de l'excessive homogénéité qu'il suppose pour les expériences vécues par tous les enfants d'une même « classe » sociale dans des sociétés contemporaines à forte différenciation ; mais aussi parce qu'il suppose une *automaticité* de la transmission, comme si le « capital » parental trouvait forcément à se transmettre au cours des échanges avec les enfants (Lahire, 2001, 2005).

Les travaux de sociologie réalisés à l'échelle de la famille comme « instance socialisatrice » nous semblent tout à fait cohérents avec nos études. Tout d'abord, en ce qui concerne la scolarisation, a pu être formulé le même constat d'un phénomène important de variations intra-SES (Duru-Bellat, Farges, & van Zanten, 2018a) et, plus précisément, il a été proposé de façon cohérente avec nos résultats que les normes et pratiques parentales étaient plus prédictives de la « destinée scolaire » que ne pouvaient l'être les caractéristiques socio-économiques (Duru-Bellat, Farges, & van Zanten, 2018b). Les travaux de « micro » sociologie ont ainsi visé à identifier quelles pouvaient être les expériences « socialisatrices », au sens où des contextes d'activités partagées, notamment en famille pourraient « imprimer » des modifications sur les enfants (Lahire, 2013). Dans son livre « Dans les plis singuliers du social », Lahire lui-même propose un parallèle entre certains phénomènes de plasticité cérébrale et son concept de « dispositions » individuelles, c'est-à-dire « l'expérience passée » qui *prédispose* à « voir, sentir ou agir d'une certaine façon plutôt que d'une autre » (Lahire, 2013). Il nous semble que nos résultats peuvent se lire à travers ce prisme. Autrement dit, on pourrait considérer qu'en modifiant la réponse neurale de l'IPS gauche aux symboles, la pratique fréquente et régulière d'activités de numération en famille crée une « disposition » chez l'enfant à percevoir efficacement le sens des symboles. Cette disposition à « traiter plus efficacement » les symboles numériques pourrait en retour expliquer les meilleures performances mathématiques de ces enfants.

Ce parallèle avec la sociologie nous permet par ailleurs de réfuter toute lecture essentialiste de nos résultats, critique à laquelle certains travaux de neuro-imagerie portant sur les effets cérébraux du SES se sont déjà appliqués à répondre en expliquant que leur démarche se voulait à l'opposé d'une quelconque lecture « essentialisante » (Farah, 2018; Farah et al., 2006; Raizada & Kishiyama, 2010). Le propos détaillé dans le cadre cette thèse consistait avant tout à identifier des situations ou des expériences et leurs liens sur le développement neurocognitif, comme, en fin de compte, autant de leviers potentiels pour remédier aux situations d'inégalité de réussite scolaire, à l'opposé donc d'un discours visant à réduire les trajectoires des enfants à une seule dimension familiale.

4.2. Un modèle « optimiste » conduisant à l'identification des caractéristiques les plus « malléables » de l'environnement familial

Nos résultats donnent finalement à lire un modèle très « optimiste » sur les relations entre environnement familial et compétences des enfants. En identifiant les pratiques et les attentes parentales comme facteurs clés, ce sont en définitive les plus « malléables » de

l'environnement familial qui sont soulignées (comparativement à des facteurs comme le niveau d'étude, les compétences arithmétiques des parents ou leur attitude vis-à-vis des mathématiques). Nos données, comme celles de plusieurs autres études (Blevins-Knabe et al., 2000; Cannon & Ginsburg, 2008; LeFevre et al., 2009; Napoli et al., 2021; Sonnenschein et al., 2020), ont montré que les parents rapportaient globalement avoir des attentes plus élevées et réaliser plus d'activités avec leur enfant dans le domaine de la littératie que dans celui de la numératie.

Certaines études interventionnelles, à partir de programmes simples et courts, ont montré des résultats encourageants en mesurant directement l'efficacité causale de certains types de « leviers » sur l'évolution des compétences en mathématiques des enfants. Dans plusieurs familles, il a été montré l'effet bénéfique de la mise à disposition et l'usage « d'outils » spécifiques (en fournissant notamment des applications sur tablette pour favoriser les échanges mathématiques, Berkowitz et al., 2015; ou des livres contenant des incitations à mobiliser du langage mathématique, Gibson et al., 2020) ou d'un guidage explicite sur les différentes manières de soutenir l'apprentissage des mathématiques de l'enfant au quotidien (Niklas et al., 2016; Vandermaas-Peeler et al., 2012). De façon générale cependant, la transposition des résultats corrélationnels aux interventions efficaces se révèle souvent peu aisée (Bailey, Duncan, Watts, Clements, & Sarama, 2018). Les études interventionnelles dans le domaine du HNE ont notamment souligné que leurs bénéfices sur les compétences mathématiques des enfants étaient conditionnés à plusieurs paramètres (importance notamment du degré de contingence des outils proposés ; Berkowitz et al., 2015; Cheung & McBride-Chang, 2015; et du degré de complexité par rapport au niveau initial de l'enfant ; Gibson et al., 2020).

Enfin, de façon plus générale, il nous semble important de replacer « l'instance » familiale au sein de la chaîne d'interdépendance plus grande à laquelle elle appartient, au niveau sociétal. En effet, cette croyance selon laquelle les compétences mathématiques relèvent uniquement de la scolarisation et la conviction d'un rôle mineur du soutien familial dans ce domaine comparativement aux domaines du langage et de la lecture de leurs enfants ne sont pas que des « biais » parentaux. Ces idées sont bien souvent partagées et renforcées par les informations transmises par les médias ou l'école, qui mettent en avant l'importance d'engager au sein du cercle familial des activités de lecture avec les enfants (sans informer sur l'intérêt d'autres pratiques comme pratiquer des jeux de plateau, en dehors de leur seule dimension ludique). La compétence de « coopération avec les parents d'élèves » fait partie intégrante du référentiel de compétences des professeurs des écoles et représente à ce titre un levier majeur pour chercher à modifier ces caractéristiques « malléables » (attentes et activités) si précieuses au sein de l'environnement familial de numératie. À ce sujet, une intervention récente a permis de montrer le bénéfice pour les enfants d'une intervention favorisant l'articulation entre école et familles dans la mise en place d'un programme d'activités ludiques en favorisant les apprentissages en mathématiques (de Chambrier et al., 2021).

Une illustration tout à fait représentative de cette asymétrie concerne l'accès aux ressources favorisant ces activités « informelles » d'apprentissage en famille. Le nombre de bibliothèques publiques recensées en France est plus de 10 fois supérieur (Ministère de la Culture, 2021) à celui des ludothèques (ALF Bretagne, 2013). Un autre exemple édifiant est

celui du site du Ministère de l'Éducation nationale intitulé « Malette des parents » et officiellement dédié aux parents et professionnels de l'éducation où l'accent est explicitement mis sur le rôle de la famille dans la lecture et l'écriture, au détriment des mathématiques. Ce biais de croyance concernant le rôle des familles dans le soutien au développement des mathématiques est encore plus global puisqu'il transparaît également dans le domaine de la recherche. Que ce soit en neurosciences cognitives ou en sociologie, les travaux sur l'influence de l'environnement familial sont bien plus nombreux dans le domaine du langage que dans celui des mathématiques (p. ex., Duru-Bellat et al., 2018b; Octobre, Détéz, Mercklé, & Berthomier, 2010).

4.3. Aspect développemental du modèle neurocognitif défendu : apport futur des données en cours d'acquisition chez l'enfant d'âge préscolaire

Le modèle neurocognitif que nous avons proposé sur la spécificité numérique de la relation entre caractéristiques de l'environnement familial d'apprentissage en numération (attentes et activités) et cognition numérique chez l'enfant est fortement dépendant de l'âge des enfants que nous avons testés. Plusieurs des caractéristiques de ce modèle sont susceptibles d'être fortement modifiées par l'âge des enfants : l'identification des compétences arithmétiques élaborées, de l'automatisation du recrutement de l'IPS gauche pour le traitement des symboles ou même l'absence de relation montrée pour les activités de numération informelles.

Pour explorer cet aspect développemental et compléter ce modèle, nous avons adapté le protocole présenté dans le cadre de cette thèse afin de l'adapter à l'évaluation d'une population d'enfants d'âge préscolaire et leurs parents. Les données de ce protocole, pré-enregistré, sont en cours d'acquisition et permettront de compléter notre modèle neurocognitif en précisant un éventuel décours développemental de la relation entre HNE et recrutement de l'IPS gauche dans le traitement des symboles.

Ces données obtenues chez des enfants plus jeunes pourront par ailleurs nous permettre d'interroger davantage certains aspects du modèle neurocognitif du HNE. Ces données pourront éventuellement nous informer sur le traitement des aspects sémantiques du symbole en testant, chez ces enfants, l'existence de relations éventuelles entre leurs compétences comportementales de cardinalité ou d'ordinalité (C. Xu & LeFevre, 2021) et le phénomène d'adaptation cérébrale aux symboles. Explorer davantage les relations entre activités familiales de numération et les différentes dimensions du traitement sémantique des symboles (pour des études sur le langage mathématique ayant montré des résultats sur la cardinalité; Gunderson & Levine, 2011; Levine et al., 2010; Ramani et al., 2015; pour l'importance des contextes d'interaction dans l'extraction des propriétés sémantiques des symboles, voir Gros, Thibaut, & Sander, 2021), mais aussi mieux identifier le type de procédures impliquées dans la résolution arithmétique représentent ainsi des enjeux futurs de compréhension.

4.4. Conclusion

En conclusion, les études décrites dans cette thèse apportent plusieurs enseignements sur le lien entre l'environnement familial et les compétences en mathématiques. Dans une première étude comportementale, nous avons montré que les compétences d'enfants de 8 ans en arithmétique étaient liées aux activités de numératie réalisées au domicile familial, à condition néanmoins que celles-ci soient formelles et suffisamment complexes. Nous avons par ailleurs montré que, parmi l'ensemble des facteurs parentaux mesurés, la mesure de leur niveau d'attentes concernant la réussite de leur enfant en mathématique était un élément prédicteur de ces activités formelles et complexes de numératie. Dans une deuxième étude en neuro-imagerie, nous avons identifié que cette relation comportementale entre activités formelles et complexes de numératie et compétences en arithmétique pouvait s'expliquer par une influence de la fréquence des activités de numératie sur l'activité cérébrale liée au traitement numérique dans l'IPS. Autrement dit, les enfants pratiquant le plus ce genre d'activités de numératie en famille avaient une plus grande réponse cérébrale dans l'IPS gauche lors de la présentation de nombres. Cette spécialisation cérébrale permettait à son tour d'expliquer les différences de performances arithmétiques. Ce résultat nous a permis de proposer le caractère spécifiquement « numérique » de la relation qui lie l'environnement familial d'apprentissage en numératie aux compétences mathématiques des enfants, contrairement au postulat jusqu'alors jamais formellement réfuté selon lequel les enfants pourraient bénéficier des apports de leur environnement pour améliorer leurs compétences mathématiques uniquement en raison des composantes verbales de ces dernières (N. C. Jordan & Levine, 2009). Par ailleurs, de façon plus générale, nos études ont tenu compte des principales limites inhérentes à la littérature récente sur le HNE en veillant à contrôler pour un large spectre de facteurs potentiellement confondants. Ces multiples contrôles ont non seulement conduit à renforcer le caractère « numérique » de la relation liant HNE et compétences arithmétiques, mais nous ont aussi permis de suggérer un modèle « optimiste » en identifiant les caractéristiques les plus flexibles de l'environnement familial. Cette thèse suggère donc qu'il serait intéressant de compléter ces résultats avec ceux d'enfants plus jeunes, mais également de tester le caractère causal de l'enrichissement des caractéristiques identifiées comme leviers potentiels : les attentes et pratiques familiales vis-à-vis de la numératie. Au final, et bien que l'apprentissage formel des mathématiques soit avant tout un apprentissage scolaire, une meilleure compréhension de l'environnement familial de numératie pourrait participer à la réduction du phénomène des inégalités en mathématiques.

BIBLIOGRAPHIE

Références

- Abedi, J., & Lord, C. (2001). The language factor in mathematics tests. *Applied measurement in education*, 14(3), 219-234.
- Albert, W. D., Hanson, J. L., Skinner, A. T., Dodge, K. A., Steinberg, L., Deater-Deckard, K., ... Lansford, J. E. (2020). Individual differences in executive function partially explain the socioeconomic gradient in middle-school academic achievement. *Developmental Science*, 23(5), e12937. <https://doi.org/10.1111/desc.12937>
- Albouy, G., King, B. R., Maquet, P., & Doyon, J. (2013). Hippocampus and striatum : Dynamics and interaction during acquisition and sleep-related motor sequence memory consolidation. *Hippocampus*, 23(11), 985-1004.
- ALF Bretagne. (2013). *Mises en jeux : La ludothèque, un espace de lien social et de soutien à la fonction parentale*. Caf.
- Alnæs, D., Kaufmann, T., Marquand, A. F., Smith, S. M., & Westlye, L. T. (2020). Patterns of sociocognitive stratification and perinatal risk in the child brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 117(22), 12419-12427. <https://doi.org/10.1073/pnas.2001517117>
- Amalric, M., & Dehaene, S. (2016). Origins of the brain networks for advanced mathematics in expert mathematicians. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(18), 4909-4917. <https://doi.org/10.1073/pnas.1603205113>
- American Psychiatric Association. (2015). *DSM-5-Manuel diagnostique et statistique des troubles mentaux*. Elsevier Masson.
- American Psychological Association, T. F. on S. S. (2007). Report of the APA task force on socioeconomic status. *Washington, DC: American Psychological Association*.
- Anders, Y., Rossbach, H.-G., Weinert, S., Ebert, S., Kuger, S., Lehrl, 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>
- Andreu, S., Ben Ali, L., Bret, A., Dos Santos, R., Durand de Monestrol, H., Lambert, K., ... Vourc'h, R. (2021). *800 000 élèves évalués en début de sixième en 2020 : Des performances en hausse, mais toujours contrastées selon les caractéristiques des élèves et des établissements*.
- Andrews, P., Petersson, J., & Sayers, J. (2021). A methodological critique of research on parent-initiated mathematics activities and young children's attainment. *Educational Studies in Mathematics*. <https://doi.org/10.1007/s10649-021-10080-x>
- Ansari, D. (2008). Effects of development and enculturation on number representation in the brain. *Nature Reviews Neuroscience*, 9(4), 278-291. <https://doi.org/10.1038/nrn2334>
- Ansari, D., Dhital, B., & Siong, S. C. (2006). Parametric effects of numerical distance on the intraparietal sulcus during passive viewing of rapid numerosity changes. *Brain Research*, 1067(1), 181-188. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2005.10.083>
- Ansari, D., Fugelsang, J. A., Dhital, B., & Venkatraman, V. (2006). Dissociating response conflict from numerical magnitude processing in the brain : An event-related fMRI study. *NeuroImage*, 32(2), 799-805. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2006.04.184>
- Ansari, D., Garcia, N., Lucas, E., Hamon, K., & Dhital, B. (2005). Neural correlates of symbolic number processing in children and adults. *Neuroreport*, 16(16), 1769-1773. <https://doi.org/10.1097/01.wnr.0000183905.23396.fl>
- Antell, S. E., & Keating, D. P. (1983). Perception of Numerical Invariance in Neonates. *Child*

Development, 54(3), 695-701. <https://doi.org/10.2307/1130057>

Aram, D., & Levin, I. (2001). Mother-child joint writing in low SES : Sociocultural factors, maternal mediation, and emergent literacy. *Cognitive Development*, 16(3), 831-852.

[https://doi.org/10.1016/S0885-2014\(01\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0885-2014(01)00067-3)

Ardila, A., Rosselli, M., Matute, E., & Guajardo, S. (2005). The influence of the parents' educational level on the development of executive functions. *Developmental neuropsychology*, 28(1), 539-560.

Arsalidou, M., Pawliw-Levac, M., Sadeghi, M., & Pascual-Leone, J. (2018). Brain areas associated with numbers and calculations in children : Meta-analyses of fMRI studies. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 30, 239-250. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.08.002>

Arsalidou, M., & Taylor, M. J. (2011). Is $2+2=4$? Meta-analyses of brain areas needed for numbers and calculations. *NeuroImage*, 54(3), 2382-2393.

<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.10.009>

Ashcraft, M. H. (1982). The development of mental arithmetic : A chronometric approach. *Developmental review*, 2(3), 213-236.

Ashcraft, M. H. (1992). Cognitive arithmetic : A review of data and theory. *Cognition*, 44(1-2), 75-106.

Ashcraft, M. H. (2002). Math Anxiety : Personal, Educational, and Cognitive Consequences. *Current Directions in Psychological Science*, 11(5), 181-185. <https://doi.org/10.1111/1467-8721.00196>

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

Avvisati, F. (2020). The measure of socio-economic status in PISA : A review and some suggested improvements. *Large-scale Assessments in Education*, 8(1), 8.

<https://doi.org/10.1186/s40536-020-00086-x>

Bacher-Hicks, A., Goodman, J., & Mulhern, C. (2021). Inequality in household adaptation to schooling shocks : Covid-induced online learning engagement in real time. *Journal of Public Economics*, 193, 104345. <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2020.104345>

Bachman, H. J., Elliott, L., Duong, S., Betancur, L., Navarro, M. G., Votruba-Drzal, E., & Libertus, M. (2020). Triangulating Multi-Method Assessments of Parental Support for Early Math Skills. *Frontiers in Education*, 5. <https://doi.org/10.3389/feduc.2020.589514>

Bailey, D. H., Duncan, G. J., Watts, T., Clements, D. H., & Sarama, J. (2018). Risky business : Correlation and causation in longitudinal studies of skill development. *American Psychologist*, 73(1), 81-94. <https://doi.org/10.1037/amp0000146>

Baker, C. E. (2015). Does Parent Involvement and Neighborhood Quality Matter for African American Boys' Kindergarten Mathematics Achievement? *Early Education and Development*, 26(3), 342-355. <https://doi.org/10.1080/10409289.2015.968238>

Bandura, A. (1986). *Social foundation of thought and action*. Englewood cliffs, NJ: prentice Hall.

Baroody, A. J. (1987). The Development of Counting Strategies for Single-Digit Addition.

Journal for Research in Mathematics Education, 18(2), 141-157.

<https://doi.org/10.5951/jresmetheduc.18.2.0141>

Baroody, A. J., & Tiilikainen, S. H. (2003). *Two perspectives on addition development*.

Barr, A. B. (2015). Family socioeconomic status, family health, and changes in students' math achievement across high school : A mediational model. *Social Science & Medicine*, 140, 27-34.

<https://doi.org/10.1016/j.socscimed.2015.06.028>

Barrouillet, P., Mignon, M., & Thevenot, C. (2008). Strategies in subtraction problem solving in children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 99(4), 233-251.

- Barrouillet, P., & Thevenot, C. (2013). On the problem-size effect in small additions : Can we really discard any counting-based account? *Cognition*, *128*(1), 35-44.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.02.018>
- Barth, H., Mont, K. L., Lipton, J., & Spelke, E. S. (2005). Abstract number and arithmetic in preschool children. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *102*(39), 14116-14121.
<https://doi.org/10.1073/pnas.0505512102>
- Bauer, P. J., Dikmen, S. S., Heaton, R. K., Mungas, D., Slotkin, J., & Beaumont, J. L. (2013). III. NIH Toolbox Cognition Battery (CB) : Measuring episodic memory. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, *78*(4), 34-48.
- Beffy, M., Clerc, M.-É., & Thévenot, C. (2014). Inégalités, pauvreté et protection sociale en Europe : État des lieux et impact de la crise. *La France dans l'Union européenne*, 25-41.
- Benavides-Varela, S., Butterworth, B., Burgio, F., Arcara, G., Lucangeli, D., & Semenza, C. (2016). Numerical Activities and Information Learned at Home Link to the Exact Numeracy Skills in 5–6 Years-Old Children. *Frontiers in Psychology*, *7*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00094>
- 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*(6257), 196-198.
<https://doi.org/10.1126/science.aac7427>
- Bernabini, L., Tobia, V., & Bonifacci, P. (2021). Intergenerational Features of Math Skills : Symbolic and Non-Symbolic Magnitude Comparison and Written Calculation in Mothers and Children. *Journal of Cognition and Development*, *22*(1), 149-167.
<https://doi.org/10.1080/15248372.2020.1844711>
- Bernabini, L., Tobia, V., Guarini, A., & Bonifacci, P. (2020). Predictors of Children's Early Numeracy : Environmental Variables, Intergenerational Pathways, and Children's Cognitive, Linguistic, and Non-symbolic Number Skills. *Frontiers in Psychology*, *11*, 505065.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.505065>
- Bernaudo, J.-L. (2014). *Méthodes de tests et questionnaires en psychologie*. Dunod.
- Bernigole, V., Bret, A., Chabanon, L., Roussel, L., & Verlet, I. (2019). *PISA 2018 : Culture mathématique, culture scientifique et vie de l'élève*.
- Berteletti, I., Lucangeli, D., Piazza, M., Dehaene, S., & Zorzi, M. (2010). Numerical estimation in preschoolers. *Developmental Psychology*, *46*(2), 545-551. <https://doi.org/10.1037/a0017887>
- Betancourt, L. M., Avants, B., Farah, M. J., Brodsky, N. L., Wu, J., Ashtari, M., & Hurt, H. (2016). Effect of socioeconomic status (SES) disparity on neural development in female African-American infants at age 1 month. *Developmental Science*, *19*(6), 947-956.
<https://doi.org/10.1111/desc.12344>
- Binder, J. R., & Desai, R. H. (2011). The neurobiology of semantic memory. *Trends in cognitive sciences*, *15*(11), 527-536.
- Bird, J., Bishop, D. V., & Freeman, N. H. (1995). Phonological awareness and literacy development in children with expressive phonological impairments. *Journal of speech, language, and hearing research*, *38*(2), 446-462.
- Blevins-Knabe, B., Austin, A. B., Musun, L., Eddy, A., & Jones, R. M. (2000). Family Home Care Providers' and Parents' Beliefs and Practices Concerning Mathematics with Young Children. *Early Child Development and Care*, *165*(1), 41-58. <https://doi.org/10.1080/0300443001650104>
- Blevins-Knabe, B., & Musun-Miller, L. (1996). Number Use at Home by Children and Their Parents and Its Relationship to Early Mathematical Performance. *Early Development and Parenting*, *5*(1), 35-45. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-0917\(199603\)5:1<35::AID-EDP113>3.0.CO;2-0](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-0917(199603)5:1<35::AID-EDP113>3.0.CO;2-0)
- Blumenfeld, H. K., Booth, J. R., & Burman, D. D. (2006). Differential prefrontal-temporal neural correlates of semantic processing in children. *Brain and Language*, *99*(3), 226-235.
<https://doi.org/10.1016/j.bandl.2005.07.004>

- Blums, A., Belsky, J., Grimm, K., & Chen, Z. (2017). Building Links Between Early Socioeconomic Status, Cognitive Ability, and Math and Science Achievement. *Journal of Cognition and Development, 18*(1), 16-40. <https://doi.org/10.1080/15248372.2016.1228652>
- Bol, T. (2020). Inequality in homeschooling during the Corona crisis in the Netherlands. First results from the LISS Panel. *SocArXiv*. <https://doi.org/10.31235/osf.io/hf32q>
- Boone, L., & Goujard, A. (2019). France, les inégalités et l'ascenseur social. *Futuribles, N° 433*(6), 5-17.
- Booth, J. L., & Siegler, R. S. (2006). Developmental and individual differences in pure numerical estimation. *Developmental Psychology, 42*(1), 189-201. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.41.6.189>
- Booth, J. R., Burman, D. D., Meyer, J. R., Gitelman, D. R., Parrish, T. B., & Mesulam, M. M. (2002). Modality independence of word comprehension. *Human Brain Mapping, 16*(4), 251-261. <https://doi.org/10.1002/hbm.10054>
- Borriello, G. A., Ramos, A. M., Natsuaki, M. N., Reiss, D., Shaw, D. S., Leve, L. D., & Neiderhiser, J. M. (2020). The intergenerational transmission of mathematics achievement in middle childhood : A prospective adoption design. *Developmental Science, 23*(6), e12974. <https://doi.org/10.1111/desc.12974>
- Bourdieu, P. (1986). The forms of capital. Handbook of theory and research for the sociology of education. JG Richardson. *New York, Greenwood, 241*(258), 19.
- Bourdieu, P., & Passeron, J.-C. (1970). *La Reproduction. Éléments d'une théorie du système d'enseignement* (Les Editions de Minuit).
- Bowey, J. A. (1996). On the association between phonological memory and receptive vocabulary in five-year-olds. *Journal of experimental child psychology, 63*(1), 44-78.
- Bradley, R. H., & Caldwell, B. M. (1980). The relation of home environment, cognitive competence, and IQ among males and females. *Child Development, 1140*-1148.
- Bradley, R. H., & Caldwell, B. M. (1984a). The HOME Inventory and family demographics. *Developmental Psychology, 20*(2), 315-320. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.20.2.315>
- Bradley, R. H., & Caldwell, B. M. (1984b). The Relation of Infants' Home Environments to Achievement Test Performance in First Grade : A Follow-Up Study. *Child Development, 55*(3), 803-809. <https://doi.org/10.2307/1130131>
- Bradley, R. H., Caldwell, B. M., Rock, S. L., Hamrick, H. M., & Harris, P. (1988). Home observation for measurement of the environment : Development of a home inventory for use with families having children 6 to 10 years old. *Contemporary Educational Psychology, 13*(1), 58-71.
- Bradley, R. H., & Corwyn, R. F. (2002). Socioeconomic status and child development. *Annual Review of Psychology, 53*, 371-399. <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.53.100901.135233>
- Bradley, R. H., & Corwyn, R. F. (2006). The Family Environment. In *Child Psychology a Handbook of Contemporary Issues* (L Balter, C Tamis-LeMonda, p. 493-520). New York.
- Bradley, R. H., Corwyn, R. F., McAdoo, H. P., & Coll, C. G. (2001). The Home Environments of Children in the United States Part I : Variations by Age, Ethnicity, and Poverty Status. *Child Development, 72*(6), 1844-1867. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.t01-1-00382>
- Braham, E. J., & Libertus, M. E. (2017). Intergenerational associations in numerical approximation and mathematical abilities. *Developmental Science, 20*(5), e12436. <https://doi.org/10.1111/desc.12436>
- Braveman, P. A., Cubbin, C., Egerter, S., Chideya, S., Marchi, K. S., Metzler, M., & Posner, S. (2005). Socioeconomic status in health research : One size does not fit all. *Jama, 294*(22), 2879-2888.
- Briars, D., & Larkin, J. H. (1984). An integrated model of skill in solving elementary word problems. *Cognition and Instruction, 1*(3), 245-296. https://doi.org/10.1207/s1532690xc0103_1
- Briars, D., & Siegler, R. S. (1984). A featural analysis of preschoolers' counting knowledge. *Developmental Psychology, 20*(4), 607.

- Brissiaud, R. (2011). *Comment les enfants apprennent à calculer*. Retz.
- Brito, N. H., & Noble, K. G. (2014). Socioeconomic status and structural brain development. *Frontiers in Neuroscience*, 8. <https://doi.org/10.3389/fnins.2014.00276>
- Brooks-Gunn, J., & Duncan, G. J. (1997). The effects of poverty on children. *The Future of Children*, 7(2), 55-71.
- Brougère, G. (2002). L'exception française : L'école maternelle face à la diversité des formes préscolaires. *Les Dossiers des Sciences de l'Éducation*, 7(1), 9-19. <https://doi.org/10.3406/dsedu.2002.971>
- Brown, T. T., & Jernigan, T. L. (2012). Brain development during the preschool years. *Neuropsychology review*, 22(4), 313-333.
- Bruner, J. (1990). *Acts of meaning*. Harvard university press.
- Bruner, J. S. (1965). The growth of mind. *American Psychologist*, 20(12), 1007.
- Buck, J., De Smedt, B., & Op de Beeck, H. P. (2014). Format-dependent representations of symbolic and non-symbolic numbers in the human cortex as revealed by multi-voxel pattern analyses. *NeuroImage*, 87, 311-322. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.10.049>
- Bugden, S., & Ansari, D. (2011). Individual differences in children's mathematical competence are related to the intentional but not automatic processing of Arabic numerals. *Cognition*, 118(1), 32-44. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.09.005>
- Bugden, S., Price, G. R., McLean, D. A., & Ansari, D. (2012). The role of the left intraparietal sulcus in the relationship between symbolic number processing and children's arithmetic competence. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2(4), 448-457. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2012.04.001>
- Bulthé, J., De Smedt, B., & Op de Beeck, H. P. (2015). Visual number beats abstract numerical magnitude : Format-dependent representation of Arabic digits and dot patterns in human parietal cortex. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 27(7), 1376-1387.
- Burgess, N., Maguire, E. A., & O'Keefe, J. (2002). The human hippocampus and spatial and episodic memory. *Neuron*, 35(4), 625-641.
- Burneo-Garcés, C., Cruz-Quintana, F., Pérez-García, M., Fernández-Alcántara, M., Fasfous, A., & Pérez-Marfil, M. N. (2019). Interaction between Socioeconomic Status and Cognitive Development in Children Aged 7, 9, and 11 Years : A Cross-Sectional Study. *Developmental Neuropsychology*, 44(1), 1-16. <https://doi.org/10.1080/87565641.2018.1554662>
- 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>
- Burris, P. W., Phillips, B. M., & Lonigan, C. J. (2019). Examining the Relations of the Home Literacy Environments of Families of Low SES with Children's Early Literacy Skills. *Journal of Education for Students Placed at Risk (JESPAR)*, 24(2), 154-173. <https://doi.org/10.1080/10824669.2019.1602473>
- Bus, A. G., IJzendoorn, M. H. van, & Pellegrini, A. D. (2016). Joint Book Reading Makes for Success in Learning to Read : A Meta-Analysis on Intergenerational Transmission of Literacy: *Review of Educational Research*. (Sage CA: Thousand Oaks, CA). <https://doi.org/10.3102/00346543065001001>
- Byrnes, J. P., & Wasik, B. A. (2009). Factors predictive of mathematics achievement in kindergarten, first and third grades : An opportunity-propensity analysis. *Contemporary Educational Psychology*, 34(2), 167-183. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2009.01.002>
- Caldwell, B. M., & Bradley, R. H. (1979). *Home observation for measurement of the environment*. University of Arkansas at Little Rock Little Rock.
- Callaghan, B. L., & Tottenham, N. (2016). The Stress Acceleration Hypothesis : Effects of early-life adversity on emotion circuits and behavior. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 7, 76-81. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2015.11.018>

- Camos, V. (2003a). Coordination process in counting. *International Journal of Psychology*, 38(1), 24-36. <https://doi.org/10.1080/00207590244000269>
- Camos, V. (2003b). Counting strategies from 5 years to adulthood : Adaptation to structural features. *European Journal of Psychology of Education*, 18(3), 251. <https://doi.org/10.1007/BF03173247>
- Camos, V., Fayol, M., Lacert, P., Bardi, A., & Laquière, C. (1998). Le dénombrement chez des enfants dysphasiques et des enfants dyspraxiques. *ANAE–Approche Neuropsychologique des Apprentissages de l’Enfant*, 48, 86-92.
- Campbell, J. I., & Penner-Wilger, M. (2006). Calculation latency : The μ of memory and the τ of transformation. *Memory & Cognition*, 34(1), 217-226.
- Campbell, J. I., & Xue, Q. (2001). Cognitive arithmetic across cultures. *Journal of Experimental Psychology: General*, 130(2), 299-315. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.130.2.299>
- Cankaya, O., & LeFevre, J.-A. (2016). The Home Numeracy Environment : What Do Cross-Cultural Comparisons Tell Us About How to Scaffold Young Children’s Mathematical Skills? In B. Blevins-Knabe & A. M. B. Austin (Éds.), *Early Childhood Mathematics Skill Development in the Home Environment* (p. 87-104). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43974-7_6
- Cannon, J., & Ginsburg, H. P. (2008). “Doing the Math” : Maternal Beliefs About Early Mathematics Versus Language Learning. *Early Education and Development*, 19(2), 238-260. <https://doi.org/10.1080/10409280801963913>
- Cantlon, J. F., Brannon, E. M., Carter, E. J., & Pelphrey, K. A. (2006). Functional Imaging of Numerical Processing in Adults and 4-y-Old Children. *PLOS Biology*, 4(5), e125. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0040125>
- Cantlon, J. F., & Li, R. (2013). Neural Activity during Natural Viewing of Sesame Street Statistically Predicts Test Scores in Early Childhood. *PLOS Biology*, 11(1), e1001462. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1001462>
- Cantlon, J. F., Platt, M. L., & Brannon, E. M. (2009). Beyond the number domain. *Trends in Cognitive Sciences*, 13(2), 83-91. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.11.007>
- Carey, E., Hill, F., Devine, A., & Szűcs, D. (2016). The chicken or the egg ? The direction of the relationship between mathematics anxiety and mathematics performance. *Frontiers in psychology*, 6, 1987.
- Caro, D. H., McDonald, J. T., & Willms, J. D. (2009). Socio-economic Status and Academic Achievement Trajectories from Childhood to Adolescence. *Canadian Journal of Education / Revue canadienne de l’éducation*, 32(3), 558-590.
- Carpenter, T. P., & Moser, J. M. (1984). The acquisition of addition and subtraction concepts in grades one through three. *Journal for research in Mathematics Education*, 15(3), 179-202.
- Casad, B. J., Hale, P., & Wachs, F. L. (2015). Parent-child math anxiety and math-gender stereotypes predict adolescents’ math education outcomes. *Frontiers in Psychology*, 6. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2015.01597>
- Cascella, C. (2020). Intersectional effects of Socioeconomic status, phase and gender on Mathematics achievement. *Educational Studies*, 46(4), 476-496. <https://doi.org/10.1080/03055698.2019.1614432>
- Case, R., Kurland, D. M., & Goldberg, J. (1982). Operational efficiency and the growth of short-term memory span. *Journal of Experimental Child Psychology*, 33(3), 386-404. [https://doi.org/10.1016/0022-0965\(82\)90054-6](https://doi.org/10.1016/0022-0965(82)90054-6)
- Casey, B. M., Lombardi, C. M., Thomson, D., Nguyen, H. N., Paz, M., Theriault, C. A., & Dearing, E. (2018). Maternal Support of Children’s Early Numerical Concept Learning Predicts Preschool and First-Grade Math Achievement. *Child Development*, 89(1), 156-173.

<https://doi.org/10.1111/cdev.12676>

Causa, O., & Hermansen, M. (2017). *Income redistribution through taxes and transfers across OECD countries*.

Chazoule, G., & Thevenot, C. (2018). Apprendre à manipuler les symboles numériques. In *Univers Psy. Psychologie cognitive des apprentissages scolaire. Apprendre à lire, écrire, compter*. (Dunod, p. 265-276). Dunod. Consulté à l'adresse <https://www-cairn-info.bibelec.univ-lyon2.fr/psychologie-cognitive-des-apprentissages-scolaires--9782100775569-page-265.htm>

Chen, Q., & Li, J. (2014). Association between individual differences in non-symbolic number acuity and math performance : A meta-analysis. *Acta psychologica, 148*, 163-172.

Cheung, S. K., Dulay, K. M., & McBride, C. (2020). Parents' characteristics, the home environment, and children's numeracy skills : How are they related in low- to middle-income families in the Philippines? *Journal of Experimental Child Psychology, 192*, 104780.

<https://doi.org/10.1016/j.jecp.2019.104780>

Cheung, S. K., Dulay, K. M., Yang, X., Mohseni, F., & McBride, C. (2021). Home Literacy and Numeracy Environments in Asia. *Frontiers in Psychology, 0*.

<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.578764>

Cheung, S. K., & Kwan, J. L. Y. (2021). Parents' perceived goals for early mathematics learning and their relations with children's motivation to learn mathematics. *Early Childhood Research Quarterly, 56*, 90-102. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2021.03.003>

Cheung, S. K., & McBride-Chang, C. (2015). Evaluation of a Parent Training Program for Promoting Filipino Young Children's Number Sense with Number Card Games. *Child Studies in Asia-Pacific Contexts, 5*(1), 39-49. <https://doi.org/10.5723/csac.2015.5.1.039>

Cheung, S. K., Yang, X., Dulay, K. M., & McBride, C. (2018). Family and individual variables associated with young Filipino children's numeracy interest and competence. *British Journal of Developmental Psychology, 36*(2), 334-353.

Chmielewski, A. K. (2019). The Global Increase in the Socioeconomic Achievement Gap, 1964 to 2015. *American Sociological Review, 84*(3), 517-544. <https://doi.org/10.1177/0003122419847165>

Cho, S., Metcalfe, A. W. S., Young, C. B., Ryali, S., Geary, D. C., & Menon, V. (2012). Hippocampal–Prefrontal Engagement and Dynamic Causal Interactions in the Maturation of Children's Fact Retrieval. *Journal of Cognitive Neuroscience, 24*(9), 1849-1866. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00246

Ciping, D., Silinskas, G., Wei, W., & Georgiou, G. K. (2015). Cross-lagged relationships between home learning environment and academic achievement in Chinese. *Early Childhood Research Quarterly, 33*, 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2015.05.001>

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>

Clements, D. H., Sarama, J., & Wolfe, C. B. (2011). *Tools for early assessment in math (TEAM). Teachers Guide*. Mc Graw Hill Education Series.

Cocks, H., Hutcheson, J., Michaelowa, K., Ro, K., Smith, T. M., Tamassia, C., ... Zhang, Y. (2003). Literacy skills for the world of tomorrow : Further results from PISA 2000. *Programme for International Student Assessment (PISA)*.

Cohen, J. (1992). A power primer. *Psychological Bulletin, 112*(1), 155-159. <https://doi.org/10.1037//0033-2909.112.1.155>

Cohen, Jacob. (2013). *Statistical power analysis for the behavioral sciences*. Academic press.

Cohen Kadosh, R., Cohen Kadosh, K., Kaas, A., Henik, A., & Goebel, R. (2007). Notation-Dependent and -Independent Representations of Numbers in the Parietal Lobes. *Neuron, 53*(2), 307-314. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.12.025>

- Cohen Kadosh, R., Lammertyn, J., & Izard, V. (2008). Are numbers special? An overview of chronometric, neuroimaging, developmental and comparative studies of magnitude representation. *Progress in Neurobiology*, 84(2), 132-147. <https://doi.org/10.1016/j.pneurobio.2007.11.001>
- Cohen, R., Delacourt, C., Gras-Le Guen, C., & Launay, E. (2020). COVID-19 and schools. Guidelines of the French Pediatric Society. *Archives de Pédiatrie*, 27(7), 388-392. <https://doi.org/10.1016/j.arcped.2020.09.001>
- Coleman, J. S. (1988). Social capital in the creation of human capital. *American journal of sociology*, 94, S95-S120.
- Coleman, P. K., & Karraker, K. H. (1998). Self-efficacy and parenting quality : Findings and future applications. *Developmental review*, 18(1), 47-85.
- Colmant, M., & Le Cam, M. (2020). TIMSS 2019–Évaluation internationale des élèves de CMI en mathématiques et en sciences : Les résultats de la France toujours en retrait.
- Conger, R. D., & Donnellan, M. B. (2007). An Interactionist Perspective on the Socioeconomic Context of Human Development. <https://doi-org.insb.bib.cnrs.fr/10.1146/annurev.psych.58.110405.085551>, *Annu. Rev. Psychol.*(58), 175-199. (world). <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.58.110405.085551>
- Connolly, A. J. (1998). *KeyMath Revised, NU: A Diagnostic Inventory of Essential Mathematics*. American Guidance Service.
- Connolly, A. J. (2007). *KeyMath 3 : Diagnostic assessment*. Pearson San Antonio, TX.
- Cortés Pascual, A., Moyano Muñoz, N., & Quílez Robres, A. (2019). The Relationship Between Executive Functions and Academic Performance in Primary Education : Review and Meta-Analysis. *Frontiers in Psychology*, 0. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2019.01582>
- Crane, J. (1996). Effects of Home Environment, SES, and Maternal Test Scores on Mathematics Achievement. *The Journal of Educational Research*, 89(5), 305-314. JSTOR. <https://doi.org/10.1080/00220671.1996.9941332>
- Crook, S. R., & Evans, G. W. (2014). The role of planning skills in the income-achievement gap. *Child Development*, 85(2), 405-411. <https://doi.org/10.1111/cdev.12129>
- Crosnoe, R., & Cooper, C. E. (2010). Economically Disadvantaged Children’s Transitions Into Elementary School : Linking Family Processes, School Contexts, and Educational Policy. *American Educational Research Journal*, 47(2), 258-291. <https://doi.org/10.3102/0002831209351564>
- Crosnoe, R., & Schneider, B. (2010). Social Capital, Information, and Socioeconomic Disparities in Math Coursework. *American journal of education (Chicago, Ill.)*, 117(1), 79-107. <https://doi.org/10.1086/656347>
- Cunha, F., & Heckman, J. (2007). The technology of skill formation. *American Economic Review*, 97(2), 31-47.
- Damarla, S. R., Cherkassky, V. L., & Just, M. A. (2016). Modality-independent representations of small quantities based on brain activation patterns. *Human Brain Mapping*, 37(4), 1296-1307. <https://doi.org/10.1002/hbm.23102>
- Daucourt, M. C., Napoli, A. R., Quinn, J. M., Wood, S. G., & Hart, S. A. (2021). The Home Math Environment and Children’s Math Achievement : A Meta-Analysis. *Psychological Bulletin*.
- Davis-Kean, P. E., Tighe, L. A., & Waters, N. E. (2021). The Role of Parent Educational Attainment in Parenting and Children’s Development. *Current Directions in Psychological Science*, 30(2), 186-192. <https://doi.org/10.1177/0963721421993116>
- De Keyser, L., Bakker, M., Rathé, S., Wijns, N., Torbeyns, J., Verschaffel, L., & De Smedt, B. (2020). No Association Between the Home Math Environment and Numerical and Patterning Skills in a Large and Diverse Sample of 5- to 6-year-olds. *Frontiers in Psychology*, 11, 547626. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.547626>
- De Smedt, B., Holloway, I. D., & Ansari, D. (2011). Effects of problem size and arithmetic

operation on brain activation during calculation in children with varying levels of arithmetical fluency. *NeuroImage*, 57(3), 771-781. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2010.12.037>

De Smedt, B., Noël, M.-P., Gilmore, C., & Ansari, D. (2013). How do symbolic and non-symbolic numerical magnitude processing skills relate to individual differences in children's mathematical skills? A review of evidence from brain and behavior. *Trends in Neuroscience and Education*, 2(2), 48-55. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2013.06.001>

De Smedt, B., Taylor, J., Archibald, L., & Ansari, D. (2010). How is phonological processing related to individual differences in children's arithmetic skills? *Developmental Science*, 13(3), 508-520. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2009.00897.x>

De Smedt, B., Verschaffel, L., & Ghesquière, P. (2009). The predictive value of numerical magnitude comparison for individual differences in mathematics achievement. *Journal of Experimental Child Psychology*, 103(4), 469-479. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.01.010>

De Visscher, A., Berens, S. C., Keidel, J. L., Noël, M.-P., & Bird, C. M. (2015). The interference effect in arithmetic fact solving: An fMRI study. *NeuroImage*, 116, 92-101. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2015.04.063>

Dearing, E., Casey, B. M., Ganley, C. M., Tillinger, M., Laski, E., & Montecillo, C. (2012). Young girls' arithmetic and spatial skills: The distal and proximal roles of family socioeconomics and home learning experiences. *Early Childhood Research Quarterly*, 27(3), 458-470. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2012.01.002>

de Chambrier, A.-F., Baye, A., Tinnes-Vigne, M., Tazouti, Y., Vlassis, J., Poncelet, D., ... Dierendonck, C. (2021). Enhancing children's numerical skills through a play-based intervention at kindergarten and at home: A quasi-experimental study. *Early Childhood Research Quarterly*, 54, 164-178. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2020.09.003>

Decker, A. L., Duncan, K., Finn, A. S., & Mabbott, D. J. (2020). Children's family income is associated with cognitive function and volume of anterior not posterior hippocampus. *Nature Communications*, 11(1), 4040. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17854-6>

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. (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. <https://doi.org/10.1162/jocn.1993.5.4.390>

Dehaene, S., & Cohen, L. (1997). Cerebral pathways for calculation: Double dissociation between rote verbal and quantitative knowledge of arithmetic. *Cortex*, 33(2), 219-250.

Dehaene, S., & Cohen, L. (2007). Cultural Recycling of Cortical Maps. *Neuron*, 56(2), 384-398. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2007.10.004>

Dehaene, S., & Cohen, L. (2011). The unique role of the visual word form area in reading. *Trends in Cognitive Sciences*, 15(6), 254-262. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2011.04.003>

Dehaene, S., Dehaene-Lambertz, G., & Cohen, L. (1998). Abstract representations of numbers in the animal and human brain. *Trends in Neurosciences*, 21(8), 355-361. [https://doi.org/10.1016/S0166-2236\(98\)01263-6](https://doi.org/10.1016/S0166-2236(98)01263-6)

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

Dehaene, S., Izard, V., Spelke, E., & Pica, P. (2008). Log or Linear? Distinct Intuitions of the Number Scale in Western and Amazonian Indigene Cultures. *Science*, 320(5880), 1217-1220.

<https://doi.org/10.1126/science.1156540>

Dehaene, S., Molko, N., Cohen, L., & Wilson, A. J. (2004). Arithmetic and the brain. *Current Opinion in Neurobiology*, 14(2), 218-224. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2004.03.008>

Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20(3), 487-506. <https://doi.org/10.1080/02643290244000239>

Dehaene, S., Spelke, Pinel, P., Stanescu, R., & Tsivkin, S. (1999). Sources of Mathematical Thinking : Behavioral and Brain-Imaging Evidence. *Science*, 284(5416), 970-974. <https://doi.org/10.1126/science.284.5416.970>

Demaison, C., Grivet, L., Lesdos, C., & Maury-Duprey, D. (2020). France, portrait social. Edition 2020. *Insee Reference*.

Demaison, C., Grivet, L., Maury-Duprey, D., & Mayo-Simbsler, S. (2017). France, portrait social. Edition 2017. *Insee Reference*.

Demir, Ö. E., Prado, J., & Booth, J. R. (2014). The differential role of verbal and spatial working memory in the neural basis of arithmetic. *Developmental Neuropsychology*, 39(6), 440-458. <https://doi.org/10.1080/87565641.2014.939182>

Demir, Ö. E., Prado, J., & Booth, J. R. (2015). Parental Socioeconomic Status and the Neural Basis of Arithmetic : Differential Relations to Verbal and Visuo-spatial Representations. *Developmental science*, 18(5), 799-814. <https://doi.org/10.1111/desc.12268>

Demir-Lira, Ö. E., Prado, J., & Booth, J. R. (2016). Neural Correlates of Math Gains Vary Depending on Parental Socioeconomic Status (SES). *Frontiers in Psychology*, 7. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00892>

DePascale, M., Prather, R., & Ramani, G. B. (2021). Parent and child spontaneous focus on number, mathematical abilities, and mathematical talk during play activities. *Cognitive Development*, 59, 101076. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2021.101076>

Desoete, A., & Grégoire, J. (2006). Numerical competence in young children and in children with mathematics learning disabilities. *Learning and Individual Differences*, 16(4), 351-367. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2006.12.006>

Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology*, 64, 135-168. <https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>

Dilnot, J., Hamilton, L., Maughan, B., & Snowling, M. J. (2017). Child and environmental risk factors predicting readiness for learning in children at high risk of dyslexia. *Development and Psychopathology*, 29(1), 235-244. <https://doi.org/10.1017/S0954579416000134>

Dilworth-Bart, J. E. (2012). Does executive function mediate SES and home quality associations with academic readiness? *Early Childhood Research Quarterly*, 27(3), 416-425. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2012.02.002>

Dirks, E., Spyer, G., van Lieshout, E. C., & de Sonneville, L. (2008). Prevalence of combined reading and arithmetic disabilities. *Journal of learning disabilities*, 41(5), 460-473.

Domahs, F., Krinzinger, H., & Willmes, K. (2008). Mind the gap between both hands : Evidence for internal finger-based number representations in children's mental calculation. *Cortex*, 44(4), 359-367. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2007.08.001>

Douglas, A.-A., Zippert, E. L., & Rittle-Johnson, B. (2019). Parent-Child Talk about Early Numeracy : The Role of Context and Parents' Math Beliefs. *Iris Journal of Scholarship*, 1, 48-68. <https://doi.org/10.15695/iris.v1i0.4659>

Dowker, A. (1996). Estimation strategies of four groups. *Mathematical cognition*, 2(2), 113-135.

Dowker, A. (2008). Individual differences in numerical abilities in preschoolers. *Developmental Science*, 11(5), 650-654. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00713.x>

Dowker, A. (2021). Home Numeracy and Preschool Children's Mathematical Development : Expanding Home Numeracy Models to Include Parental Attitudes and Emotions. *Frontiers in*

Education, 0. <https://doi.org/10.3389/feduc.2021.575664>

Dowker, A., Sarkar, A., & Looi, C. Y. (2016). Mathematics Anxiety : What Have We Learned in 60 Years? *Frontiers in Psychology*, 7, 508. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.00508>

Duffau, H., Denvil, D., Lopes, M., Gasparini, F., Cohen, L., Capelle, L., & Van Effenterre, R. (2002). Intraoperative mapping of the cortical areas involved in multiplication and subtraction : An electrostimulation study in a patient with a left parietal glioma. *Journal of Neurology, Neurosurgery, and Psychiatry*, 73(6), 733-738. <https://doi.org/10.1136/jnnp.73.6.733>

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. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.43.6.1428>

Duncan, G. J., & Magnuson, K. (2011). The nature and impact of early achievement skills, attention and behavior problems. *Restoring Opportunity: The Crisis of Inequality and the Challenge for American Education*, 47-69.

Duncan, G. J., & Magnuson, K. (2012). Socioeconomic status and cognitive functioning : Moving from correlation to causation. *Wiley Interdisciplinary Reviews. Cognitive Science*, 3(3), 377-386. <https://doi.org/10.1002/wcs.1176>

Duncan, G. J., Morris, P. A., & Rodrigues, C. (2011). Does Money Really Matter? Estimating Impacts of Family Income on Young Children's Achievement With Data From Random-Assignment Experiments. *Developmental psychology*, 47(5), 1263-1279. <https://doi.org/10.1037/a0023875>

Dunn, L. M., & Dunn, D. M. (2007). *PPVT-4 : Peabody picture vocabulary test*. Pearson Assessments.

Dunst, C. J., Hamby, D. W., Wilkie, H., & Dunst, K. S. (2017). Meta-Analysis of the Relationship Between Home and Family Experiences and Young Children's Early Numeracy Learning. In S. Phillipson, A. Gervasoni, & P. Sullivan (Éds.), *Engaging Families as Children's First Mathematics Educators : International Perspectives* (p. 105-125). Singapore: Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-2553-2_7

Durham, R. E., Farkas, G., Hammer, C. S., Bruce Tomblin, J., & Catts, H. W. (2007). Kindergarten oral language skill : A key variable in the intergenerational transmission of socioeconomic status. *Research in Social Stratification and Mobility*, 25(4), 294-305. <https://doi.org/10.1016/j.rssm.2007.03.001>

Duru-Bellat, M., Farges, G., & van Zanten, A. (2018a). Chapitre 2. Les inégalités de carrières dans le système scolaire français. In *U. Sociologie de l'école* (p. 35-56). Paris: Armand Colin. Cairn.info. <https://doi.org/10.3917/arco.zante.2018.01.0035>

Duru-Bellat, M., Farges, G., & van Zanten, A. (2018b). Chapitre 8. Les pratiques éducatives des familles. In *U. Sociologie de l'école* (p. 181-205). Paris: Armand Colin. Cairn.info. <https://doi.org/10.3917/arco.zante.2018.01.0181>

Eccles, J. S., & Harold, R. D. (1996). Family involvement in children's and adolescents' schooling. In *Family-school links : How do they affect educational outcomes?* (p. 3-34). Hillsdale, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates, Inc.

Edwards, L. A., Wagner, J. B., Simon, C. E., & Hyde, D. C. (2016). Functional brain organization for number processing in pre-verbal infants. *Developmental science*, 19(5), 757-769.

Eger, E., Sterzer, P., Russ, M. O., Giraud, A.-L., & Kleinschmidt, A. (2003). A Supramodal Number Representation in Human Intraparietal Cortex. *Neuron*, 37(4), 719-726. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(03\)00036-9](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(03)00036-9)

Eichenbaum, H. (2000). A cortical-hippocampal system for declarative memory. *Nature Reviews Neuroscience*, 1(1), 41-50.

Eichenbaum, H., & Cohen, N. J. (2014). Can we reconcile the declarative memory and spatial navigation views on hippocampal function? *Neuron*, 83(4), 764-770.

- Elardo, R., Bradley, R., & Caldwell, B. M. (1977). A Longitudinal Study of the Relation of Infants' Home Environments to Language Development at Age Three. *Child Development*, 48(2), 595-603. <https://doi.org/10.2307/1128658>
- Elder Jr, G. H. (1998). The life course as developmental theory. *Child development*, 69(1), 1-12.
- Elliot, A. J., & Thrash, T. M. (2004). The intergenerational transmission of fear of failure. *Personality and Social Psychology Bulletin*, 30(8), 957-971.
- Elliott, C. D., Smith, P., & McCulloch, K. (1996). *British ability scales (BAS II) : Full Age range*. nfer-nelson.
- Elliott, L., & Bachman, H. J. (2018a). How Do Parents Foster Young Children's Math Skills? *Child Development Perspectives*, 12(1), 16-21. <https://doi.org/10.1111/cdep.12249>
- Elliott, L., & Bachman, H. J. (2018b). Parents' educational beliefs and children's early academics : Examining the role of SES. *Children and Youth Services Review*, 91, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.childyouth.2018.05.022>
- Elliott, L., & Bachman, H. J. (2018c). SES disparities in early math abilities : The contributions of parents' math cognitions, practices to support math, and math talk. *Developmental Review*, 49, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2018.08.001>
- Elliott, L., Bachman, H. J., & Henry, D. A. (2020). Why and how parents promote math learning with their young children : A mixed-methods investigation. *Parenting*, 20(2), 108-140.
- Elliott, L., Braham, E. J., & Libertus, M. E. (2017). Understanding sources of individual variability in parents' number talk with young children. *Journal of Experimental Child Psychology*, 159, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2017.01.011>
- Else-Quest, N. M., Hyde, J. S., & Linn, M. C. (2010). Cross-national patterns of gender differences in mathematics : A meta-analysis. *Psychological bulletin*, 136(1), 103.
- Emerson, R. W., & Cantlon, J. F. (2012). Early math achievement and functional connectivity in the fronto-parietal network. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 2, S139-S151. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2011.11.003>
- Ericsson, K. A., & Simon, H. A. (1980). Verbal reports as data. *Psychological Review*, 87(3), 215-251. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.87.3.215>
- Evans, G. W. (2004). The environment of childhood poverty. *The American Psychologist*, 59(2), 77-92. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.59.2.77>
- Evans, M. A., Shaw, D., & Bell, M. (2000). Home literacy activities and their influence on early literacy skills. *Canadian Journal of Experimental Psychology = Revue Canadienne De Psychologie Experimentale*, 54(2), 65-75.
- Evans, T. M., Flowers, D. L., Napoliello, E. M., Olulade, O. A., & Eden, G. F. (2014). The functional anatomy of single-digit arithmetic in children with developmental dyslexia. *NeuroImage*, 101, 644-652. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2014.07.028>
- Fan, X., & Chen, M. (2001). Parental Involvement and Students' Academic Achievement : A Meta-Analysis. *Educational Psychology Review*, 13(1), 1-22. <https://doi.org/10.1023/A:1009048817385>
- Farah, M. J. (2017). The Neuroscience of Socioeconomic Status : Correlates, Causes, and Consequences. *Neuron*, 96(1), 56-71. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.08.034>
- Farah, M. J. (2018). Socioeconomic status and the brain : Prospects for neuroscience-informed policy. *Nature Reviews Neuroscience*, 19(7), 428-438. <https://doi.org/10.1038/s41583-018-0023-2>
- Farah, M. J., Betancourt, L., Shera, D. M., Savage, J. H., Giannetta, J. M., Brodsky, N. L., ... Hurt, H. (2008). Environmental stimulation, parental nurturance and cognitive development in humans. *Developmental Science*, 11(5), 793-801. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00688.x>
- Farah, M. J., Shera, D. M., Savage, J. H., Betancourt, L., Giannetta, J. M., Brodsky, N. L., ... Hurt, H. (2006). Childhood poverty : Specific associations with neurocognitive development. *Brain*

- Research*, 1110(1), 166-174. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2006.06.072>
- Farver, J. A. M., Xu, Y., Eppe, S., & Lonigan, C. J. (2006). Home environments and young Latino children's school readiness. *Early Childhood Research Quarterly*, 21(2), 196-212. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2006.04.008>
- Fayol, M. (2018a). Chapitre II. Quantifier. *Que sais-je?*, 3e éd., 39-72.
- Fayol, M. (2018b). Chapitre III. Genèse et mise en œuvre des opérations. *Que sais-je?*, 3e éd., 73-96.
- Fayol, M., & Thevenot, C. (2012). The use of procedural knowledge in simple addition and subtraction problems. *Cognition*, 123(3), 392-403. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2012.02.008>
- Fazio, B. B. (1996). Mathematical abilities of children with specific language impairment : A 2-year follow-up. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 39(4), 839-849.
- Fazio, B. B. (1999). Arithmetic calculation, short-term memory, and language performance in children with specific language impairment : A 5-year follow-up. *Journal of Speech, Language, and Hearing Research*, 42(2), 420-431.
- 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>
- Fernald, L. C. H., Weber, A., Galasso, E., & Ratsifandrihamanana, L. (2011). Socioeconomic gradients and child development in a very low income population : Evidence from Madagascar. *Developmental Science*, 14(4), 832-847. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2010.01032.x>
- Ferrand, L., Riggs, K. J., & Castronovo, J. (2010). Subitizing in congenitally blind adults. *Psychonomic Bulletin & Review*, 17(6), 840-845. <https://doi.org/10.3758/PBR.17.6.840>
- Fias, W., Lammertyn, J., Reynvoet, B., Dupont, P., & Orban, G. A. (2003). Parietal Representation of Symbolic and Nonsymbolic Magnitude. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 15(1), 47-56. <https://doi.org/10.1162/089892903321107819>
- Fias, W., & Pesenti, M. (2004). Le modèle du Triple Code de Dehaene. In *La cognition numérique* (p. 69-94). Hermes Science Publications. Consulté à l'adresse <http://hdl.handle.net/1854/LU-294590>
- Fias, W., Reynvoet, B., & Brysbaert, M. (2001). Are Arabic numerals processed as pictures in a Stroop interference task? *Psychological Research*, 65(4), 242-249. <https://doi.org/10.1007/s004260100064>
- Fischer, J.-P. (2011). Nouveaux éclairages sur l'écriture en miroir des enfants de l'école maternelle. *Revue française de pédagogie*, n° 175(2), 99-112.
- Fitzpatrick, C., McKinnon, R. D., Blair, C. B., & Willoughby, M. T. (2014). Do preschool executive function skills explain the school readiness gap between advantaged and disadvantaged children? *Learning and Instruction*, 30, 25-31. <https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2013.11.003>
- Fletcher, K. L., & Reese, E. (2005). Picture book reading with young children : A conceptual framework. *Developmental review*, 25(1), 64-103.
- Fourneret, P. (2018). Introduction aux troubles des apprentissages. In P. Fourneret & D. Da Fonseca (Éds.), *Les enfants Dys* (Elsevier Masson).
- Foy, J. G., & Mann, V. (2003). Home literacy environment and phonological awareness in preschool children : Differential effects for rhyme and phoneme awareness. *Applied Psycholinguistics*, 24(1), 59-88. <https://doi.org/10.1017/S0142716403000043>
- Friedel, J. M., Cortina, K. S., Turner, J. C., & Midgley, C. (2007). Achievement goals, efficacy beliefs and coping strategies in mathematics : The roles of perceived parent and teacher goal emphases. *Contemporary Educational Psychology*, 32(3), 434-458.
- Frodl, T., & O'Keane, V. (2013). How does the brain deal with cumulative stress? A review with focus on developmental stress, HPA axis function and hippocampal structure in humans. *Neurobiology of Disease*, 52, 24-37. <https://doi.org/10.1016/j.nbd.2012.03.012>

- Fuchs, L. S., Fuchs, D., Compton, D. L., Powell, S. R., Seethaler, P. M., Capizzi, A. M., ... Fletcher, J. M. (2006). The cognitive correlates of third-grade skill in arithmetic, algorithmic computation, and arithmetic word problems. *Journal of Educational Psychology, 98*(1), 29.
- Fuson, K. C. (1982). An Analysis of the Counting-On Solution Procedure in Addition. In *Addition and Subtraction : A cognitive perspective* (p. 67-81). Routledge.
- Fuson, K. C., & Mierkiewicz, D. (1980). A detailed analysis of the act of counting. *Annual meeting of the American Educational Research Association, Boston*.
- Fuson, K. C., Richards, J., & Briars, D. (1982). The Acquisition and Elaboration of the Number Word Sequence. In C. J. Brainerd (Éd.), *Children's Logical and Mathematical Cognition : Progress in Cognitive Development Research* (p. 33-92). New York, NY: Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4613-9466-2_2
- Gaillard, F. (2000). *Numerical. Test neurocognitif pour l'apprentissage du nombre et du calcul*. Lausanne, Suivi: Institut de psychologie Université de Lausanne.
- Galindo, C., & Sonnenschein, S. (2015). Decreasing the SES math achievement gap : Initial math proficiency and home learning environments. *Contemporary Educational Psychology, 43*, 25-38. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2015.08.003>
- Gallistel, C. R., & Gelman, R. (1992). Preverbal and verbal counting and computation. *Cognition, 44*(1-2), 43-74.
- Gamo, S., Taabane, L., & Sander, E. (2011). Rôle de la nature des variables dans la résolution de problèmes additifs complexes. *L'Année psychologique, Vol. 111*(4), 613-640.
- Garon-Carrier, G., Boivin, M., Lemelin, J.-P., Kovas, Y., Parent, S., Séguin, J. R., ... 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., Willis, C. S., Baddeley, A. D., & Emslie, H. (1994). The children's test of nonword repetition : A test of phonological working memory. *Memory, 2*(2), 103-127.
- Geary, D. C., Frensch, P. A., & Wiley, J. G. (1993). Simple and complex mental subtraction : Strategy choice and speed-of-processing differences in younger and older adults. *Psychology and aging, 8*(2), 242.
- 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>
- Gebuis, T., Kadosh, R. C., & Gevers, W. (2017). Why try saving the ANS? An alternative proposal. *Behavioral and Brain Sciences, 40*.
- Gelman, R., & Gallistel, C. R. (1978). *The child's understanding of number*. Cambridge, Massachussets: MA Harvard University Press.
- Gentaz, É., & Mazens, K. (2006). Les nouveau-nés sont-ils capables de voir avec leurs mains ou de toucher avec leurs yeux ? *Devenir, Vol. 18*(3), 263-281.
- Gershon, R. C., Cook, K. F., Mungas, D., Manly, J. J., Slotkin, J., Beaumont, J. L., & Weintraub, S. (2014). Language measures of the NIH toolbox cognition battery. *Journal of the International Neuropsychological Society, 20*(6), 642-651.
- Giallo, R., Treyvaud, K., Cooklin, A., & Wade, C. (2013). Mothers' and fathers' involvement in home activities with their children : Psychosocial factors and the role of parental self-efficacy. *Early Child Development and Care, 183*(3-4), 343-359.
- Gibson, D. J., Gunderson, E. A., & Levine, S. C. (2020). Causal Effects of Parent Number Talk on Preschoolers' Number Knowledge. *Child development*.
- Gilgoff, R., Singh, L., Koita, K., Gentile, B., & Marques, S. S. (2020). Adverse Childhood Experiences, Outcomes, and Interventions. *Pediatric Clinics, 67*(2), 259-273.

<https://doi.org/10.1016/j.pcl.2019.12.001>

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

Gilmore, C. K., McCarthy, S. E., & Spelke, E. S. (2010). Non-symbolic arithmetic abilities and mathematics achievement in the first year of formal schooling. *Cognition*, *115*(3), 394-406. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.02.002>

Ginsburg, H. P., & Baroody, A. J. (1990). *TEMA-2 : Test of early mathematics ability*. Pro-Ed.

Ginsburg, H. P., & Baroody, A. J. (2003). *Test of early math ability*. Austin, TX: Pro-Ed.

Ginsburg, H. P., & Pappas, S. (2004). SES, ethnic, and gender differences in young children's informal addition and subtraction : A clinical interview investigation. *Journal of Applied Developmental Psychology*, *25*, 171-192. <https://doi.org/10.1016/j.appdev.2004.02.003>

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

Glenn, D. E., Demir-Lira, Ö. E., Gibson, D. J., Congdon, E. L., & Levine, S. C. (2017). Resilience in mathematics after early brain injury : The roles of parental input and early plasticity. *Developmental Cognitive Neuroscience*. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.07.005>

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>

Goffin, C., Vogel, S. E., Slipenkyj, M., & Ansari, D. (2020). A comes before B, like 1 comes before 2. Is the parietal cortex sensitive to ordinal relationships in both numbers and letters? An fMRI-adaptation study. *Human Brain Mapping*, *41*(6), 1591-1610. <https://doi.org/10.1002/hbm.24897>

Goldman, R., & Fristoe, M. (1986). *Goldman Fristoe test of articulation*. American Guidance Service.

Grabner, R. H., Ansari, D., Koschutnig, K., Reishofer, G., Ebner, F., & Neuper, C. (2009). To retrieve or to calculate? Left angular gyrus mediates the retrieval of arithmetic facts during problem solving. *Neuropsychologia*, *47*(2), 604-608. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2008.10.013>

Grabner, R. H., Ansari, D., Reishofer, G., Stern, E., Ebner, F., & Neuper, C. (2007). Individual differences in mathematical competence predict parietal brain activation during mental calculation. *NeuroImage*, *38*(2), 346-356. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.07.041>

Grabner, R. H., & De Smedt, B. (2011). Neurophysiological evidence for the validity of verbal strategy reports in mental arithmetic. *Biological Psychology*, *87*(1), 128-136. <https://doi.org/10.1016/j.biopsycho.2011.02.019>

Grégoire, J. (2009). *L'examen clinique de l'intelligence de l'enfant : Fondements et pratique du WISC-IV*. Editions Mardaga.

Grill-Spector, K., & Malach, R. (2001). fMR-adaptation : A tool for studying the functional properties of human cortical neurons. *Acta Psychologica*, *107*(1-3), 293-321. [https://doi.org/10.1016/s0001-6918\(01\)00019-1](https://doi.org/10.1016/s0001-6918(01)00019-1).

Groen, G., & Parkman, J. M. (1972). A chronometric analysis of simple addition. *Psychological Review*, *79*(4), 329-343. <https://doi.org/10.1037/h0032950>

Groen, G., & Resnick, L. B. (1977). Can preschool children invent addition algorithms? *Journal of Educational Psychology*, *69*(6), 645-652. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.69.6.645>

Gros, H., Thibaut, J.-P., & Sander, E. (2021). What we count dictates how we count : A tale of two encodings. *Cognition*, *212*, 104665. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2021.104665>

Gruber, O., Indefrey, P., Steinmetz, H., & Kleinschmidt, A. (2001). Dissociating Neural Correlates of Cognitive Components in Mental Calculation. *Cerebral Cortex*, *11*(4), 350-359. <https://doi.org/10.1093/cercor/11.4.350>

Guillaume, M., Poncin, A., Schiltz, C., & Van Rinsveld, A. (2020). Measuring spontaneous and automatic processing of magnitude and parity information of Arabic digits by frequency-tagging EEG. *Scientific Reports*, *10*(1), 22254. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79404-w>

Gunderson, E. A., & Levine, S. C. (2011). Some types of parent number talk count more than others : Relations between parents' input and children's cardinal-number knowledge. *Developmental Science*, *14*(5), 1021-1032. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2011.01050.x>

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

Gustafsson, J.-E., Nilsen, T., & Hansen, K. Y. (2018). School characteristics moderating the relation between student socio-economic status and mathematics achievement in grade 8. Evidence from 50 countries in TIMSS 2011. *Studies in Educational Evaluation*, *57*, 16-30. <https://doi.org/10.1016/j.stueduc.2016.09.004>

Hackman, D. A., & Farah, M. J. (2009). Socioeconomic status and the developing brain. *Trends in Cognitive Sciences*, *13*(2), 65-73. <https://doi.org/10.1016/j.tics.2008.11.003>

Hackman, D. A., Farah, M. J., & Meaney, M. J. (2010). Socioeconomic status and the brain : Mechanistic insights from human and animal research. *Nature reviews. Neuroscience*, *11*(9), 651-659. <https://doi.org/10.1038/nrn2897>

Hackman, D. A., Gallop, R., Evans, G. W., & Farah, M. J. (2015). Socioeconomic status and executive function : Developmental trajectories and mediation. *Developmental Science*, *18*(5), 686-702. <https://doi.org/10.1111/desc.12246>

Hagoort, P. (2014). Nodes and networks in the neural architecture for language : Broca's region and beyond. *Current Opinion in Neurobiology*, *28*, 136-141. <https://doi.org/10.1016/j.conb.2014.07.013>

Hair, N. L., Hanson, J. L., Wolfe, B. L., & Pollak, S. D. (2015). Association of Child Poverty, Brain Development, and Academic Achievement. *JAMA Pediatrics*, *169*(9), 822-829. <https://doi.org/10.1001/jamapediatrics.2015.1475>

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.

Halberda, J., Ly, R., Wilmer, J. B., Naiman, D. Q., & Germine, L. (2012). Number sense across the lifespan as revealed by a massive Internet-based sample. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *109*(28), 11116-11120.

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

Hamilton, L. G., Hayiou-Thomas, M. E., Hulme, C., & Snowling, M. J. (2016). The Home Literacy Environment as a Predictor of the Early Literacy Development of Children at Family-Risk of Dyslexia. *Scientific Studies of Reading*, *20*(5), 401-419. <https://doi.org/10.1080/10888438.2016.1213266>

Hanner, E., Braham, E. J., Elliott, L., & Libertus, M. E. (2019). Promoting Math Talk in Adult-Child Interactions Through Grocery Store Signs. *Mind, Brain, and Education*, *13*(2), 110-118. <https://doi.org/10.1111/mbe.12195>

Hanson, J. L., Chandra, A., Wolfe, B. L., & Pollak, S. D. (2011). Association between income and the hippocampus. *PloS one*, *6*(5), e18712.

Hanson, J. L., Hair, N., Shen, D. G., Shi, F., Gilmore, J. H., Wolfe, B. L., & Pollak, S. D. (2013). Family poverty affects the rate of human infant brain growth. *PloS One*, *8*(12), e80954. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0080954>

Harden, K. P., Domingue, B. W., Belsky, D. W., Boardman, J. D., Crosnoe, R., Malanchini, M., ... Harris, K. M. (2020). Genetic associations with mathematics tracking and persistence in secondary school. *Npj Science of Learning*, 5(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41539-020-0060-2>

Hart, B., & Risley, T. R. (1995). *Meaningful differences in the everyday experience of young American children*. Baltimore, MD, US: Paul H Brookes Publishing.

Hart, S. A., Ganley, C. M., & Purpura, D. J. (2016). Understanding the Home Math Environment and Its Role in Predicting Parent Report of Children's Math Skills. *PLOS ONE*, 11(12), e0168227. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0168227>

Hart, S. A., Little, C., & Bergen, E. van. (2021). Nurture might be nature : Cautionary tales and proposed solutions. *Npj Science of Learning*, 6(1), 1-12. <https://doi.org/10.1038/s41539-020-00079-z>

Hauser, R. M. (1994). Measuring Socioeconomic Status in Studies of Child Development. *Child Development*, 65(6), 1541-1545. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1994.tb00834.x>

Haworth, C. M. A., Davis, O. S. P., & Plomin, R. (2013). Twins Early Development Study (TEDS) : A Genetically Sensitive Investigation of Cognitive and Behavioral Development From Childhood to Young Adulthood. *Twin Research and Human Genetics*, 16(1), 117-125. <https://doi.org/10.1017/thg.2012.91>

Heckman, J. J. (2006). Skill Formation and the Economics of Investing in Disadvantaged Children. *Science*, 312(5782), 1900-1902. <https://doi.org/10.1126/science.1128898>

Heim, A. (2018). *Quand la scolarisation à 2 ans n'a pas les effets attendus : Leçons des méthodes d'évaluation*.

Henik, A., & Tzelgov, J. (1982). Is three greater than five : The relation between physical and semantic size in comparison tasks. *Memory & Cognition*, 10(4), 389-395. <https://doi.org/10.3758/BF03202431>

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>

Hollingshead, A. B. (1975). *Four Factor Index of Social Status (Yale J Sociol)*.

Holloway, I. D., & Ansari, D. (2009). Mapping numerical magnitudes onto symbols : The numerical distance effect and individual differences in children's mathematics achievement. *Journal of experimental child psychology*, 103(1), 17-29.

Holloway, I. D., & Ansari, D. (2010). Developmental specialization in the right intraparietal sulcus for the abstract representation of numerical magnitude. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 22(11), 2627-2637. <https://doi.org/10.1162/jocn.2009.21399>

Holloway, I. D., Battista, C., Vogel, S. E., & Ansari, D. (2013). Semantic and perceptual processing of number symbols : Evidence from a cross-linguistic fMRI adaptation study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 25(3), 388-400. https://doi.org/10.1162/jocn_a_00323

Hood, M., Conlon, E., & Andrews, G. (2008). Preschool home literacy practices and children's literacy development : A longitudinal analysis. *Journal of Educational Psychology*, 100(2), 252-271. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.100.2.252>

Hornburg, C. B., Borriello, G. A., Kung, M., Lin, J., Litkowski, E., Cosso, J., ... Purpura, D. J. (2021). Next directions in measurement of the home mathematics environment : An international and interdisciplinary perspective. *UMBC Faculty Collection*. <https://doi.org/10.5964/jnc.6143>

Huang, Q., Zhang, X., Liu, Y., Yang, W., & Song, Z. (2017). The contribution of parent-child numeracy activities to young Chinese children's mathematical ability. *The British Journal of Educational Psychology*, 87(3), 328-344. <https://doi.org/10.1111/bjep.12152>

Hunt, J. M. (1961). *Intelligence and experience*. Oxford, England: Ronald.

Huntley-Fenner, G., & Cannon, E. (2000). Preschoolers' magnitude comparisons are mediated by a preverbal analog mechanism. *Psychological Science, 11*(2), 147-152. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00230>

Huntsinger, C. S., Jose, P. E., & Larson, S. L. (1998). Do parent practices to encourage academic competence influence the social adjustment of young European American and Chinese American children? *Developmental Psychology, 34*(4), 747.

Huntsinger, C. S., Jose, P. E., Larson, S. L., Krieg, D. B., & Shaligram, C. (2000). Mathematics, Vocabulary, and Reading Development in Chinese American and European American Children over the Primary School Years. *Journal of Educational Psychology, 92*(4), 745-760.

Huntsinger, C. S., Jose, P. E., & Luo, Z. (2016). Parental facilitation of early mathematics and reading skills and knowledge through encouragement of home-based activities. *Early Childhood Research Quarterly, 37*(Supplement C), 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2016.02.005>

Hurewitz, F., Gelman, R., & Schnitzer, B. (2006). Sometimes area counts more than number. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 103*(51), 19599-19604.

Hurford, J. R. (2011). *The linguistic theory of numerals* (Vol. 16). Cambridge University Press.

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>

Hutton, J. S., Horowitz-Kraus, T., Mendelsohn, A. L., DeWitt, T., Holland, S. K., & Consortium, the C.-M. A. (2015). Home Reading Environment and Brain Activation in Preschool Children Listening to Stories. *Pediatrics, 136*(3), 466-478. <https://doi.org/10.1542/peds.2015-0359>

Hyde, D. C., Khanum, S., & Spelke, E. S. (2014). Brief non-symbolic, approximate number practice enhances subsequent exact symbolic arithmetic in children. *Cognition, 131*(1), 92-107. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.12.007>

Immordino-Yang, M. H., Darling-Hammond, L., & Krone, C. R. (2019). Nurturing Nature : How Brain Development Is Inherently Social and Emotional, and What This Means for Education. *Educational Psychologist, 54*(3), 185-204. <https://doi.org/10.1080/00461520.2019.1633924>

Insee. (2021). Enquête emploi en continue, 2020. *Insee*.

Isaacs, J., & Magnuson, K. (2011). Income and education as predictors of children's school readiness. *Washington, DC: Brookings Institution*.

Ischebeck, A., Zamarian, L., Egger, K., Schocke, M., & Delazer, M. (2007). Imaging early practice effects in arithmetic. *NeuroImage, 36*(3), 993-1003. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.03.051>

Ivrendi, A. (2011). Influence of Self-Regulation on the Development of Children's Number Sense. *Early Childhood Education Journal, 39*(4), 239. <https://doi.org/10.1007/s10643-011-0462-0>

Izard, V., Dehaene-Lambertz, G., & Dehaene, S. (2008). Distinct Cerebral Pathways for Object Identity and Number in Human Infants. *PLOS Biology, 6*(2), e11. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.0060011>

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>

Jæger, M. M., & Blaabæk, E. H. (2020). Inequality in learning opportunities during Covid-19 : Evidence from library takeout. *Research in Social Stratification and Mobility, 68*, 100524. <https://doi.org/10.1016/j.rssm.2020.100524>

Jednoróg, K., Altarelli, I., Monzalvo, K., Fluss, J., Dubois, J., Billard, C., ... Ramus, F. (2012). The influence of socioeconomic status on children's brain structure. *PloS One, 7*(8), e42486. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0042486>

Jeynes, W. H. (2005). A Meta-Analysis of the Relation of Parental Involvement to Urban

Elementary School Student Academic Achievement. *Urban Education*, 40(3), 237-269.
<https://doi.org/10.1177/0042085905274540>

Johnson, S. B., Riis, J. L., & Noble, K. G. (2016). State of the Art Review : Poverty and the Developing Brain. *Pediatrics*, 137(4), e20153075. <https://doi.org/10.1542/peds.2015-3075>

Jordan, K. E., & Brannon, E. M. (2006). The multisensory representation of number in infancy. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 103(9), 3486-3489. <https://doi.org/10.1073/pnas.0508107103>

Jordan, N. C., Hanich, L. B., & Kaplan, D. (2003). A longitudinal study of mathematical competencies in children with specific mathematics difficulties versus children with comorbid mathematics and reading difficulties. *Child development*, 74(3), 834-850.

Jordan, N. C., Huttenlocher, J., & Levine, S. C. (1992). Differential calculation abilities in young children from middle- and low-income families. *Developmental Psychology*, 28(4), 644-653. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.28.4.644>

Jordan, N. C., Huttenlocher, J., & Levine, S. C. (1994). Assessing early arithmetic abilities : Effects of verbal and nonverbal response types on the calculation performance of middle-and low-income children. *Learning and Individual Differences*, 6(4), 413-432. [https://doi.org/10.1016/1041-6080\(94\)90003-5](https://doi.org/10.1016/1041-6080(94)90003-5)

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 Oláh, 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. (2008). Development of number combination skill in the early school years : When do fingers help? *Developmental Science*, 11(5), 662-668. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2008.00715.x>

Jordan, N. C., & Levine, S. C. (2009). Socioeconomic variation, number competence, and mathematics learning difficulties in young children. *Developmental Disabilities Research Reviews*, 15(1), 60-68. <https://doi.org/10.1002/ddrr.46>

Judd, N., Sauce, B., Wiedenhoeft, J., Tromp, J., Chaarani, B., Schliep, A., ... Insensee, C. (2020). Cognitive and brain development is independently influenced by socioeconomic status and polygenic scores for educational attainment. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(22), 12411-12418.

Kalaycioglu, D. B. (2015). The Influence of Socioeconomic Status, Self-Efficacy, and Anxiety on Mathematics Achievement in England, Greece, Hong Kong, the Netherlands, Turkey, and the USA. *Educational Sciences: Theory and Practice*, 15(5), 1391-1401.

Kang, H., & Cogan, L. (2020). The Differential Role of Socioeconomic Status in the Relationship between Curriculum-Based Mathematics and Mathematics Literacy : The Link Between TIMSS and PISA. *International Journal of Science and Mathematics Education*. <https://doi.org/10.1007/s10763-020-10133-2>

Kaufman, E. L., Lord, M. W., Reese, T. W., & Volkman, J. (1949). The Discrimination of Visual Number. *The American Journal of Psychology*, 62(4), 498-525. <https://doi.org/10.2307/1418556>

Kaufmann, L., Koppelstaetter, F., Delazer, M., Siedentopf, C., Rhomberg, P., Golaszewski, S., ... Ischebeck, A. (2005). Neural correlates of distance and congruity effects in a numerical Stroop task : An event-related fMRI study. *NeuroImage*, 25(3), 888-898. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2004.12.041>

Kaufmann, L., Koppelstaetter, F., Siedentopf, C., Haala, I., Haberlandt, E., Zimmerhackl, L.-B.,

- ... Ischebeck, A. (2006). Neural correlates of the number–size interference task in children. *Neuroreport*, *17*(6), 587-591.
- Kaufmann, L., Wood, G., Rubinsten, O., & Henik, A. (2011). Meta-analyses of developmental fMRI studies investigating typical and atypical trajectories of number processing and calculation. *Developmental Neuropsychology*, *36*(6), 763-787. <https://doi.org/10.1080/87565641.2010.549884>
- Kawashima, R., Taira, M., Okita, K., Inoue, K., Tajima, N., Yoshida, H., ... Fukuda, H. (2004). A functional MRI study of simple arithmetic—A comparison between children and adults. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, *18*(3), 227-233. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2003.10.009>
- Kearney, M. (2017). *Cross-Lagged Panel Analysis*.
- Keels, M. (2009). Ethnic group differences in early head start parents' parenting beliefs and practices and links to children's early cognitive development. *Early Childhood Research Quarterly*, *24*(4), 381-397.
- Kersey, A. J., & Cantlon, J. F. (2017). Primitive Concepts of Number and the Developing Human Brain. *Language Learning and Development: The Official Journal of the Society for Language Development*, *13*(2), 191-214. <https://doi.org/10.1080/15475441.2016.1264878>
- Khanolainen, D., Psyridou, M., Silinskas, G., Lerkkanen, M.-K., Niemi, P., Poikkeus, A.-M., & Torppa, M. (2020). Longitudinal Effects of the Home Learning Environment and Parental Difficulties on Reading and Math Development Across Grades 1–9. *Frontiers in Psychology*, *11*, 2735. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.577981>
- King, Y. A., & Purpura, D. J. (2021). Direct numeracy activities and early math skills : Math language as a mediator. *Early Childhood Research Quarterly*, *54*, 252-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2020.09.012>
- Kirk, E. P., & Ashcraft, M. H. (2001). Telling stories : The perils and promise of using verbal reports to study math strategies. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, *27*(1), 157-175. <https://doi.org/10.1037/0278-7393.27.1.157>
- 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. (2013). Relations between Home Numeracy Experiences and Basic Calculation Skills of Children with and without Specific Language Impairment. *Early Childhood Research Quarterly*, *28*(2), 415-423. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2012.10.004>
- Kleemans, T., Segers, E., & Verhoeven, L. (2016). Towards a Theoretical Framework on Individual Differences in Numerical Abilities : Role of Home Numeracy Experiences. In B. Blevins-Knabe & A. M. B. Austin (Éds.), *Early Childhood Mathematics Skill Development in the Home Environment* (p. 71-86). Cham: Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-43974-7_5
- Kleemans, T., Segers, E., & Verhoeven, L. (2018). Individual differences in basic arithmetic skills in children with and without developmental language disorder : Role of home numeracy experiences. *Early Childhood Research Quarterly*, *43*, 62-72. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2018.01.005>
- Klein, E., Willmes, K., Bieck, S. M., Bloechle, J., & Moeller, K. (2019). White matter neuroplasticity in mental arithmetic : Changes in hippocampal connectivity following arithmetic drill training. *Cortex*, *114*, 115-123. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.05.017>
- Klibanoff, R. S., Levine, S. C., Huttenlocher, J., Vasilyeva, M., & Hedges, L. V. (2006). Preschool children's mathematical knowledge : The effect of teacher « math talk. » *Developmental Psychology*, *42*(1), 59-69. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.42.1.59>
- Knudsen, B., Fischer, M., & Aschersleben, G. (2015). The development of Arabic digit

knowledge in 4-to-7-year-old children. *Journal of Numerical Cognition*, 1(1), 21-37.

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>

Koechlin, E. (1997). Numerical transformations in five-month-old human infants. *Mathematical cognition*, 3(2), 89-104.

Kolkman, M. E., Kroesbergen, E. H., & Leseman, P. P. M. (2013). Early numerical development and the role of non-symbolic and symbolic skills. *Learning and Instruction*, 25, 95-103.

<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2012.12.001>

Kong, J., Wang, C., Kwong, K., Vangel, M., Chua, E., & Gollub, R. (2005). The neural substrate of arithmetic operations and procedure complexity. *Brain Research. Cognitive Brain Research*, 22(3), 397-405. <https://doi.org/10.1016/j.cogbrainres.2004.09.011>

Koponen, T., Salmi, P., Eklund, K., & Aro, T. (2013). Counting and RAN: Predictors of arithmetic calculation and reading fluency. *Journal of educational psychology*, 105(1), 162.

Korous, K. M., Causadias, J. M., Bradley, R. H., Luthar, S. S., & Levy, R. (2020). A Systematic Overview of Meta-Analyses on Socioeconomic Status, Cognitive Ability, and Achievement : The Need to Focus on Specific Pathways. *Psychological Reports*, 0033294120984127.

<https://doi.org/10.1177/0033294120984127>

Kozorovitskiy, Y., Gross, C. G., Kopil, C., Battaglia, L., McBreen, M., Stranahan, A. M., & Gould, E. (2005). Experience induces structural and biochemical changes in the adult primate brain. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102(48), 17478-17482.

<https://doi.org/10.1073/pnas.0508817102>

Krajewski, K., & Schneider, W. (2009a). 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>

Krajewski, K., & Schneider, W. (2009b). 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>

Krekelberg, B., Boynton, G. M., & van Wezel, R. J. A. (2006). Adaptation : From single cells to BOLD signals. *Trends in Neurosciences*, 29(5), 250-256. <https://doi.org/10.1016/j.tins.2006.02.008>

Krinzinger, H., Koten, J. W., Horoufchin, H., Kohn, N., Arndt, D., Sahr, K., ... Willmes, K. (2011). The role of finger representations and saccades for number processing : An fMRI study in children. *Frontiers in Psychology*, 2, 373. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2011.00373>

Kucian, K., Aster, M. von, Loenneker, T., Dietrich, T., & Martin, E. (2008). Development of Neural Networks for Exact and Approximate Calculation : A fMRI Study. *Developmental Neuropsychology*, 33(4), 447-473. <https://doi.org/10.1080/87565640802101474>

Kucian, K., & Von Aster, M. (2015). Developmental dyscalculia. *European Journal of Pediatrics*, 174(1), 1-13. <https://doi.org/10.1007/s00431-014-2455-7>

Lafay, A., & Cattini, J. (2018). Analyse psychométrique des outils d'évaluation mathématique utilisés auprès des enfants francophones. *Canadian Journal of Speech-Language Pathology and Audiology / Revue canadienne d'orthophonie et d'audiologie*, 42(2), 127-144.

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

Lahire, B. (2001). Le travail sociologique de Pierre Bourdieu. *Dettes et critiques*. Paris: La Découverte.

Lahire, B. (2005). *L'homme pluriel : Les ressorts de l'action*. Armand Colin.

Lahire, B. (2013). *Dans les plis singuliers du social. Individus, institutions, socialisations*. Paris: La Découverte. Cairn.info. Consulté à l'adresse <https://www.cairn.info/dans-les-plis-singuliers-du-social--9782707175557.htm>

Larson, K., Russ, S. A., Nelson, B. B., Olson, L. M., & Halfon, N. (2015). Cognitive ability at kindergarten entry and socioeconomic status. *Pediatrics, 135*(2), e440-448. <https://doi.org/10.1542/peds.2014-0434>

Lawson, G. M., Duda, J. T., Avants, B. B., Wu, J., & Farah, M. J. (2013). Associations between children's socioeconomic status and prefrontal cortical thickness. *Developmental Science, 16*(5), 641-652. <https://doi.org/10.1111/desc.12096>

Lawson, G. M., Hook, C. J., & Farah, M. J. (2018). A meta-analysis of the relationship between socioeconomic status and executive function performance among children. *Developmental Science, 21*(2), e12529. <https://doi.org/10.1111/desc.12529>

Lawson, G. M., Hook, C. J., Hackman, D. A., Farah, M. J., Griffin, J. A., Freund, L. S., & McCardle, P. (2014). Socioeconomic status and neurocognitive development : Executive function. *Executive function in preschool children: Integrating measurement, neurodevelopment, and translational research*, 1-28.

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.

LeFevre, J.-A., Bisanz, J., Daley, K. E., Buffone, L., Greenham, S. L., & Sadesky, G. S. (1996). Multiple routes to solution of single-digit multiplication problems. *Journal of Experimental Psychology: General, 125*(3), 284-306. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.125.3.284>

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. *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., 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*, 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>

Lemelin, J.-P., Boivin, M., Forget-Dubois, N., Dionne, G., Séguin, J. R., Brendgen, M., ... Pérusse, D. (2007). The Genetic-Environmental Etiology of Cognitive School Readiness and Later Academic Achievement in Early Childhood. *Child Development, 78*(6), 1855-1869. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2007.01103.x>

Lemer, C., Dehaene, S., Spelke, E., & Cohen, L. (2003). Approximate quantities and exact number words : Dissociable systems. *Neuropsychologia, 41*(14), 1942-1958. [https://doi.org/10.1016/S0028-3932\(03\)00123-4](https://doi.org/10.1016/S0028-3932(03)00123-4)

Leonard, J. A., Romeo, R. R., Park, A. T., Takada, M. E., Robinson, S. T., Grotzinger, H., ...

Mackey, A. P. (2019). Associations between cortical thickness and reasoning differ by socioeconomic status in development. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 36, 100641. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2019.100641>

Lépine, R., Roussel, J.-P., & Fayol, M. (2003). Résolution procédurale ou récupération en mémoire des additions et multiplications élémentaires chez les enfants ? *L'Année psychologique*, 103(1), 51-80. <https://doi.org/10.3406/psy.2003.29623>

Levine, S. C., 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)

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>

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>

Lezak, M. D., Howieson, D. B., Loring, D. W., & Fischer, J. S. (2004). *Neuropsychological assessment*. Oxford University Press, USA.

Libertus, M. E., & Brannon, E. M. (2009). Behavioral and neural basis of number sense in infancy. *Current Directions in Psychological Science*, 18(6), 346-351.

Libertus, M. E., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Preschool acuity of the approximate number system correlates with school math ability. *Developmental Science*, 14(6), 1292-1300. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2011.01080.x>

Libertus, M. E., Feigenson, L., & Halberda, J. (2013). Is approximate number precision a stable predictor of math ability? *Learning and Individual Differences*, 25, 126-133. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2013.02.001>

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>

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>

Lombardi, C. M., & Dearing, E. (2020). Maternal Support of Children's Math Learning in Associations Between Family Income and Math School Readiness. *Child Development*. <https://doi.org/10.1111/cdev.13436>

Luby, J., Belden, A., Botteron, K., Marrus, N., Harms, M. P., Babb, C., ... Barch, D. (2013). The effects of poverty on childhood brain development : The mediating effect of caregiving and stressful life events. *JAMA pediatrics*, 167(12), 1135-1142.

Lurie, L. A., Hagen, M. P., McLaughlin, K. A., Sheridan, M. A., Meltzoff, A. N., & Rosen, M. L. (2021). Mechanisms linking socioeconomic status and academic achievement in early childhood : Cognitive stimulation and language. *Cognitive Development*, 58, 101045. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2021.101045>

Lyons, I. M., & Beilock, S. L. (2018). Characterizing the neural coding of symbolic quantities. *NeuroImage*, 178, 503-518. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.05.062>

Mackey, A. P., Finn, A. S., Leonard, J. A., Jacoby-Senghor, D. S., West, M. R., Gabrieli, C. F. O., & Gabrieli, J. D. E. (2015). Neuroanatomical correlates of the income-achievement gap. *Psychological Science*, 26(6), 925-933. <https://doi.org/10.1177/0956797615572233>

Maclellan, E. (1995). Counting all, counting on, counting up, counting down. *Education 3-13*, 23(3), 17-21. <https://doi.org/10.1080/03004279585200261>

Maire Sandoz, M.-O. (2017). Professionnaliser les relations école-famille. *Administration &*

- Éducation*, 153(1), 37-42. Cairn.info. <https://doi.org/10.3917/admed.153.0037>
- Majerus, S., Berquin, P., Rouleau, N., SCHNEIDER, M., Lejeune, C., ZESIGER, P., ... Comblain, A. (2020). *Traité de neuropsychologie de l'enfant*. De Boeck Supérieur.
- Maloney, E. A., Ramirez, G., Gunderson, E. A., Levine, S. C., & Beilock, S. L. (2015). Intergenerational Effects of Parents' Math Anxiety on Children's Math Achievement and Anxiety. *Psychological Science*, 26(9), 1480-1488. <https://doi.org/10.1177/0956797615592630>
- Mandler, G., & Shebo, B. J. (1982). Subitizing : An analysis of its component processes. *Journal of Experimental Psychology: General*, 111(1), 1-22. <https://doi.org/10.1037/0096-3445.111.1.1>
- 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>
- 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>
- Martí, E., Scheuer, N., Cavalcante, S., Trench, M., & Brizuela, B. M. (2016). Symbolic representation of the number three : A study with three-year-old children from contrasting socioeconomic environments. *Journal of Cognitive Psychology*, 28(6), 743-755. <https://doi.org/10.1080/20445911.2016.1188821>
- Martin, A., Schurz, M., Kronbichler, M., & Richlan, F. (2015). Reading in the brain of children and adults : A meta-analysis of 40 functional magnetic resonance imaging studies. *Human brain mapping*, 36(5), 1963-1981.
- Martin, M. O., von Davier, M., & Mullis, I. V. (2020). Methods and Procedures : TIMSS 2019 Technical Report. *International Association for the Evaluation of Educational Achievement*.
- Martins, L., & Veiga, P. (2010). Do inequalities in parents' education play an important role in PISA students' mathematics achievement test score disparities? *Economics of Education Review*, 29(6), 1016-1033. <https://doi.org/10.1016/j.econedurev.2010.05.001>
- Matejko, A. A., & Ansari, D. (2016). Trajectories of Symbolic and Nonsymbolic Magnitude Processing in the First Year of Formal Schooling. *PLOS ONE*, 11(3), e0149863. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0149863>
- Matejko, A. A., & Ansari, D. (2018). Contributions of functional Magnetic Resonance Imaging (fMRI) to the Study of Numerical Cognition. *Journal of Numerical Cognition*, 4(3), 505-525. <https://doi.org/10.5964/jnc.v4i3.136>
- Matejko, A. A., Hutchison, J. E., & Ansari, D. (2019). Developmental specialization of the left intraparietal sulcus for symbolic ordinal processing. *Cortex; a Journal Devoted to the Study of the Nervous System and Behavior*, 114, 41-53. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2018.11.027>
- Mathieu, R., Epinat-Duclos, J., Léone, J., Fayol, M., Thevenot, C., & Prado, J. (2018). Hippocampal spatial mechanisms relate to the development of arithmetic symbol processing in children. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 30, 324-332. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.06.001>
- Mathieu, R., Gourjon, A., Couderc, A., Thevenot, C., & Prado, J. (2016). Running the number line : Rapid shifts of attention in single-digit arithmetic. *Cognition*, 146, 229-239. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2015.10.002>
- Mazzocco, M. M., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Preschoolers' precision of the approximate number system predicts later school mathematics performance. *PLoS one*, 6(9), e23749.
- McCarthy, D. (1972). *McCarthy scales of children's abilities (MSCA)*. Psychological Corporation.
- McCrink, K., & Wynn, K. (2004). Large-number addition and subtraction by 9-month-old infants. *Psychological Science*, 15(11), 776-781.

- McDermott, C. L., Seidlitz, J., Nadig, A., Liu, S., Clasen, L. S., Blumenthal, J. D., ... Raznahan, A. (2019). Longitudinally Mapping Childhood Socioeconomic Status Associations with Cortical and Subcortical Morphology. *Journal of Neuroscience*, *39*(8), 1365-1373. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.1808-18.2018>
- McEwen, B. S. (2000). Effects of adverse experiences for brain structure and function. *Biological psychiatry*, *48*(8), 721-731.
- McEwen, B. S., & Gianaros, P. J. (2010). Central role of the brain in stress and adaptation : Links to socioeconomic status, health, and disease. *Annals of the New York Academy of Sciences*, *1186*, 190-222. <https://doi.org/10.1111/j.1749-6632.2009.05331.x>
- Melhuish, E. C., Sylva, K., Sammons, P., Siraj-Blatchford, I., Taggart, B., Phan, M. B., & Malin, A. (2008). Preschool Influences on Mathematics Achievement. *Science*, *321*(5893), 1161-1162. <https://doi.org/10.1126/science.1158808>
- Mendive, S., Lara, M. 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*, *91*(6), 2042-2062. <https://doi.org/10.1111/cdev.13382>
- Menissier, A. (2003). Les variations stratégiques chez l'enfant dans le calcul d'additions et de soustractions élémentaires. *Glossa*, 20-33.
- Menon, V., & Chang, H. (2021). Emerging neurodevelopmental perspectives on mathematical learning. *Developmental Review*, *60*, 100964. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2021.100964>
- Merz, E. C., Maskus, E. A., Melvin, S. A., He, X., & Noble, K. G. (2020). Socioeconomic Disparities in Language Input Are Associated With Children's Language-Related Brain Structure and Reading Skills. *Child Development*, *91*(3), 846-860. <https://doi.org/10.1111/cdev.13239>
- Merz, E. C., Wiltshire, C. A., & Noble, K. G. (2019). Socioeconomic Inequality and the Developing Brain : Spotlight on Language and Executive Function. *Child Development Perspectives*, *13*(1), 15-20. <https://doi.org/10.1111/cdev.12305>
- Métral, E. (2008). *Mallette B-LM cycle II*. Chavanod, France: Orthopratic.
- Micalizzi, L., Brick, L. A., Flom, M., Ganiban, J. M., & Saudino, K. J. (2019). Effects of socioeconomic status and executive function on school readiness across levels of household chaos. *Early Childhood Research Quarterly*, *47*, 331-340. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2019.01.007>
- 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 la Culture. (2021). Les bibliothèques publiques. Consulté 21 septembre 2021, à l'adresse <https://www.culture.gouv.fr/Sites-thematiques/Livre-et-lecture/Les-bibliotheques-publiques>
- Ministère de l'Éducation nationale. (2013, juillet 25). *Référentiel des compétences professionnelles des métiers du professorat et de l'éducation : Bulletin officiel n°30 du 25 juillet 2013*. Bulletin officiel n°30. Consulté à l'adresse <https://www.education.gouv.fr/bo/13/Hebdo30/MENE1315928A.htm>
- Ministère de l'Éducation nationale. (2014). *Un référentiel pour l'éducation prioritaire : Refonder l'éducation prioritaire*. Consulté à l'adresse <https://www.reseau-canope.fr/education-prioritaire/accueil.html>
- Ministère de l'Éducation nationale. (2019, mai 29). *Recommandations pédagogiques. Un apprentissage fondamental à l'école maternelle : Découvrir les nombres et leurs utilisations*. Bulletin officiel n°22. Consulté à l'adresse <https://www.education.gouv.fr/bo/19/Hebdo22/MENE1915454N.htm>
- Missall, K., Hojnoski, R. L., Caskie, G. I. L., & Repasky, P. (2015). Home Numeracy Environments of Preschoolers : Examining Relations Among Mathematical Activities, Parent Mathematical Beliefs, and Early Mathematical Skills. *Early Education and Development*, *26*(3),

356-376. <https://doi.org/10.1080/10409289.2015.968243>

Missall, K. N., Hojniski, R. L., & Moreano, G. (2017). Parent-child mathematical interactions : Examining self-report and direct observation. *Early Education and Development, 187*(12), 1896-1908. <https://doi.org/10.1080/03004430.2016.1193731>

Molfese, V. J., Modglin, A., & Molfese, D. L. (2016). The Role of Environment in the Development of Reading Skills : A Longitudinal Study of Preschool and School-Age Measures. *Journal of Learning Disabilities*. (Sage CA: Los Angeles, CA). <https://doi.org/10.1177/00222194030360010701>

Montag, J. L., Jones, M. N., & Smith, L. B. (2015). The Words Children Hear : Picture Books and the Statistics for Language Learning. *Psychological Science, 26*(9), 1489-1496. <https://doi.org/10.1177/0956797615594361>

Moore, A. M., & Geary, D. C. (2016). Kindergartners' fluent processing of symbolic numerical magnitude is predicted by their cardinal knowledge and implicit understanding of arithmetic 2 years earlier. *Journal of experimental child psychology, 150*, 31-47.

Moriguchi, Y., & Shinohara, I. (2019). Socioeconomic disparity in prefrontal development during early childhood. *Scientific Reports, 9*(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39255-6>

Mott, F. L. (2004). The utility of the HOME-SF scale for child development research in a large national longitudinal survey : The National Longitudinal Survey of Youth 1979 cohort. *Parenting, 4*(2-3), 259-270.

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

Mullis, I. V. S., Martin, M. O., Foy, P., & Hooper, M. (2016). *TIMSS 2015 International Results in Mathematics*. (Boston College, TIMSS&PIRLS International Study Center).

Mullis, I. V. S., Martin, M. O., Foy, P., Kelly, P., & Fishbein, B. (2020). *TIMSS 2019 International Results in Mathematics and Science* (Boston College, TIMSS&PIRLS International Study Center).

Muneaux, M. (2018). *Petit Guide de Psychométrie Clinique à l'Usage des Praticiens*. De Boeck Supérieur.

Mussolin, C., Nys, J., Leybaert, J., & Content, A. (2016). How approximate and exact number skills are related to each other across development : A review☆. *Developmental Review, 39*, 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2014.11.001>

Mutaf-Yıldız, B., Sasanguie, D., De Smedt, B., & Reynvoet, B. (2018a). Frequency of Home Numeracy Activities Is Differentially Related to Basic Number Processing and Calculation Skills in Kindergartners. *Frontiers in Psychology, 9*, 340. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.00340>

Mutaf-Yıldız, B., Sasanguie, D., De Smedt, B., & Reynvoet, B. (2018b). Investigating the relationship between two home numeracy measures : A questionnaire and observations during Lego building and book reading. *The British Journal of Developmental Psychology*. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12235>

Mutaf-Yıldız, B., Sasanguie, D., De Smedt, B., & Reynvoet, B. (2020). Probing the Relationship Between Home Numeracy and Children's Mathematical Skills : A Systematic Review. *Frontiers in Psychology, 11*, 2074. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.02074>

Naccache, L., & Dehaene, S. (2001). The priming method : Imaging unconscious repetition priming reveals an abstract representation of number in the parietal lobes. *Cerebral Cortex (New York, N.Y.: 1991), 11*(10), 966-974. <https://doi.org/10.1093/cercor/11.10.966>

Napoli, A. R., Korucu, I., Lin, J., Schmitt, S. A., & Purpura, D. J. (2021). Characteristics Related to Parent-Child Literacy and Numeracy Practices in Preschool. *Frontiers in Education, 0*. <https://doi.org/10.3389/educ.2021.535832>

- Napoli, A. R., & Purpura, D. J. (2017). 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 Institute of Child Health and Human Development Early Child Care Research Network. (2005). Duration and developmental timing of poverty and children's cognitive and social development from birth through third grade. *Child Development, 76*(4), 795-810.
- Navarro, M. G., Braham, E. J., & Libertus, M. E. (2018). Intergenerational associations of the approximate number system in toddlers and their parents. *British Journal of Developmental Psychology, 36*(4), 521-539. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12234>
- Nesbitt, K. T., Baker-Ward, L., & Willoughby, M. T. (2013). Executive function mediates socio-economic and racial differences in early academic achievement. *Early Childhood Research Quarterly, 28*(4), 774-783. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2013.07.005>
- Nguyen, T., Watts, T. W., Duncan, G. J., Clements, D. H., Sarama, J. S., Wolfe, C., & Spitler, M. E. (2016). 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>
- NICHD ECCRN. (1997). Familial factors associated with the characteristics of nonmaternal care for infants. *Journal of Marriage and the Family, 389*-408.
- NICHD ECCRN. (2000). Characteristics and Quality of Child Care for Toddlers and Preschoolers. *Applied Developmental Science, 4*(3), 116-135. https://doi.org/10.1207/S1532480XADS0403_2
- NICHD ECCRN. (2001). Child care and children's peer interaction at 24 and 36 months : The NICHD study of early child care. *Child Development, 72*(5), 1478-1500. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.00361>
- NICHD ECCRN. (2002). Early Child Care and Children's Development Prior to School Entry : Results from the NICHD Study of Early Child Care. *American Educational Research Journal, 39*(1), 133-164.
- NICHD ECCRN. (2006). Child-care effect sizes for the NICHD Study of Early Child Care and Youth Development. *The American Psychologist, 61*(2), 99-116. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.61.2.99>
- NICHD ECCRN, & Duncan, G. J. (2003). Modeling the impacts of child care quality on children's preschool cognitive development. *Child development, 74*(5), 1454-1475.
- Nieder, A. (2016). The neuronal code for number. *Nature Reviews Neuroscience, 17*(6), 366-382. <https://doi.org/10.1038/nrn.2016.40>
- Niklas, F., Cohrssen, C., & Tayler, C. (2016). Improving Preschoolers' Numerical Abilities by Enhancing the Home Numeracy Environment. *Early Education and Development, 27*(3), 372-383. <https://doi.org/10.1080/10409289.2015.1076676>
- 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., & Schneider, W. (2014). Casting the die before the die is cast : The importance of the home numeracy environment for preschool children. *European Journal of Psychology of Education, 29*(3), 327-345. <https://doi.org/10.1007/s10212-013-0201-6>
- Niklas, F., & Schneider, W. (2017). Home learning environment and development of child competencies from kindergarten until the end of elementary school. *Contemporary Educational Psychology, 49*, 263-274. <https://doi.org/10.1016/j.cedpsych.2017.03.006>
- Ninnin, L.-M., & Salles, F. (2020). *Cedre 2008-2014-2019. Mathématiques en fin de collège : Des résultats en baisse.*

- Noble, K. G. (2017). What inequality does to the brain. *Scientific American*, 316, 44-49.
- Noble, K. G., Engelhardt, L., Brito, N., Mack, L., Nail, E., Angal, J., ... Elliott, A. (2015). Socioeconomic Disparities in Neurocognitive Development in the First Two Years of Life. *Developmental Psychobiology*, 57. <https://doi.org/10.1002/dev.21303>
- Noble, K. G., & Giebler, M. A. (2020). The neuroscience of socioeconomic inequality. *Current Opinion in Behavioral Sciences*, 36, 23-28. <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2020.05.007>
- Noble, K. G., Houston, S. M., Brito, N. H., Bartsch, H., Kan, E., Kuperman, J. M., ... Sowell, E. R. (2015). Family income, parental education and brain structure in children and adolescents. *Nature Neuroscience*, 18(5), 773-778. <https://doi.org/10.1038/nn.3983>
- Noble, K. G., Houston, S. M., Kan, E., & Sowell, E. R. (2012). Neural correlates of socioeconomic status in the developing human brain. *Developmental Science*, 15(4), 516-527. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2012.01147.x>
- 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>
- Noble, K. G., Norman, M. F., & Farah, M. J. (2005). Neurocognitive correlates of socioeconomic status in kindergarten children. *Developmental Science*, 8(1), 74-87. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2005.00394.x>
- Noble, K. G., Wolmetz, M. E., Ochs, L. G., Farah, M. J., & McCandliss, B. D. (2006). Brain-behavior relationships in reading acquisition are modulated by socioeconomic factors. *Developmental Science*, 9(6), 642-654. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2006.00542.x>
- Noël, M.-P. (2009). Counting on working memory when learning to count and to add : A preschool study. *Developmental Psychology*, 45(6), 1630-1643. <https://doi.org/10.1037/a0016224>
- Noël, M.-P., & Grégoire, J. (2015). *TediMath Grands, Test diagnostique des compétences de base en mathématiques du CE2 à la 5e*. Paris, France: Edition du Centre de Psychologie Appliquée.
- Nordt, M., Hoehl, S., & Weigelt, S. (2016). The use of repetition suppression paradigms in developmental cognitive neuroscience. *Cortex*, 80, 61-75. <https://doi.org/10.1016/j.cortex.2016.04.002>
- Nores, M., & Barnett, W. S. (2014). Access to high quality early care and education : Readiness and opportunity gaps in America. *National Institute for Early Education and Center on Enhancing Early Learning Policy report*. New Brunswick, NJ: Center on Enhancing Early Learning Outcomes. Accessed February, 13, 2015.
- Notebaert, K., Nelis, S., & Reynvoet, B. (2011). The magnitude representation of small and large symbolic numbers in the left and right hemisphere : An event-related fMRI study. *Journal of Cognitive Neuroscience*, 23(3), 622-630. <https://doi.org/10.1162/jocn.2010.21445>
- Nunes, T., Bryant, P., Barros, R., & Sylva, K. (2012). The relative importance of two different mathematical abilities to mathematical achievement. *British Journal of Educational Psychology*, 82(1), 136-156.
- Núñez-Peña, M. I., Suárez-Pellicioni, M., & Bono, R. (2013). Effects of math anxiety on student success in higher education. *International Journal of Educational Research*, 58, 36-43. <https://doi.org/10.1016/j.ijer.2012.12.004>
- OCDE. (2016). *Le point sur les inégalités de revenu*.
- O'Connell, M. (2019). Is the impact of SES on educational performance overestimated? Evidence from the PISA survey. *Intelligence*, 75, 41-47. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2019.04.005>
- Octobre, S., Détrez, C., Mercklé, P., & Berthomier, N. (2010). *L'enfance des loisirs. Trajectoires communes et parcours individuels de la fin de l'enfance à la grande adolescence*. Paris: Ministère de la Culture - DEPS. Cairn.info. Consulté à l'adresse <https://www.cairn.info/l-enfance-des-loisirs--9782110975454.htm>
- Olson, L., Chen, B., & Fishman, I. (2021). Neural correlates of socioeconomic status in early

childhood : A systematic review of the literature. *Child Neuropsychology*, 27(3), 390-423.
<https://doi.org/10.1080/09297049.2021.1879766>

Özkan, D., & Baydar, N. (2021). The roles of stimulating parenting and verbal development throughout early childhood in the development of mathematics skills. *Cognitive Development*, 58, 101012. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2021.101012>

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>

Pakpahan, E., Hoffmann, R., & Kröger, H. (2017). Statistical methods for causal analysis in life course research : An illustration of a cross-lagged structural equation model, a latent growth model, and an autoregressive latent trajectories model. *International Journal of Social Research Methodology*, 20(1), 1-19. <https://doi.org/10.1080/13645579.2015.1091641>

Palacio-Quintin, E., & Lavoie, T. (1986). Version française du HOME forme préscolaire. *Cahiers du GREDE*.

Palermo, F., Ispa, J. M., Carlo, G., & Streit, C. (2018). Economic hardship during infancy and U.S. Latino preschoolers' sociobehavioral health and academic readiness. *Developmental Psychology*, 54(5), 890-902. <https://doi.org/10.1037/dev0000476>

Pan, Yingqiu, Gauvain, M., Liu, Z., & Cheng, L. (2006). American and Chinese parental involvement in young children's mathematics learning. *Cognitive Development*, 21(1), 17-35.
<https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2005.08.001>

Pan, Yuejuan, Yang, Q., Li, Y., Liu, L., & Liu, S. (2018). Effects of family socioeconomic status on home math activities in urban China : The role of parental beliefs. *Children and Youth Services Review*, 93, 60-68.

Park, J., & Brannon, E. M. (2013). Training the Approximate Number System Improves Math Proficiency. *Psychological science*, 24(10), 2013-2019. <https://doi.org/10.1177/0956797613482944>

Passolunghi, M. C., Vercelloni, B., & Schadee, H. (2007). The precursors of mathematics learning : Working memory, phonological ability and numerical competence. *Cognitive Development*, 22(2), 165-184. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2006.09.001>

Patterson, C. J., Kupersmidt, J. B., & Vaden, N. A. (1990). Income level, gender, ethnicity, and household composition as predictors of children's school-based competence. *Child Development*, 61(2), 485-494. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.1990.tb02794.x>

Peña-López, I. (2019a). *PISA 2018 Results. What School Life Means for Students' Lives*.

Peña-López, I. (2019b). *PISA 2018 results. Where all students can succeed*. OECD Publishing.

Peng, P., Yang, X., & Meng, X. (2017). The relation between approximate number system and early arithmetic : The mediation role of numerical knowledge. *Journal of Experimental Child Psychology*, 157, 111-124. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2016.12.011>

Perrachione, T. K., Del Tufo, S. N., Winter, R., Murtagh, J., Cyr, A., Chang, P., ... Gabrieli, J. D. E. (2016). Dysfunction of Rapid Neural Adaptation in Dyslexia. *Neuron*, 92(6), 1383-1397.
<https://doi.org/10.1016/j.neuron.2016.11.020>

Perry, R. E., Braren, S. H., Blair, C., & Family Life Project Key Investigators. (2018). Socioeconomic Risk and School Readiness : Longitudinal Mediation Through Children's Social Competence and Executive Function. *Frontiers in Psychology*, 9, 1544.
<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2018.01544>

Petersen, D. B., & Spencer, T. D. (2012). The narrative language measures : Tools for language screening, progress monitoring, and intervention planning. *Perspectives on Language Learning and Education*, 19(4), 119-129.

Petretto, D. R., Masala, I., & Masala, C. (2020). School Closure and Children in the Outbreak of COVID-19. *Clinical Practice and Epidemiology in Mental Health : CP & EMH*, 16, 189-191.

<https://doi.org/10.2174/1745017902016010189>

- Piaget, J., & Inhelder, B. (1975). *La psychologie de l'enfant*. Presses universitaires de France.
- Piaget, J., & Szeminska, A. (1941). *La genèse du nombre chez l'enfant*.
- Piazza, M., Facoetti, A., Trussardi, A. N., Berteletti, I., Conte, S., Lucangeli, D., ... Zorzi, M. (2010). Developmental trajectory of number acuity reveals a severe impairment in developmental dyscalculia. *Cognition*, *116*(1), 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2010.03.012>
- Piazza, M., Izard, V., Pinel, P., Bihan, D. L., & Dehaene, S. (2004). Tuning Curves for Approximate Numerosity in the Human Intraparietal Sulcus. *Neuron*, *44*(3), 547-555. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2004.10.014>
- Piazza, M., Mechelli, A., Butterworth, B., & Price, C. J. (2002). Are Subitizing and Counting Implemented as Separate or Functionally Overlapping Processes? *NeuroImage*, *15*(2), 435-446. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0980>
- Piazza, M., Pica, P., Izard, V., Spelke, E., & Dehaene, S. (2013). Education Enhances the Acuity of the Nonverbal Approximate Number System. *Psychological science*, *24*(6), 1037-1043. <https://doi.org/10.1177/0956797612464057>
- Piazza, M., Pinel, P., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2007). A magnitude code common to numerosities and number symbols in human intraparietal cortex. *Neuron*, *53*(2), 293-305. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2006.11.022>
- Pica, P., Lemer, C., Izard, V., & Dehaene, S. (2004). Exact and approximate arithmetic in an Amazonian indigene group. *Science (New York, N.Y.)*, *306*(5695), 499-503. <https://doi.org/10.1126/science.1102085>
- Pinel, P., & Dehaene, S. (2013). Genetic and environmental contributions to brain activation during calculation. *NeuroImage*, *81*, 306-316. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2013.04.118>
- Pinel, P., Dehaene, S., Rivière, D., & LeBihan, D. (2001). Modulation of Parietal Activation by Semantic Distance in a Number Comparison Task. *NeuroImage*, *14*(5), 1013-1026. <https://doi.org/10.1006/nimg.2001.0913>
- Pinel, P., Piazza, M., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2004). Distributed and Overlapping Cerebral Representations of Number, Size, and Luminance during Comparative Judgments. *Neuron*, *41*(6), 983-993. [https://doi.org/10.1016/S0896-6273\(04\)00107-2](https://doi.org/10.1016/S0896-6273(04)00107-2)
- Plaisier, M. A., Tiest, W. M. B., & Kappers, A. M. (2009). One, two, three, many—Subitizing in active touch. *Acta psychologica*, *131*(2), 163-170.
- Poletti, C., Perez, J.-F., Houillon, J.-C., Prado, J., & Thevenot, C. (2021). Priming effects of arithmetic signs in 10- to 15-year-old children. *The British Journal of Developmental Psychology*. <https://doi.org/10.1111/bjdp.12363>
- Pollack, C., & Ashby, N. C. (2018). Where arithmetic and phonology meet : The meta-analytic convergence of arithmetic and phonological processing in the brain. *Developmental Cognitive Neuroscience*, *30*, 251-264. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2017.05.003>
- Pomerantz, E. M., Moorman, E. A., & Litwack, S. D. (2007). The How, Whom, and Why of Parents' Involvement in Children's Academic Lives : More Is Not Always Better. *Review of Educational Research*, *77*(3), 373-410. <https://doi.org/10.3102/003465430305567>
- Poncelet, D., Chambrier, A.-F. de, Tinnes-Vigne, M., Baye, A., Tazouti, Y., & Dierendonck, C. (2020). Study of parenting practices and early number competencies of preschool children depending on socio-economic and cultural level of families. *La Revue Internationale de Leducation Familiale*, *No 47*(1), 119-149.
- Powers, S. J., Wang, Y., Beach, S. D., Sideridis, G. D., & Gaab, N. (2016). Examining the relationship between home literacy environment and neural correlates of phonological processing in beginning readers with and without a familial risk for dyslexia : An fMRI study. *Annals of Dyslexia*, *66*(3), 337-360. <https://doi.org/10.1007/s11881-016-0134-2>

Prado, J., Mutreja, R., & Booth, J. R. (2014). Developmental dissociation in the neural responses to simple multiplication and subtraction problems. *Developmental Science*, *17*(4), 537-552. <https://doi.org/10.1111/desc.12140>

Prado, J., Mutreja, R., Zhang, H., Mehta, R., Desroches, A. S., Minas, J. E., & Booth, J. R. (2011). Distinct representations of subtraction and multiplication in the neural systems for numerosity and language. *Human Brain Mapping*, *32*(11), 1932-1947. <https://doi.org/10.1002/hbm.21159>

Price, G. R., & Fuchs, L. S. (2016). The Mediating Relation between Symbolic and Nonsymbolic Foundations of Math Competence. *PLOS ONE*, *11*(2), e0148981. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0148981>

Pungello, E. P., Kupersmidt, J. B., Burchinal, M. R., & Patterson, C. J. (1996). Environmental risk factors and children's achievement from middle childhood to early adolescence. *Developmental Psychology*, *32*(4), 755-767. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.32.4.755>

Purpura, D. J., King, Y. A., Rolan, E., Hornburg, C. B., Schmitt, S. A., Hart, S. A., & Ganley, C. M. (2020). Examining the Factor Structure of the Home Mathematics Environment to Delineate Its Role in Predicting Preschool Numeracy, Mathematical Language, and Spatial Skills. *Frontiers in Psychology*, *11*, 1925. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01925>

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., & 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.

Qin, S., Cho, S., Chen, T., Rosenberg-Lee, M., Geary, D. C., & Menon, V. (2014). Hippocampal-neocortical functional reorganization underlies children's cognitive development. *Nature Neuroscience*, *17*(9), 1263-1269. <https://doi.org/10.1038/nn.3788>

Raizada, R. D. S., & Kishiyama, M. M. (2010). Effects of socioeconomic status on brain development, and how cognitive neuroscience may contribute to leveling the playing field. *Frontiers in Human Neuroscience*, *4*. <https://doi.org/10.3389/neuro.09.003.2010>

Raizada, R. D. S., Richards, T. L., Meltzoff, A., & Kuhl, P. K. (2008). Socioeconomic status predicts hemispheric specialisation of the left inferior frontal gyrus in young children. *NeuroImage*, *40*(3), 1392-1401. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.01.021>

Ramani, G. B., Rowe, M. L., Eason, S. H., & Leech, K. A. (2015). Math Talk During Informal Learning Activities in Head Start Families. *Cognitive Development*, *35*, 15-33. <https://doi.org/10.1016/j.cogdev.2014.11.002>

Ramani, G. B., & Scalise, N. R. (2020). It's more than just fun and games : Play-based mathematics activities for Head Start families. *Early Childhood Research Quarterly*, *50*, 78-89. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2018.07.011>

Ramani, G. B., & Siegler, R. S. (2014). How informal learning activities can promote children's numerical knowledge. *The oxford handbook of numerical cognition*, 1135-1154.

Raschle, N. M., Zuk, J., & Gaab, N. (2012). Functional characteristics of developmental dyslexia in left-hemispheric posterior brain regions predate reading onset. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *109*(6), 2156-2161. <https://doi.org/10.1073/pnas.1107721109>

Raznahan, A., Shaw, P., Lalonde, F., Stockman, M., Wallace, G. L., Greenstein, D., ... Giedd, J. N. (2011). How does your cortex grow? *Journal of Neuroscience*, *31*(19), 7174-7177.

- Reardon, S. F. (2011). *The widening academic achievement gap between the rich and the poor*. Routledge.
- Reimer, D., Smith, E., Andersen, I. G., & Sortkær, B. (2021). What happens when schools shut down? Investigating inequality in students' reading behavior during Covid-19 in Denmark. *Research in Social Stratification and Mobility, 71*, 100568. <https://doi.org/10.1016/j.rssm.2020.100568>
- Resnick, L. B. (1989). Developing mathematical knowledge. *American Psychologist, 44*(2), 162-169. <https://doi.org/10.1037/0003-066X.44.2.162>
- Restle, F., & Greeno, J. G. (1970). *Introduction to mathematical psychology*. Oxford, England: Addison-Wesley.
- Reynvoet, B., & Sasanguie, D. (2016). The Symbol Grounding Problem Revisited : A Thorough Evaluation of the ANS Mapping Account and the Proposal of an Alternative Account Based on Symbol–Symbol Associations. *Frontiers in Psychology, 0*. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2016.01581>
- Richardson, F. C., & Suinn, R. M. (1972). The mathematics anxiety rating scale : Psychometric data. *Journal of counseling Psychology, 19*(6), 551.
- Río, M. F. del, Susperreguy, M. I., Strasser, K., & Salinas, V. (2017). Distinct Influences of Mothers and Fathers on Kindergartners' Numeracy Performance : The Role of Math Anxiety, Home Numeracy Practices, and Numeracy Expectations. *Early Education and Development, 28*(8), 939-955. <https://doi.org/10.1080/10409289.2017.1331662>
- Rivera, S. M., Reiss, A. L., Eckert, M. A., & Menon, V. (2005). Developmental Changes in Mental Arithmetic : Evidence for Increased Functional Specialization in the Left Inferior Parietal Cortex. *Cerebral Cortex, 15*(11), 1779-1790. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhi055>
- Romeo, R. R. (2019). Socioeconomic and Experiential Influences on the Neurobiology of Language Development. *Perspectives of the ASHA Special Interest Groups, 4*(6), 1229-1238. https://doi.org/10.1044/2019_PERSP-19-00073
- Romeo, R. R., Christodoulou, J. A., Halverson, K. K., Murtagh, J., Cyr, A. B., Schimmel, C., ... Gabrieli, J. D. (2018). Socioeconomic status and reading disability : Neuroanatomy and plasticity in response to intervention. *Cerebral Cortex, 28*(7), 2297-2312.
- Romeo, R. R., Leonard, J. A., Robinson, S. T., West, M. R., Mackey, A. P., Rowe, M. L., & Gabrieli, J. D. E. (2018). Beyond the 30-Million-Word Gap : Children's Conversational Exposure Is Associated With Language-Related Brain Function. *Psychological Science, 29*(5), 700-710. <https://doi.org/10.1177/0956797617742725>
- Romeo, R. R., Segaran, J., Leonard, J. A., Robinson, S. T., West, M. R., Mackey, A. P., ... Gabrieli, J. D. E. (2018). Language Exposure Relates to Structural Neural Connectivity in Childhood. *Journal of Neuroscience, 38*(36), 7870-7877. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0484-18.2018>
- Rosen, M. L., Hagen, M. P., Lurie, L. A., Miles, Z. E., Sheridan, M. A., Meltzoff, A. N., & McLaughlin, K. A. (2020). Cognitive Stimulation as a Mechanism Linking Socioeconomic Status With Executive Function : A Longitudinal Investigation. *Child Development, 91*(4), e762-e779. <https://doi.org/10.1111/cdev.13315>
- Rosen, M. L., Sheridan, M. A., Sambrook, K. A., Meltzoff, A. N., & McLaughlin, K. A. (2018). Socioeconomic disparities in academic achievement : A multi-modal investigation of neural mechanisms in children and adolescents. *NeuroImage, 173*, 298-310. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2018.02.043>
- Roussel, J.-L., Fayol, M., & Barrouillet, P. (2002). Procedural vs. direct retrieval strategies in arithmetic : A comparison between additive and multiplicative problem solving. *European Journal of Cognitive Psychology, 14*(1), 61-104. <https://doi.org/10.1080/09541440042000115>
- Roux, F.-E., Lubrano, V., Lauwers-Cances, V., Giussani, C., & Démonet, J.-F. (2008). Cortical areas involved in Arabic number reading. *Neurology, 70*(3), 210-217. <https://doi.org/10.1212/01.wnl.0000297194.14452.a0>

- Rowe, M. L. (2018). Understanding socioeconomic differences in parents' speech to children. *Child Development Perspectives, 12*(2), 122-127.
- Rowe, M. L., & Zuckerman, B. (2016). Word gap redux : Developmental sequence and quality. *JAMA pediatrics, 170*(9), 827-828.
- Rubinsten, O. (2009). Co-occurrence of developmental disorders : The case of developmental dyscalculia. *Cognitive Development, 24*(4), 362-370.
- Russell, S. J. (2000). Principles and standards : Developing computational fluency with whole numbers. *Teaching Children Mathematics, 7*(3), 154-158.
- Salles, F., Le Cam, M., & France, M. de l'éducation nationale, de la jeunesse et des sports (MENJS), Direction de l'évaluation, de la prospective et de la performance (DEPP), Bureau B2-Evaluation des élèves. (2020). TIMSS 2019 Mathématiques au niveau de la classe de quatrième : Des résultats inquiétants en France. *Note d'information MEN*, pp 1-4 ; tabl. graph.; 30 cm. DEPP. Consulté à l'adresse DEPP.
- Sammons, P., Toth, K., Sylva, K., Melhuish, E., Siraj, I., & Taggart, B. (2015). The long-term role of the home learning environment in shaping students' academic attainment in secondary school. *Journal of Children's Services, 10*(3), 189-201. <https://doi.org/10.1108/JCS-02-2015-0007>
- Sandrini, M., Rossini, P. M., & Miniussi, C. (2004). The differential involvement of inferior parietal lobule in number comparison : A rTMS study. *Neuropsychologia, 42*(14), 1902-1909. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2004.05.005>
- 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 in Early Childhood. *Journal of experimental child psychology, 103*(3), 325-337. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2009.02.007>
- Sarsour, K., Sheridan, M., Jutte, D., Nuru-Jeter, A., Hinshaw, S., & Boyce, W. T. (2011). Family socioeconomic status and child executive functions : The roles of language, home environment, and single parenthood. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS, 17*(1), 120.
- Sasanguie, D., Bussche, E. V. den, & Reynvoet, B. (2012). Predictors for Mathematics Achievement? Evidence From a Longitudinal Study. *Mind, Brain, and Education, 6*(3), 119-128. <https://doi.org/10.1111/j.1751-228X.2012.01147.x>
- Saxe, G. B., Guberman, S. R., Gearhart, M., Gelman, R., Massey, C. M., & Rogoff, B. (1987). Social Processes in Early Number Development. *Monographs of the Society for Research in Child Development, 52*(2), i-162. <https://doi.org/10.2307/1166071>
- Scalise, N. R., Daubert, E. N., & Ramani, G. B. (2018). Narrowing the early mathematics gap : A play-based intervention to promote low-income preschoolers' number skills. *Journal of Numerical Cognition, 3*(3), 559-581.
- Scalise, N. R., & Ramani, G. B. (2021). Symbolic Magnitude Understanding Predicts Preschoolers' Later Addition Skills. *Journal of Cognition and Development, 22*(2), 185-202. <https://doi.org/10.1080/15248372.2021.1888732>
- Schaeffer, M. W., Rozek, C. S., Berkowitz, T., Levine, S. C., & Beilock, S. L. (2018). Disassociating the relation between parents' math anxiety and children's math achievement : Long-term effects of a math app intervention. *Journal of Experimental Psychology: General, 147*(12), 1782-1790. <https://doi.org/10.1037/xge0000490>
- Schaeffer, N. C., & Presser, S. (2003). The science of asking questions. *Annual review of sociology, 29*(1), 65-88.
- Scheuer, N., Martí, E., Cavalcante, S., & Brizuela, B. M. (2019). Response patterns of young children from two contrasting SES contexts to different numerical tasks with numbers 1-5. *The Journal of Genetic Psychology, 180*(1), 1-16. <https://doi.org/10.1080/00221325.2018.1562417>

Schiller, K. S., Khmelkov, V. T., & Wang, X.-Q. (2002). Economic Development and the Effects of Family Characteristics on Mathematics Achievement. *Journal of Marriage and Family*, 64(3), 730-742. <https://doi.org/10.1111/j.1741-3737.2002.00730.x>

Schlaggar, B. L., & McCandliss, B. D. (2007). Development of neural systems for reading. *Annual Review of Neuroscience*, 30, 475-503. <https://doi.org/10.1146/annurev.neuro.28.061604.135645>

Schleicher, A. (2019). PISA 2018 : Insights and Interpretations. In *OECD Publishing*. OECD Publishing.

Schnack, H. G., Van Haren, N. E., Brouwer, R. M., Evans, A., Durston, S., Boomsma, D. I., ... Hulshoff Pol, H. E. (2015). Changes in thickness and surface area of the human cortex and their relationship with intelligence. *Cerebral cortex*, 25(6), 1608-1617.

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). <https://doi.org/10.1111/desc.12372>

Schwab, J. F., & Lew-Williams, C. (2016). Language learning, socioeconomic status, and child-directed speech. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Cognitive Science*, 7(4), 264-275.

Schwarz, N. (1999). Self-reports : How the questions shape the answers. *American psychologist*, 54(2), 93.

Secada, W. G., Fuson, K. C., & Hall, J. W. (1983). The transition from counting-all to counting-on in addition. *Journal for Research in Mathematics Education*, 14(1), 47-57.

Segers, E., Kleemans, T., & Verhoeven, L. (2015). Role of Parent Literacy and Numeracy Expectations and Activities in Predicting Early Numeracy Skills. *Mathematical Thinking and Learning*, 17(2-3), 219-236. <https://doi.org/10.1080/10986065.2015.1016819>

Sektnan, M., McClelland, M. M., Acock, A., & Morrison, F. J. (2010). Relations between early family risk, children's behavioral regulation, and academic achievement. *Early Childhood Research Quarterly*, 25(4), 464-479. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2010.02.005>

Sekuler, R., & Mierkiewicz, D. (1977). Children's judgments of numerical inequality. *Child Development*, 630-633.

Semenza, C., Meneghello, F., Arcara, G., Burgio, F., Gnoato, F., Facchini, S., ... Butterworth, B. (2014). A new clinical tool for assessing numerical abilities in neurological diseases : Numerical activities of daily living. *Frontiers in Aging Neuroscience*, 6, 112. <https://doi.org/10.3389/fnagi.2014.00112>

Sénéchal, M. (2006a). Reading Books to Young Children : What It does and doesn't do. *L1 Educational Studies in Language and Literature*, 06, Running Issue, 23-35. <https://doi.org/10.17239/L1ESLL-2006.06.03.05>

Sénéchal, M. (2006b). 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

Sénéchal, M. (2015). Young children's home literacy experiences. In *Oxford library of psychology. The Oxford handbook of reading* (p. 397-414). New York, NY, US: Oxford University Press.

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>

Sénéchal, M., LeFevre, J.-A., Hudson, E., & Lawson, E. P. (1996). Knowledge of storybooks as a predictor of young children's vocabulary. *Journal of Educational Psychology*, 88(3), 520-536. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.88.3.520>

Sénéchal, M., LeFevre, J.-A., Thomas, E. M., & Daley, K. E. (1998). Differential effects of home literacy experiences on the development of oral and written language. *Reading Research Quarterly*, 33(1), 96-116. <https://doi.org/10.1598/RRQ.33.1.5>

Sénéchal, M., & Young, L. (2008). The effect of family literacy interventions on children's acquisition of reading from kindergarten to grade 3 : A meta-analytic review. *Review of Educational Research*, 78(4), 880-907.

Seron, X., & Fayol, M. (1994). Number transcoding in children : A functional analysis. *British Journal of Developmental Psychology*, 12(3), 281-300.

Seyler, D. J., Kirk, E. P., & Ashcraft, M. H. (2003). Elementary subtraction. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition*, 29(6), 1339.

Shrager, J., & Siegler, R. S. (1998). SCADS : A Model of Children's Strategy Choices and Strategy Discoveries. *Psychological Science*, 9(5), 405-410.

Shum, J., Hermes, D., Foster, B. L., Dastjerdi, M., Rangarajan, V., Winawer, J., ... Parvizi, J. (2013). A Brain Area for Visual Numerals. *Journal of Neuroscience*, 33(16), 6709-6715. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.4558-12.2013>

Siegel, L. S. (1982). Reproductive, perinatal, and environmental factors as predictors of the cognitive and language development of preterm and full-term infants. *Child development*, 963-973.

Siegler, R. S. (1987). The perils of averaging data over strategies : An example from children's addition. *Journal of Experimental Psychology: General*, 116(3), 250-264.

<https://doi.org/10.1037/0096-3445.116.3.250>

Siegler, R. S. (1998). *Emerging minds : The process of change in children's thinking*. Oxford University Press.

Siegler, R. S., & Booth, J. L. (2004). Development of numerical estimation in young children. *Child development*, 75(2), 428-444.

Siegler, R. S., & Opfer, J. E. (2003). The development of numerical estimation : Evidence for multiple representations of numerical quantity. *Psychological science*, 14(3), 237-250.

Siegler, R. S., & Ramani, G. B. (2008). Playing linear numerical board games promotes low-income children's numerical development. *Developmental science*, 11(5), 655-661.

Siegler, R. S., & Shrager, J. (1984). Strategy choices in addition and subtraction : How do children know what to do? In *Hillsdale, NJ: Erlbaum. Origins of cognitive skills* (p. 229-293). Erlbaum.

Silinskas, G., Di Lonardo, S., Douglas, H., Xu, C., LeFevre, J.-A., Garckija, R., ... Raiziene, S. (2020). Responsive home numeracy as children progress from kindergarten through Grade 1. *Early Childhood Research Quarterly*, 53, 484-495. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2020.06.003>

Silinskas, G., Lerkkanen, M.-K., Tolvanen, A., Niemi, P., Poikkeus, A.-M., & Nurmi, J.-E. (2012). The frequency of parents' reading-related activities at home and children's reading skills during kindergarten and Grade 1. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 33(6), 302-310. <https://doi.org/10.1016/j.appdev.2012.07.004>

Silver, A. M., Elliott, L., & Libertus, M. E. (2021). When beliefs matter most : Examining children's math achievement in the context of parental math anxiety. *Journal of Experimental Child Psychology*, 201, 104992. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2020.104992>

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.

Simon, O., Mangin, J. F., Cohen, L., Le Bihan, D., & Dehaene, S. (2002). Topographical layout of hand, eye, calculation, and language-related areas in the human parietal lobe. *Neuron*, 33(3),

475-487. [https://doi.org/10.1016/s0896-6273\(02\)00575-5](https://doi.org/10.1016/s0896-6273(02)00575-5)

Simonsohn, U., Nelson, L. D., & Simmons, J. P. (2014a). P-curve : A key to the file-drawer. *Journal of experimental psychology: General*, 143(2), 534.

Simonsohn, U., Nelson, L. D., & Simmons, J. P. (2014b). p-curve and effect size : Correcting for publication bias using only significant results. *Perspectives on Psychological Science*, 9(6), 666-681.

Sirin, S. R. (2005). Socioeconomic Status and Academic Achievement : A Meta-Analytic Review of Research. *Review of Educational Research*, 75(3), 417-453.

<https://doi.org/10.3102/00346543075003417>

Skwarchuk, S.-L. (2009). How Do Parents Support Preschoolers' Numeracy Learning Experiences at Home? *Early Childhood Education Journal*, 37(3), 189-197.

<https://doi.org/10.1007/s10643-009-0340-1>

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>

Slusser, E., Ribner, A., & Shusterman, A. (2018). Language counts : Early language mediates the relationship between parent education and children's math ability. *Developmental Science*, 22.

<https://doi.org/10.1111/desc.12773>

Smith-Woolley, E., Pingault, J.-B., Selzam, S., Rimfeld, K., Krapohl, E., von Stumm, S., ... Plomin, R. (2018). Differences in exam performance between pupils attending selective and non-selective schools mirror the genetic differences between them. *Npj Science of Learning*, 3(1), 1-7.

<https://doi.org/10.1038/s41539-018-0019-8>

Sokolowski, H. M., Fias, W., Bosah Ononye, C., & Ansari, D. (2017). Are numbers grounded in a general magnitude processing system? A functional neuroimaging meta-analysis. *Neuropsychologia*, 105, 50-69. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2017.01.019>

Sokolowski, H. M., Fias, W., Mousa, A., & Ansari, D. (2017). Common and distinct brain regions in both parietal and frontal cortex support symbolic and nonsymbolic number processing in humans : A functional neuroimaging meta-analysis. *NeuroImage*, 146, 376-394.

<https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2016.10.028>

Sokolowski, H. M., Hawes, Z., Peters, L., & Ansari, D. (2021). Symbols Are Special : An fMRI Adaptation Study of Symbolic, Nonsymbolic, and Non-Numerical Magnitude Processing in the Human Brain. *Cerebral Cortex Communications*, 2(3). <https://doi.org/10.1093/texcom/tgab048>

Sommerauer, G., Graß, K.-H., Grabner, R. H., & Vogel, S. E. (2020). The semantic control network mediates the relationship between symbolic numerical order processing and arithmetic performance in children. *Neuropsychologia*, 141, 107405.

<https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2020.107405>

Son, S. H., & Hur, J. (2020). *Parental Math Talk During Home Cooking and Math Skills in Head Start Children : The Role of Task Management Talk*. <https://doi.org/10.1080/02568543.2019.1704318>

Soni, A., & Kumari, S. (2017). The Role of Parental Math Anxiety and Math Attitude in Their Children's Math Achievement. *International Journal of Science and Mathematics Education*, 15(2), 331-347. <https://doi.org/10.1007/s10763-015-9687-5>

Sonnenschein, S., Galindo, C., Metzger, S. R., Thompson, J. A., Huang, H. C., & Lewis, H. (2012). Parents' Beliefs about Children's Math Development and Children's Participation in Math Activities. *Child Development Research*. <https://doi.org/10.1155/2012/851657>

Sonnenschein, S., Metzger, S. R., Dowling, R., Gay, B., & Simons, C. L. (2016). Extending an Effective Classroom-Based Math Board Game Intervention to Preschoolers' Homes. *Journal of Applied Research on Children*, 7(2). Consulté à l'adresse <https://eric.ed.gov/?id=EJ1188425>

Sonnenschein, S., Metzger, S. R., & Thompson, J. A. (2016). Low-Income Parents' Socialization

of Their Preschoolers' Early Reading and Math Skills. *Research in Human Development*, 13(3), 207-224. <https://doi.org/10.1080/15427609.2016.1194707>

Sonnenschein, S., Stites, M., & Dowling, R. (2020). Learning at home : What preschool children's parents do and what they want to learn from their children's teachers. *Journal of Early Childhood Research*, 1476718X20971321. <https://doi.org/10.1177/1476718X20971321>

Soto-Calvo, E., Simmons, F. R., Adams, A.-M., Francis, H. N., & Giofre, D. (2020). Pre-schoolers' home numeracy and home literacy experiences and their relationships with early number skills : Evidence from a UK study. *Early Education and Development*, 31(1), 113-136.

Soto-Calvo, E., Simmons, F. R., Willis, C., & Adams, A.-M. (2015). Identifying the cognitive predictors of early counting and calculation skills : Evidence from a longitudinal study. *Journal of Experimental Child Psychology*, 140, 16-37. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2015.06.011>

Sowell, E. R., Peterson, B. S., Thompson, P. M., Welcome, S. E., Henkenius, A. L., & Toga, A. W. (2003). Mapping cortical change across the human life span. *Nature neuroscience*, 6(3), 309-315.

Starkey, P. (1992). The early development of numerical reasoning. *Cognition*, 43(2), 93-126. [https://doi.org/10.1016/0010-0277\(92\)90034-F](https://doi.org/10.1016/0010-0277(92)90034-F)

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>

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

Starr, A., Libertus, M. E., & Brannon, E. M. (2013). Number sense in infancy predicts mathematical abilities in childhood. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(45), 18116-18120. <https://doi.org/10.1073/pnas.1302751110>

Starrfelt, R., & Behrmann, M. (2011). Number reading in pure alexia—A review. *Neuropsychologia*, 49(9), 2283-2298. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2011.04.028>

Stevens, J. H., & Bakeman, R. (1985). A factor analytic study of the HOME scale for infants. *Developmental Psychology*, 21(6), 1196-1203. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.21.6.1196>

Stevenson, H. W., Lee, S.-Y., & Stigler, J. W. (1986). Mathematics achievement of Chinese, Japanese, and American children. *Science*, 231(4739), 693-699.

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

Stull, J. C. (2013). Family Socioeconomic Status, Parent Expectations, and a Child's Achievement. *Research in Education*, 90(1), 53-67. <https://doi.org/10.7227/RIE.90.1.4>

Stumm, S. von, Rimfeld, K., Dale, P. S., & Plomin, R. (2020). Preschool Verbal and Nonverbal Ability Mediate the Association Between Socioeconomic Status and School Performance. *Child Development*, 91(3), 705-714. <https://doi.org/10.1111/cdev.13364>

Stuss, D. T. (2011). Functions of the frontal lobes : Relation to executive functions. *Journal of the international neuropsychological Society*, 17(5), 759-765.

Su, M., Thiebaut de Schotten, M., Zhao, J., Song, S., Zhou, W., Gong, G., ... Shu, H. (2020). Influences of the early family environment and long-term vocabulary development on the structure of white matter pathways : A longitudinal investigation. *Developmental Cognitive Neuroscience*, 42, 100767. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2020.100767>

Suárez-Pellicioni, M., & Booth, J. R. (2018). Fluency in symbolic arithmetic refines the approximate number system in parietal cortex. *Human Brain Mapping*, 39(10), 3956-3971. <https://doi.org/10.1002/hbm.24223>

Supekar, K., Swigart, A. G., Tenison, C., Jolles, D. D., Rosenberg-Lee, M., Fuchs, L., & Menon, V. (2013). Neural predictors of individual differences in response to math tutoring in primary-grade school children. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, *110*(20), 8230-8235.

<https://doi.org/10.1073/pnas.1222154110>

Susperreguy, M. I., Burr, S. D. L., Xu, C., Douglas, H., & LeFevre, J.-A. (2020). Children's Home Numeracy Environment Predicts Growth of their Early Mathematical Skills in Kindergarten. *Child Development*, *91*(5), 1663-1680. <https://doi.org/10.1111/cdev.13353>

Susperreguy, M. I., & Davis-Kean, P. E. (2016). Maternal Math Talk in the Home and Math Skills in Preschool Children. *Early Education and Development*, *27*(6), 841-857.

<https://doi.org/10.1080/10409289.2016.1148480>

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>

Susperreguy, M. I., Jiménez Lira, C., Xu, C., LeFevre, J.-A., Blanco Vega, H., Benavides Pando, E. V., & Ornelas Contreras, M. (2021). Home Learning Environments of Children in Mexico in Relation to Socioeconomic Status. *Frontiers in Psychology*, *12*.

<https://doi.org/10.3389/fpsyg.2021.626159>

Svenson, O. (1985). Memory retrieval of answers of simple additions as reflected in response latencies. *Acta Psychologica*, *59*(3), 285-304.

Szczygieł, M. (2020). When does math anxiety in parents and teachers predict math anxiety and math achievement in elementary school children? The role of gender and grade year. *Social Psychology of Education*, *23*(4), 1023-1054. <https://doi.org/10.1007/s11218-020-09570-2>

Szűcs, D., & Myers, T. (2017). A critical analysis of design, facts, bias and inference in the approximate number system training literature : A systematic review. *Trends in Neuroscience and Education*, *6*, 187-203. <https://doi.org/10.1016/j.tine.2016.11.002>

Szűcs, D., Nobes, A., Devine, A., Gabriel, F. C., & Gebuis, T. (2013). Visual stimulus parameters seriously compromise the measurement of approximate number system acuity and comparative effects between adults and children. *Frontiers in psychology*, *4*, 444.

Tamis-LeMonda, C. S., Luo, R., McFadden, K. E., Bandel, E. T., & Valloton, C. (2017). Early home learning environment predicts children's 5th grade academic skills. *Applied Developmental Science*, *0*(0), 1-17. <https://doi.org/10.1080/10888691.2017.1345634>

Taylor, J. S. H., Rastle, K., & Davis, M. H. (2013). Can cognitive models explain brain activation during word and pseudoword reading ? A meta-analysis of 36 neuroimaging studies. *Psychological bulletin*, *139*(4), 766.

Taylor, L., D. Clayton, J., & J. Rowley, S. (2004). Academic Socialization : Understanding Parental Influences on Children's School-Related Development in the Early Years. *Review of General Psychology*, *8*, 163-178. <https://doi.org/10.1037/1089-2680.8.3.163>

Tazouti, Y. (2014). Relations entre l'implication parentale dans la scolarité et les performances scolaires de l'enfant : Que faut-il retenir des études empiriques ? *La revue internationale de l'éducation familiale*, n° 36(2), 97-116.

Tazouti, Y., & Jarlégan, A. (2010). Sentiment de compétence parentale, participation parentale au travail scolaire et performances scolaires de l'enfant. *La revue internationale de l'éducation familiale*, n° 28(2), 23-40.

Tazouti, Y., & Jarlégan, A. (2016). The mediating effects of parental self-efficacy and parental involvement on the link between family socioeconomic status and children's academic achievement. *Journal of Family Studies*, *25*(3), 250-266. <https://doi.org/10.1080/13229400.2016.1241185>

Tazouti, Y., Malarde, A., & Michea, A. (2010). Parental beliefs concerning development and

education, family educational practices and children's intellectual and academic performances. *European Journal of Psychology of Education*, 25(1), 19-35. <https://doi.org/10.1007/s10212-009-0002-0>

Tazouti, Y., Portenseigne, C., & Luxembourger, C. (2018). Relations entre anxiété parentale et anxiété de l'enfant face à la scolarisation. *Enfance*, N° 4(4), 533-548.

Tazouti, Y., Prévot, E., & Constant, M. (2009). Évaluation de l'environnement familial par la version française du HOME préscolaire. *Enfance*, N° 2(2), 223-239.

Tazouti, Y., Thomas, A., & Hoareau, L. (2020). Les programmes d'intervention pour les compétences en littératie et en numératie au préscolaire. *La revue internationale de l'éducation familiale*, n° 47(1), 33-52.

Tazouti, Y., Viriot-Goedel, C., Matter, C., Geiger-Jaillet, A., Carol, R., & Deviterne, D. (2011). French nursery schools and German kindergartens : Effects of individual and contextual variables on early learning. *European Journal of Psychology of Education*, 26(2), 199-213. <https://doi.org/10.1007/s10212-010-0043-4>

Temple, E., & Posner, M. I. (1998). Brain mechanisms of quantity are similar in 5-year-old children and adults. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 95(13), 7836-7841. <https://doi.org/10.1073/pnas.95.13.7836>

Thippana, J., Elliott, L., Gehman, S., Libertus, K., & Libertus, M. E. (2020). Parents' use of number talk with young children : Comparing methods, family factors, activity contexts, and relations to math skills. *Early Childhood Research Quarterly*, 53, 249-259. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2020.05.002>

Thomas, A., Tazouti, Y., Hoareau, L., Luxembourger, C., Hubert, B., & Jarlégan, A. (2021). Early Numeracy Assessment In French preschool : Structural analysis and links with children's characteristics. *International Journal of Early Years Education*, 0(0), 1-18. <https://doi.org/10.1080/09669760.2021.1938518>

Thompson, R. J., Napoli, A. R., & Purpura, D. J. (2017). Age-related differences in the relation between the home numeracy environment and numeracy skills. *Infant and Child Development*, 26(5). <https://doi.org/10.1002/icd.2019>

Thomson, D. M., & Tulving, E. (1970). Associative encoding and retrieval : Weak and strong cues. *Journal of experimental psychology*, 86(2), 255.

Thomson, S. (2018). Achievement at school and socioeconomic background—An educational perspective. *Npj Science of Learning*, 3(1), 1-2. <https://doi.org/10.1038/s41539-018-0022-0>

Tooley, U. A., Bassett, D. S., & Mackey, A. P. (2021). Environmental influences on the pace of brain development. *Nature Reviews Neuroscience*, 22(6), 372-384. <https://doi.org/10.1038/s41583-021-00457-5>

Tosto, M. G., Petrill, S. A., Halberda, J., Trzaskowski, M., Tikhomirova, T. N., Bogdanova, O. Y., ... Kovas, Y. (2014). Why do we differ in number sense? Evidence from a genetically sensitive investigation. *Intelligence*, 43, 35-46. <https://doi.org/10.1016/j.intell.2013.12.007>

Totsika, V., & Sylva, K. (2004). The Home Observation for Measurement of the Environment Revisited. *Child and Adolescent Mental Health*, 9(1), 25-35. <https://doi.org/10.1046/j.1475-357X.2003.00073.x>

Trick, L. M., & Pylyshyn, Z. W. (1994). Why are small and large numbers enumerated differently ? A limited-capacity preattentive stage in vision. *Psychological review*, 101(1), 80.

Tucker-Drob, E. M. (2013). How many pathways underlie socioeconomic differences in the development of cognition and achievement? *Learning and Individual Differences*, 25, 12-20. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2013.01.015>

Tulving, E., & Markowitsch, H. J. (1998). Episodic and declarative memory : Role of the hippocampus. *Hippocampus*, 8(3), 198-204.

- Tulving, E., & Thomson, D. M. (1971). Retrieval processes in recognition memory : Effects of associative context. *Journal of Experimental Psychology*, 87(1), 116.
- Turkeltaub, P. E., Gareau, L., Flowers, D. L., Zeffiro, T. A., & Eden, G. F. (2003). Development of neural mechanisms for reading. *Nature neuroscience*, 6(7), 767-773.
- Uittenhove, K., Thevenot, C., & Barrouillet, P. (2016). Fast automated counting procedures in addition problem solving : When are they used and why are they mistaken for retrieval? *Cognition*, 146, 289-303. <https://doi.org/10.1016/j.cognition.2015.10.008>
- US Department of Education, N. C. for E. S. (2001). *User's manual for the ECLS-K base year public-use data files and electronic codebook*. Author Washington, DC.
- Uscianowski, C., Almeda, Ma. V., & Ginsburg, H. P. (2020). Differences in the complexity of math and literacy questions parents pose during storybook reading. *Early Childhood Research Quarterly*, 50, 40-50. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2018.07.003>
- Valle-Lisboa, J., Cabana, Á., Eisinger, R., Mailhos, Á., Luzardo, M., Halberda, J., & Maiche, A. (2016). Cognitive abilities that mediate SES's effect on elementary mathematics learning : The Uruguayan tablet-based intervention. *PROSPECTS*, 46(2), 301-315. <https://doi.org/10.1007/s11125-017-9392-y>
- Van Loosbroek, E., & Smitsman, A. W. (1990). Visual perception of numerosity in infancy. *Developmental Psychology*, 26(6), 916-922. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.26.6.911.b>
- Van Nieuwenhoven, C., Noël, M.-P., & Grégoire, J. (2001). *Tedi-math : Test diagnostique des compétences de base en mathématiques*. Paris, France: Edition du Centre de Psychologie Appliquée.
- van Bergen, E., Bishop, D., van Zuijen, T., & de Jong, P. F. (2015). How does parental reading influence children's reading ? A study of cognitive mediation. *Scientific studies of reading*, 19(5), 325-339.
- van Bergen, E., van Zuijen, T., Bishop, D., & F. de Jong, P. (2016). Why Are Home Literacy Environment and Children's Reading Skills Associated? What Parental Skills Reveal. *Reading Research Quarterly*. <https://doi.org/10.1002/rrq.160>
- Vanbinst, K., Bellon, E., & Dowker, A. (2020). Mathematics Anxiety : An Intergenerational Approach. *Frontiers in Psychology*, 0. <https://doi.org/10.3389/fpsyg.2020.01648>
- Vanbinst, K., Ghesquiere, P., & De Smedt, B. (2012). Numerical magnitude representations and individual differences in children's arithmetic strategy use. *Mind, Brain, and Education*, 6(3), 129-136.
- Vandell, D. L. (1979). A microanalysis of toddlers' social interaction with mothers and fathers. *The Journal of Genetic Psychology*, 134(2), 299-312.
- Vandermaas-Peeler, M., Boomgarden, E., Finn, L., & Pittard, C. (2012). Parental Support of Numeracy during a Cooking Activity with Four-Year-Olds. *International Journal of Early Years Education*, 20(1), 78-93. <https://doi.org/10.1080/09669760.2012.663237>
- Vandermaas-Peeler, M., Nelson, J., Bumpass, C., & Sassine, B. (2009). Numeracy-Related Exchanges in Joint Storybook Reading and Play. *International Journal of Early Years Education*, 17(1), 67-84. <https://doi.org/10.1080/09669760802699910>
- van Praag, H., Kempermann, G., & Gage, F. H. (2000). Neural consequences of environmental enrichment. *Nature Reviews Neuroscience*, 1(3), 191-198. <https://doi.org/10.1038/35044558>
- Vasilyeva, M., Laski, E., Veraksa, A., Weber, L., & Bukhalenkova, D. (2018). Distinct Pathways From Parental Beliefs and Practices to Children's Numeric Skills. *Journal of Cognition and Development*, 19(4), 345-366. <https://doi.org/10.1080/15248372.2018.1483371>
- Venkatraman, V., Ansari, D., & Chee, M. W. L. (2005). Neural correlates of symbolic and non-symbolic arithmetic. *Neuropsychologia*, 43(5), 744-753. <https://doi.org/10.1016/j.neuropsychologia.2004.08.005>
- Villani, C., Torossian, C., & Dias, T. (2018). *21 mesures pour l'enseignement des*

mathématiques.

Visser, M. M., Juan, A. L., & Hannan, S. M. (2019). Early learning experiences, school entry skills and later mathematics achievement in South Africa. *South African Journal of Childhood Education, 9*(1), 1-9.

Vogel, S. E., & De Smedt, B. (2021). Developmental brain dynamics of numerical and arithmetic abilities. *Npj Science of Learning, 6*(1), 1-11. <https://doi.org/10.1038/s41539-021-00099-3>

Vogel, S. E., Faulkenberry, T. J., & Grabner, R. H. (2021). Quantitative and Qualitative Differences in the Canonical and the Reverse Distance Effect and Their Selective Association With Arithmetic and Mathematical Competencies. *Frontiers in Education, 6*, 274. <https://doi.org/10.3389/feduc.2021.655747>

Vogel, S. E., Goffin, C., & Ansari, D. (2015). Developmental specialization of the left parietal cortex for the semantic representation of Arabic numerals : An fMR-adaptation study. *Developmental Cognitive Neuroscience, 12*(Supplement C), 61-73. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2014.12.001>

Vogel, S. E., Goffin, C., Bohnenberger, J., Koschutnig, K., Reishofer, G., Grabner, R. H., & Ansari, D. (2017). The left intraparietal sulcus adapts to symbolic number in both the visual and auditory modalities : Evidence from fMRI. *NeuroImage, 153*(Supplement C), 16-27. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2017.03.048>

Vogel, S. E., Koren, N., Falb, S., Haselwander, M., Spradley, A., Schadenbauer, P., ... Grabner, R. H. (2019). Automatic and intentional processing of numerical order and its relationship to arithmetic performance. *Acta Psychologica, 193*, 30-41. <https://doi.org/10.1016/j.actpsy.2018.12.001>

Von Aster, M., & Dellatolas, G. (2005). *ZAREKI-R: Batterie pour l'évaluation du traitement des nombres et du calcul chez l'enfant*. ECPA/Pearson.

Von Aster, M., & Shalev, R. S. (2007). Number development and developmental dyscalculia. *Developmental medicine & child neurology, 49*(11), 868-873.

Vukovic, R. K., Roberts, S. O., & Green Wright, L. (2013). From Parental Involvement to Children's Mathematical Performance : The Role of Mathematics Anxiety. *Early Education and Development, 24*(4), 446-467. <https://doi.org/10.1080/10409289.2012.693430>

Vygotsky, L. S., & Cole, M. (1978). *Mind in Society : Development of Higher Psychological Processes*. Harvard University Press.

Wallon, H. (1954). Les milieux, les groupes et la psychogénèse de l'enfant. *Cahiers internationaux de sociologie, 16*, 2-13.

Wallon, H. (1959). Le rôle de l'autre dans la conscience du moi. *Enfance, 12*(3), 277-286.

Wang, J., Halberda, J., & Feigenson, L. (2021). Emergence of the Link Between the Approximate Number System and Symbolic Math Ability. *Child Development, 92*(2), e186-e200. <https://doi.org/10.1111/cdev.13454>

Wang, J., Odic, D., Halberda, J., & Feigenson, L. (2016). Changing the precision of preschoolers' approximate number system representations changes their symbolic math performance. *Journal of Experimental Child Psychology, 147*(Supplement C), 82-99. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2016.03.002>

Waters, N. E., Ahmed, S. F., Tang, S., Morrison, F. J., & Davis-Kean, P. E. (2021). Pathways from socioeconomic status to early academic achievement : The role of specific executive functions. *Early Childhood Research Quarterly, 54*, 321-331. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2020.09.008>

Watts, T. W., Duncan, G. J., Clements, D. H., & Sarama, J. (2018). What is the long-run impact of learning mathematics during preschool? *Child development, 89*(2), 539-555.

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.

Wei, W., Li, Y., & Su, H.-Y. (2020). Predicting the growth patterns in early mathematics

- achievement from cognitive and environmental factors among Chinese kindergarten children. *Learning and Individual Differences*, 79, 101841. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2020.101841>
- West, J., Denton, K., & Reaney, L. M. (2000). The Kindergarten Year : Findings from the Early Childhood Longitudinal Study, Kindergarten Class of 1998-99. NCES 2001-023. In *National Center for Education Statistics*. National Center for Education Statistics. Consulté à l'adresse <https://eric.ed.gov/?id=ED546029>
- Whalen, J., Gallistel, C. R., & Gelman, R. (1999). Nonverbal Counting in Humans : The Psychophysics of Number Representation. *Psychological Science*, 10(2), 130-137. <https://doi.org/10.1111/1467-9280.00120>
- White, K. R. (1982). The relation between socioeconomic status and academic achievement. *Psychological Bulletin*, 91(3), 461-481. <https://doi.org/10.1037/0033-2909.91.3.461>
- Wigfield, A., & Eccles, J. S. (2000). Expectancy-Value Theory of Achievement Motivation. *Contemporary Educational Psychology*, 25(1), 68-81. <https://doi.org/10.1006/ceps.1999.1015>
- Wiig, E. H., Secord, W. A., & Semel, E. (2013). *Clinical evaluation of language fundamentals : CELF-5*. Pearson.
- Wilkey, E. D., & Ansari, D. (2020). Challenging the neurobiological link between number sense and symbolic numerical abilities. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1464(1), 76-98. <https://doi.org/10.1111/nyas.14225>
- Wilson, A. J., & Dehaene, S. (2007). *Number sense and developmental dyscalculia*.
- Wood, J. N., & Spelke, E. S. (2005). Infants' enumeration of actions : Numerical discrimination and its signature limits. *Developmental science*, 8(2), 173-181.
- Woodcock, R. W., Mather, N., McGrew, K. S., & Wendling, B. J. (2001). *Woodcock-Johnson III tests of cognitive abilities*.
- Wynn, K. (1990). Children's understanding of counting. *Cognition*, 36(2), 155-193.
- Wynn, K. (1992a). Addition and subtraction by human infants. *Nature*, 358(6389), 749-750. <https://doi.org/10.1038/358749a0>
- Wynn, K. (1992b). Children's acquisition of the number words and the counting system. *Cognitive psychology*, 24(2), 220-251.
- Wynn, K. (1996). Infants' Individuation and Enumeration of Actions. *Psychological Science*, 7(3), 164-169. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9280.1996.tb00350.x>
- Xenidou-Dervou, I., Molenaar, D., Ansari, D., van der Schoot, M., & van Lieshout, E. C. (2017). Nonsymbolic and symbolic magnitude comparison skills as longitudinal predictors of mathematical achievement. *Learning and Instruction*, 50, 1-13.
- Xu, C., & LeFevre, J.-A. (2021). Children's Knowledge of Symbolic Number in Grades 1 and 2 : Integration of Associations. *Child Development*, 92(3), 1099-1117. <https://doi.org/10.1111/cdev.13473>
- Xu, F., & Spelke, E. S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, 74(1), B1-B11.
- Xu, Fei. (2003). Numerosity discrimination in infants : Evidence for two systems of representations. *Cognition*, 89(1), B15-B25.
- Yañez, A. D.-B., Couderc, A., Longo, L., Merchie, A., Chesnokova, H., Langlois, E., ... Prado, J. (2020). Learning to run the number line : The development of attentional shifts during single-digit arithmetic. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1477(1), 79-90.
- Yang, Y. (2003). Dimensions of Socio-economic Status and their Relationship to Mathematics and Science Achievement at Individual and Collective Levels. *Scandinavian Journal of Educational Research*, 47(1), 21-41. <https://doi.org/10.1080/00313830308609>
- Yaple, Z. A., & Yu, R. (2019). Functional and Structural Brain Correlates of Socioeconomic Status. *Cerebral Cortex*. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhz080>
- Yeo, D. J., Wilkey, E. D., & Price, G. R. (2017). The search for the number form area : A

functional neuroimaging meta-analysis. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 78, 145-160. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2017.04.027>

Yeung, W. J., Linver, M. R., & Brooks-Gunn, J. (2002). How money matters for young children's development : Parental investment and family processes. *Child Development*, 73(6), 1861-1879. <https://doi.org/10.1111/1467-8624.t01-1-00511>

Zamarian, L., Ischebeck, A., & Delazer, M. (2009). Neuroscience of learning arithmetic—Evidence from brain imaging studies. *Neuroscience and Biobehavioral Reviews*, 33(6), 909-925. <https://doi.org/10.1016/j.neubiorev.2009.03.005>

Zhou, X., Huang, J., Wang, Z., Wang, B., Zhao, Z., Yang, L., & Yang, Z. (2006). Parent-child interaction and children's number learning. *Early Child Development and Care*, 176(7), 763-775. <https://doi.org/10.1080/03004430500232680>

Zippert, E. L., Douglas, A.-A., Smith, M. R., & Rittle-Johnson, B. (2020). Preschoolers' broad mathematics experiences with parents during play. *Journal of Experimental Child Psychology*, 192, 104757. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2019.104757>

Zippert, E. L., & Ramani, G. B. (2016). Parents' Estimations of Preschoolers' Number Skills Relate to at-Home Number-Related Activity Engagement. *Infant and Child Development*, 26(2), e1968. <https://doi.org/10.1002/icd.1968>

Zippert, E. L., & Rittle-Johnson, B. (2020). The home math environment : More than numeracy. *Early Childhood Research Quarterly*, 50, 4-15. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2018.07.009>

ANNEXES

Annexe 1 : Table

Tableau A.1 : Équivalent système scolaire français et américain

FRANCE		USA	
Ecole maternelle	Petite Section	Preschool	Kindergarten
	Moyenne Section	Preschool / Pre-K	
	Grande Section	Kindergarten	
Ecole élémentaire	CP	1 st grade	Elementary school
	CE1	2 nd grade	
	CE2	3 rd grade	
	CM1	4 th grade	
	CM2	5 th grade	
Collège	Sixième (6 ^{eme})	6 th grade	Middle School ou Junior High School
	Cinquième (5 ^{eme})	7 th grade	
	Quatrième (4 ^{eme})	8 th grade	
	Troisième (3 ^{eme})	9 th grade	High School ou Senior High School
Lycée	Seconde (2 ^{nde})	10 th grade	
	Première (1 ^{ere})	11 th grade	
	Terminale	12 th grade	
Facultés, Ecoles, Université		University, College	

Annexe 2 : Aspects neurocognitifs des liens entre statut socio-économique familial et compétences langagières et exécutives de l'enfant

L'objectif des études présentées dans cette annexe est de compléter l'évaluation extensive du « profil cognitif » et des différences cérébrales structurelles selon les caractéristiques socio-économiques des enfants (présentées dans le chapitre 3 section 1). Nous proposons de dresser un aperçu des études qui ont centré leurs analyses sur les domaines cognitifs identifiés comme majoritairement susceptibles d'être en lien avec le SES : le langage et les fonctions exécutives. L'objectif de cette annexe est de donc de confirmer, mais surtout de détailler les liens entre les caractéristiques socio-économiques familiales et ces deux domaines cognitifs, à l'aide de résultats comportementaux et en imagerie fonctionnelle cérébrale.

L'intérêt de coupler les études comportementales à celles qui mesurent la façon dont le cerveau traite les stimuli ou accomplit des tâches spécifiques est double. Cela peut non seulement confirmer le lien entre disparités socio-économiques et le fonctionnement au sein des domaines du langage et des fonctions exécutives, via des différences d'activité cérébrale au sein de régions cérébrales connues pour leurs rôles dans ces domaines. D'autre part, l'utilisation de mesures d'imagerie fonctionnelle peut également apporter une valeur ajoutée aux travaux comportementaux en révélant des dissociations non objectivables d'un point de vue comportemental.

A2.1. Le domaine neurocognitif du langage

Au sein du domaine cognitif spécifique au langage, quatre domaines d'étude de base peuvent être identifiés : les systèmes phonologique, lexical, sémantique et syntaxique (Mazeau & Pouhet, 2014; Moeschler & Auchlin, 2009). Le système phonologique correspond aux sons de la langue (ou « phonèmes »). Le système lexical correspond aux différents mots de la langue, porteurs de diverses significations (le système sémantique). Enfin, le système syntaxique correspond aux règles spécifiques permettant d'articuler ensemble différents types de mots pour former des phrases. Parmi ces différents systèmes langagiers, plusieurs composantes spécifiques peuvent être identifiées, notamment du fait de leur rôle de précurseurs des compétences de lecture. Ces composantes seraient susceptibles de varier avec les

caractéristiques socio-économiques (les systèmes phonologique, lexical ou syntaxique ou encore la compréhension de texte ; pour revues, voir Hoff, 2013; Pace, Luo, Hirsh-Pasek, & Golinkoff, 2017; Ursache & Noble, 2016) . Certaines des batteries utilisées pour l'identification de domaines cognitifs différents (présentés dans la section 1.1. du chapitre 3) avaient déjà esquissé une dissociation de certains sous-scores cognitifs au sein des domaines langagiers. Par exemple, Noble et collaborateurs (2005) avaient montré que les deux épreuves langagières les plus altérées chez les enfants défavorisés d'un point de vue socio-économique étaient celles évaluant le niveau de vocabulaire et de phonologie.

A2.1.1. SES et composante lexicale du langage

- *Résultats comportementaux*

Concernant le système lexical, un travail pionnier de Hart et Risley (1995) a permis de faire état de différences socio-économiques dans la quantité de vocabulaire maîtrisée par les enfants dès le début de la parole et d'une augmentation ensuite de ces différences au cours du développement. Hoff (2003) a obtenu des résultats équivalents à partir de mesures « écologiques » d'enregistrement des échanges langagiers spontanés, à domicile, entre des enfants de 2 ans et leur mère. Ces enregistrements étaient réalisés à deux reprises, à 10 semaines d'intervalle. Les résultats ont montré qu'une plus grande quantité de vocabulaire était produite par les enfants issus des milieux socio-économiques les plus favorisés, par rapport à leurs pairs défavorisés. En suivant l'évolution du vocabulaire de nourrissons britanniques sur une période de 6 mois (évalués à leurs 18 mois et à leurs 24 mois), Fernald et collaborateurs (2013) ont également montré des résultats similaires. Aux deux temps de l'étude, les parents devaient indiquer sur une liste de 680 items les mots que leur enfant était capable de « comprendre » et ceux que leur enfant était capable de « comprendre *et* dire ». Les résultats ont montré qu'il existait déjà des disparités socio-économiques significatives dans la quantité de vocabulaire expressif des enfants à 18 mois et que ces disparités se creusaient ensuite davantage en l'espace de 6 mois. (voir **Figure A.1**, tirée de Fernald et al., 2013).

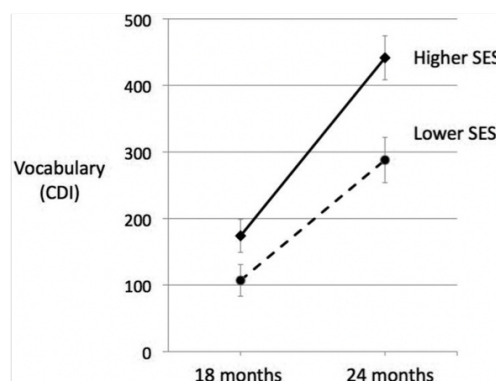


Figure A1 : Figure tirée de Fernald et al. (2013) illustrant le niveau de vocabulaire (nombre moyen de mots produits, en ordonnée) des enfants à l'âge de 18 puis de 24 mois (en abscisse) selon leur SES familial (ligne pleine : haut SES ; ligne discontinue : bas SES). Mesure de vocabulaire expressif : inventaire rapporté par les parents à l'échelle du Mac Arthur/Bates. Les barres d'erreurs représentent les écarts types de la moyenne des participants. $N=48$

Des données obtenues sur 167 enfants français âgés de 5 ans ont également permis de montrer l'existence d'une relation entre score de vocabulaire et niveau socio-économique (données issues de la standardisation d'une échelle d'évaluation française de différentes habiletés précoces du langage ; Thomas et al., 2021). Ces résultats de disparités socio-économiques dans la quantité de vocabulaire maîtrisée par les jeunes enfants ont par ailleurs été répliqués dans plusieurs études à travers différents pays (pour revue, voir Levine et al., 2020) et pourraient se maintenir au-delà de la petite enfance. Par exemple, Sarsour et collaborateurs (2011) ont mis en évidence l'existence de telles différences chez des enfants américains âgés de 10 ans. À l'aide de données d'une cohorte longitudinale (la Early Childhood Longitudinal Study), Farkas et Beron (2004) ont proposé un modèle développemental de la relation entre statut socio-économique et croissance du vocabulaire. Ils ont ainsi montré qu'à l'âge de 36 mois, il existait déjà de larges disparités entre les enfants, que ces disparités avaient tendance à s'aggraver jusqu'à l'âge de 5 ans et à se maintenir ensuite de façon stable.

- *Résultats neurocognitifs*

Le recours aux mesures d'électro-encéphalographie a également permis de proposer l'identification d'effets cérébraux susceptibles de sous-tendre l'apprentissage de nouveaux mots selon les caractéristiques socio-économiques des enfants (Ralph, Schneider, Abel, & Maguire, 2020). Soixante-quatre enfants anglais âgés de 8 à 10 et issus de milieux socio-économiques variés ont d'abord été évalués sur différents scores langagiers. Un lien était objectivé entre leurs caractéristiques socio-économiques et leurs scores de vocabulaire, mais il n'y avait pas de différences significatives entre les groupes pour la fluence de lecture ou la compréhension de texte. Pendant une tâche de lecture originale, l'activité cérébrale des enfants a été enregistrée en utilisant des mesures de « potentiels évoqués » de l'onde N400 via la technique d'électroencéphalographie. La tâche de lecture réalisée pendant l'enregistrement de l'activité cérébrale comportait des « groupes » de trois phrases contenant un mot identique : ce mot pouvait être connu par les enfants (*situation contrôle*) ou « nouveau » (*situation expérimentale*, pour des exemples de stimuli voir **Figure A2**, tirée de Ralph et al., 2020). À partir du contexte des trois phrases, il était demandé aux enfants de proposer un mot connu à la place du mot nouveau (pseudo-mot) (mots attendus considérés comme de « hautes fréquences » et issus de l'inventaire MacArthur-Bates Communicative Developmental Inventories ; Fenson et al., 1994). La réponse des enfants était considérée comme valide si celle-ci était sémantiquement correcte. Au niveau comportemental, Ralph et collaborateurs (2020) ont montré qu'il existait des disparités socio-économiques dans la capacité à substituer ce nouveau mot par un mot connu, et donc à lui attribuer du sens d'après le contexte des phrases à travers lesquelles il était présenté. Ces différences entre les enfants de milieux socio-économiques différents pouvaient s'expliquer par leurs différences de compétences en vocabulaire (mais pas par leurs performances en compréhension de lecture). Au niveau de l'activité cérébrale pendant la réalisation de cette tâche, Ralph et collaborateurs (2020) ont veillé à mesurer l'onde N400 connu pour participer à l'apprentissage de mots nouveaux chez l'enfant (Abel, Schneider, & Maguire, 2018) et chez l'adulte (Mestres-Missé, Rodriguez-Fornells, & Münte, 2007). Lors du traitement des mots connus (condition contrôle), aucune différence socio-économique n'était rapportée. En revanche, lors du traitement des mots nouveaux, les enfants issus des foyers

socio-économiques les plus favorisés ont montré une atténuation de la N400 (au fur et à mesure de l'exposition à ce mot nouveau - au travers des 3 phrases- et de la signification qu'ils apportaient à ce mot nouveau) tandis que leurs pairs plus défavorisés n'ont pas présenté cette atténuation. Ces résultats complètent les travaux comportementaux présentés précédemment en illustrant comment les variations de l'activité cérébrale dédiée à l'apprentissage de mots nouveaux (susceptibles de mener à l'augmentation du vocabulaire) pourraient participer à la compréhension du phénomène de disparités socio-économiques des compétences lexicales chez les enfants (Ralph et al., 2020).

Example triplet	Word meaning
He loaned his friend his huth. He took a ride on her huth. He taught his son how to ride a huth.	Bicycle
The baker is famous for his toth. I make my sandwiches with the toth. At the bakery, get a loaf of the toth.	Bread
They were late, so they missed their baab. The passengers got on the baab. We traveled to Europe on a baab.	Plane
My fingers wrinkle in the koov. I like to put bubbles in my koov. The muddy dog really needs a koov.	Bath

Figure A2 : Figure tirée de Ralph et al. (2020) présentant des exemples de phrases présentées aux enfants : chaque mot nouveau (pseudo-mot) était présenté à l'aide de trois phrases successives (s'achevant par ce mot nouveau). À partir du contexte sémantique des phrases, il était attendu que l'enfant puisse remplacer ce pseudo-mot par un mot de haute fréquence (supposé connu par l'enfant).

A2.1.2. SES et composante phonologique du langage

• Résultats comportementaux

L'analyse des données de standardisation d'une échelle d'évaluation française, évoquée dans la section précédente, avait aussi conduit à identifier une relation entre SES et compétences phonologiques (Thomas et al., 2021). En plus de souligner des disparités socio-économiques dans le vocabulaire, une étude de Foster et collaborateurs (2005) portant sur plus de 300 enfants de 5 ans a également mis en évidence de telles disparités au sein des compétences phonologiques (évaluées via des tâches de rimes et de suppression de phonèmes, *Early Phonemic Awareness Profile* ; tirées de Dickinson & Chaney, 1997). D'autres études avaient également souligné des disparités socio-économiques dans les compétences phonologiques des enfants (Bowey, 1995; Raz & Bryant, 1990). Noble et collaborateurs (2006) ont également étudié les compétences phonologiques de 150 enfants de CP selon leur SES. Leur objectif était d'évaluer si le lien entre le SES et les compétences en lecture était susceptible d'être expliqué, au moins en partie, par l'effet du SES sur les compétences phonologiques, plus précoces dans le décours développemental. Deux tâches ont permis l'évaluation de ces compétences : la première, « *mots mélangés* », mesurait la capacité des enfants à combiner des sons pour former des mots ; la deuxième, « *élision* », mesurait la capacité des enfants à dire un mot sans prononcer un son spécifique. Les compétences de lecture (à partir de trois tâches différentes :

lecture de mots, lecture de pseudo-mots, et compréhension) et de vocabulaire (via une tâche de vocabulaire réceptif) ont également été évaluées. Les résultats de cette étude ont permis de répliquer l'existence d'un phénomène de disparités socio-économiques pour les scores aux tâches phonologiques, de vocabulaire et de lecture. Les auteurs ont ensuite montré qu'il existait effectivement un effet cumulatif du SES et du score phonologique sur les compétences de lecture, mais seulement pour le test de lecture de pseudo-mots (autrement dit, les compétences de décodage). Le niveau socio-économique familial pourrait donc interagir avec les compétences phonologiques des enfants pour prédire leurs compétences de décodage. Néanmoins, cet effet n'a pas été retrouvé pour les deux autres compétences de lecture (voir **Figure A3**, tirée de Noble, Farah, et al., 2006). Pour les compétences de lecture de mot et de compréhension, les auteurs ont suggéré que le niveau de vocabulaire de l'enfant pourrait être un prédicteur plus adapté (notamment pour l'épreuve compréhension de texte, en interaction avec le niveau de SES). Cette étude souligne donc l'intérêt de mesurer, en plus des caractéristiques socio-économiques familiales, différents facteurs cognitifs précurseurs de la compétence scolaire étudiée (dans ce cas précis, la lecture) afin d'identifier leurs relations potentiellement complexes et multiplicatives (Noble, Farah, et al., 2006).

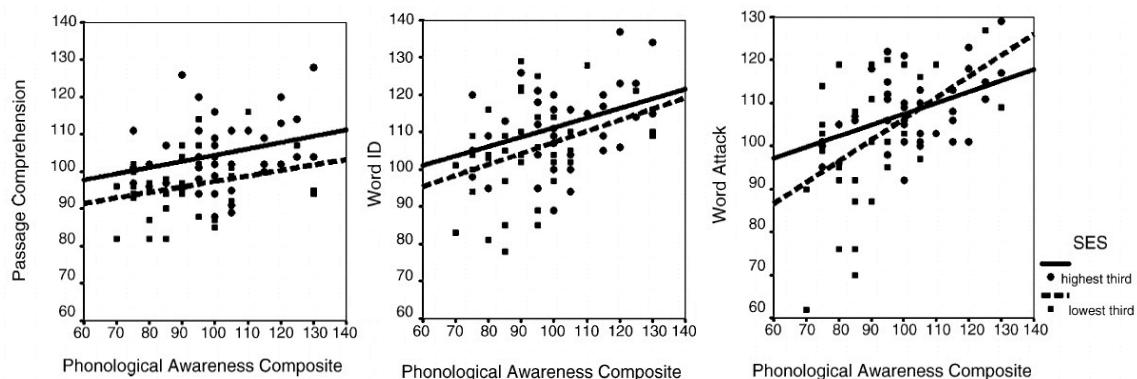


Figure A3 : Figures tirées de Noble et al. (2006) illustrant les scores de des enfants (en ordonnée) aux tâches de compréhension de texte (à gauche), de lecture de mots simples (au milieu) et de lecture de non-mots (à droite) selon leurs compétences phonologiques (en abscisse). Les effets principaux et interactions avec le SES sont présentés de manière schématique en utilisant les tertiles supérieurs et inférieurs du SES (ligne pleine et symboles ronds pour les SES les plus élevés, ligne discontinue et symboles carrés pour les SES les plus bas). $N=150$

• Résultats neurocognitifs

Dans une autre étude réalisée sur 38 enfants de 8 ans en moyenne, Noble et collaborateurs (2006) ont souhaité objectiver au niveau cérébral des éléments de compréhension supplémentaires de l'effet de modulation du SES. Pour le dire autrement, ils ont cherché à tester l'hypothèse selon laquelle le SES pourrait influencer la relation entre les compétences phonologiques et l'activité cérébrale impliquée dans la lecture. Pour cela, ils ont utilisé une tâche IRMF de lecture de non-mots prononçables. Leurs résultats comportementaux n'ont permis d'objectiver aucune disparité socio-économique dans les compétences phonologiques des enfants, néanmoins ceux concernant l'activité cérébrale étaient en faveur

d'une interaction entre SES et compétences phonologiques. Pour être plus explicite, leurs résultats indiquaient que le statut socio-économique des enfants semblait moduler les relations cerveau-comportement suggérées dans la littérature (notamment entre compétence phonologique et activité cérébrale pendant la lecture ; Turkeltaub, Gareau, Flowers, Zeffiro, & Eden, 2003). Ainsi parmi les enfants les plus défavorisés d'un point de vue socio-économique, le niveau d'habiletés phonologiques permettait de prédire positivement le recrutement de la région du gyrus fusiforme gauche pendant la tâche de lecture. En revanche, chez les enfants les plus favorisés, était objectivée une atténuation de cette relation entre habiletés phonologiques et recrutement du gyrus fusiforme gauche. Pour Noble et collaborateurs (2006), ces résultats pourraient suggérer que chez les enfants les plus défavorisés, les précurseurs cognitifs de la lecture, tels que les compétences phonologiques, auraient une influence importante sur l'activité cérébrale liée à la lecture. Chez les enfants plus favorisés, l'activité cérébrale liée à la lecture pourrait être moins « dépendante » de ces compétences phonologiques. Pour les auteurs, cela pourrait signifier que les enfants avec de faibles capacités phonologiques, mais issus de milieux favorisés pourraient coder les chaînes de lettres grâce au bénéfice de connaissances et de capacités d'alphabétisation supplémentaires ne relevant pas des processus phonologiques. Ces résultats de neuro-imagerie pourraient donc compléter les résultats précédents de Noble et collaborateurs sur l'interaction comportementale entre compétences phonologiques et SES (Noble, Farah, et al., 2006).

D'autres études ont permis de suggérer que la latéralisation de l'activité cérébrale associée au traitement phonologique était susceptible de varier selon le SES familial. Raizada et collaborateurs (2008) ont testé 14 enfants américains de 5 ans, de milieux socio-économiques variés, à l'aide de plusieurs tâches comportementales de langage (vocabulaire réceptif, phonologie mais aussi batterie d'épreuves variées de langage ; la *Clinical Evaluation of Language Fundamentals test*, Semel, Wiig, & Secord, 1995) et à partir d'une tâche IRMf de jugement de rimes (mots monosyllabiques présentés de façon auditive aux enfants). Leurs données ont montré qu'il existait une corrélation entre le statut socio-économique et le degré de spécialisation hémisphérique de l'activité de l'IFG pendant la tâche de rimes. Cette relation était significative même après prise en compte de la variance expliquée par les performances des enfants aux tests standardisés de langage. Pour les auteurs, la compréhension du phénomène des disparités socio-économiques dans le domaine langagier ne pourrait s'expliquer par les seuls résultats comportementaux et gagnerait à s'enrichir des résultats révélés au niveau cérébral, tel que le phénomène objectivé de réduction de la latéralisation de cette activité cérébrale.

Dans une étude plus récente, Younger et collaborateurs (2019) ont étudié cette question de la latéralisation de l'activité cérébrale selon le SES (mais en se focalisant uniquement sur la dimension d'éducation maternelle). Cinquante et un enfants américains de 5 ans ont été testés sur différentes compétences verbales (incluant des scores phonologiques) et ont réalisé une tâche IRMf de jugement de rimes présentées en modalité auditive. Au niveau comportemental, les résultats étaient en faveur d'une absence de relation entre scores langagiers des enfants et SES. Au niveau de la latéralisation de l'activité cérébrale du gyrus frontal inférieur (IFG) et du gyrus temporal supérieur, plusieurs dissociations ont été décrites. Dans l'IFG, la latéralisation était liée au SES (mais pas aux performances phonologiques de l'enfant) : plus le niveau du

SES était élevé, plus l'activité cérébrale pendant la tâche de rime était latéralisée à gauche. À l'inverse, les enfants issus des milieux à plus faibles SES présentaient une activité cérébrale davantage bilatéralisée. Au sein du gyrus temporal supérieur, les résultats étaient en faveur d'une interaction entre habiletés phonologiques de l'enfant et SES : chez les enfants présentant un SES élevé, était rapportée une relation entre compétences phonologiques et latéralisation droite de l'activité cérébrale ; tandis que concernant les enfants issus des milieux plus défavorisés était rapportée une relation entre compétences phonologiques et latéralisation gauche de l'activité cérébrale. En discutant les résultats obtenus, Younger et collaborateurs (2019) ont proposé de nuancer une lecture exclusivement « déficitaire » des processus cérébraux langagiers chez les enfants issus de milieux socio-économiques défavorisés en montrant qu'ils pourraient également recruter des réseaux cérébraux « alternatifs » leur permettant d'obtenir des performances égales à celles de leurs pairs plus favorisés.

A2.1.3. SES et composante syntaxique du langage

Enfin, au niveau grammatical, il a pu être suggéré que les enfants issus des milieux les plus favorisés pouvaient obtenir de meilleurs résultats sur des tests standardisés (comportant des mesures de développement grammatical, Dollaghan et al., 1999; Morisset, Barnard, Greenberg, Booth, & Spieker, 1990; ou des tests de compréhension syntaxique, Huttenlocher, Vasilyeva, Cymerman, & Levine, 2002). Vasilyeva et collaborateurs (2008) ont réalisé une étude longitudinale en suivant, à leur domicile, 45 enfants de leurs 22 à leurs 42 mois. De nombreux enregistrements ont ainsi été effectués permettant de documenter plusieurs caractéristiques des échanges langagiers spontanés entre les enfants et leurs parents (à chaque fois, 90 minutes d'enregistrement pendant des activités de la vie quotidienne). Les enfants ont été répartis en 3 groupes de SES différents (selon le niveau d'éducation parentale) et deux caractéristiques du langage employé par l'enfant ont été extraites des enregistrements : la maîtrise des règles syntaxiques de base (pour la production de phrases simples) et la maîtrise des structures des phrases complexes. Les résultats n'ont pas montré de différence entre les groupes SES pour la maîtrise des règles syntaxiques des phrases simples, mais des différences importantes ont été trouvées pour les phrases complexes (voir **Figure A4**, tirée de Vasilyeva et al., 2008). Ces différences existaient dès les premières utilisations de phrases complexes par l'enfant et augmenteraient ensuite graduellement au fil des mois.

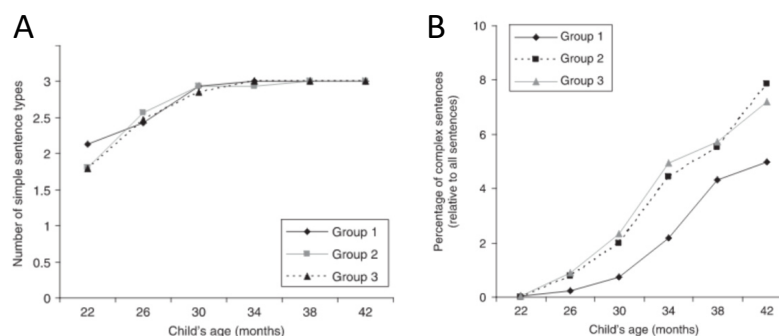


Figure A4 : Tirée de Vasilyeva et al. (2008) représentant les disparités des compétences syntaxiques des enfants (en ordonnée) selon leur âge (en abscisse) et selon leur milieu socio-économique (groupe 1, losange trait noir plein : SES bas ; groupe 2, carré et trait gris plein : SES moyen ; groupe 3, triangle trait noir discontinu : SES élevé) **A.** Nombre de phrases simples produites par l'enfant selon l'âge et selon le groupe SES. **B.** Pourcentage de phrases complexes produites par l'enfant (par rapport à toutes les phrases utilisées) à différents âges et selon le groupe SES. N=45

À l'aide d'une méthode similaire, c'est-à-dire en réalisant également plusieurs visites à domicile afin d'enregistrer les échanges langagiers spontanés entre la mère et l'enfant, Huttenlocher et collaborateurs (2010) ont mesuré d'autres caractéristiques syntaxiques chez 47 enfants de leurs 14 à leurs 46 mois (notamment la mesure de la diversité des « constituants » utilisés dans une phrase et la mesure de la diversité « clausale », c.-à-d. les façons de combiner des énoncés). Les résultats ont souligné que le statut socio-économique familial (mesuré à l'aide du revenu ou du niveau d'éducation) était un fort prédicteur de l'ensemble des compétences langagières des enfants (dès leur plus jeune âge pour les mesures de diversité des « constituants » ; et dès l'émergence de la compétence de diversité « clausale »).

Ces disparités socio-économiques précoces dans les compétences grammaticales des enfants pourraient impacter leurs apprentissages scolaires ultérieurs. Dans une étude récente, l'analyse des données de standardisation d'une nouvelle tâche de dépistage rapide de diverses compétences langagières des enfants (le « *Quick Interactive Language Screener* »), Levine et collaborateurs (2020) ont également souligné la part de la variance expliquée par le SES familial pour les différents scores de vocabulaire et de syntaxe, et cela de façon similaire quel que soit l'âge des enfants (3, 4 ou 5 ans).

A2.2. Le domaine neurocognitif des fonctions exécutives

Au sein des fonctions exécutives, il est classiquement identifié trois domaines spécifiques : l'inhibition, la mémoire de travail et la flexibilité cognitive (selon la classification suggérée dans la revue de Diamond, 2013).

Le contrôle inhibiteur correspond à la capacité de porter son attention de manière sélective en supprimant l'attention portée aux autres stimuli ou à tout type d'interférence. Cette compétence est très proche de celle du contrôle attentionnel qui fait référence aux mécanismes permettant de contrôler et d'orienter sélectivement l'attention sur des informations pertinentes pour les buts poursuivis (Norman & Shallice, 1986). Plusieurs tâches qui seront évoquées dans cette section permettent d'évaluer le contrôle inhibiteur : tâche de Stroop (Golden & Freshwater, 1978), la Flanker task (Eriksen & Eriksen, 1974), le délai de gratification (Sethi, Mischel, Aber, Shoda, & Rodriguez, 2000) ou encore la tâche de go/no-go (Cragg & Nation, 2008).

La composante de mémoire de travail permet de maintenir des informations en mémoire à court terme et de les manipuler mentalement, autrement dit de réaliser un exercice mental sur des éléments qui ne sont pas manipulables ou visualisables (Baddeley & Hitch, 1994), comme c'est le cas pour un calcul mental sans énoncé ni support visuel. La mémoire de travail peut être décomposée en deux types selon le contenu manipulé : verbal ou non verbal. Cette

compétence se développerait de façon précoce (mais limitée ; Diamond, 1995). En effet, la capacité plus évoluée à maintenir et manipuler plusieurs éléments en mémoire de travail s'élaborerait de façon bien plus lente et tardive (Crone, Wendelken, Donohue, van Leijenhorst, & Bunge, 2006; Davidson, Amso, Anderson, & Diamond, 2006). Les tâches évaluant la mémoire de travail comprennent par exemple des mesures d'empan de chiffres ou, d'après Diamond (2013), la Continuous-Performance Task (Klee & Garfinkel, 1983)¹.

Enfin, la composante de flexibilité cognitive, ou capacité à changer de « perspective », se construit sur les deux composantes précédentes (nécessite d'inhiber une perspective précédente et d'en charger une nouvelle en mémoire de travail), elle connaît donc un développement encore plus tardif (Davidson et al., 2006; Garon, Bryson, & Smith, 2008). Pour l'évaluer peuvent être utilisées des tâches de fluence verbale (sémantique ou phonémique) ou graphique², le Wisconsin Card Sorting Task (WCST, Heaton, Chelune, Talley, Kay, & Curtiss, 1993) ou la tâche de Trail Making Test (Kortte, Horner, & Windham, 2002). Enfin, à partir de ces trois composantes des fonctions exécutives, s'établissent des fonctions exécutives dites des « plus haut niveau » telles que la capacité de raisonner, de résoudre des problèmes et de voir des modèles ou des relations entre les éléments (Diamond, 2013).

Dans cette section, sera présenté un aperçu des travaux ayant visé spécifiquement à évaluer les liens entre SES et différentes composantes exécutives (pour revues, voir Last, Lawson, Breiner, Steinberg, & Farah, 2018; Lawson, Hook, Hackman, & Farah, 2016). On notera que certaines études ont mesuré la relation entre SES et fonctions exécutives et attentionnelles de façon conjointe.

Une méta-analyse récente a souligné la présence de disparités socio-économiques au sein du domaine des fonctions exécutives chez 8760 enfants âgés de 2 à 18 ans et provenant de 25 échantillons indépendants (Lawson, Hook, & Farah, 2018). À partir de 15 études évaluant la relation entre statut socio-économique et performances exécutives, les auteurs ont évalué une taille de corrélation, qualifiée de petite à moyenne ($r = .22$). Cette même méta-analyse a par ailleurs montré qu'en utilisant uniquement les études qui avaient réalisé non pas une, mais de multiples mesures des fonctions exécutives, la taille de la corrélation augmentait alors légèrement ($r = .28$). En résumé, l'idée est la même que pour le langage, pour mieux comprendre les disparités socio-économiques dans les compétences exécutives des enfants, ne pas limiter leur étude à l'usage d'un seul score composite pourrait être davantage informatif.

A2.2.1. Décomposer la relation entre SES et fonctions exécutives selon trois composantes principales (inhibition, mémoire de travail et flexibilité cognitive)³

¹ Néanmoins ce type de tâche implique également le contrôle attentionnel et permettrait également d'évaluer l'attention sélective ou soutenue, l'impulsivité ou la vigilance.

² Les tâches de fluence permettent l'évaluation de la flexibilité spontanée (c.-à-d. la capacité à créer de nouveaux concepts, idées, ou à s'adapter à un changement).

³ Nous nous référons ici aux trois composantes principales telles qu'identifiées dans le modèle proposé par Diamond (2013).

• *Résultats comportementaux*

En préambule, on peut souligner que les travaux réalisés à partir des batteries visant principalement l'identification extensive de différents domaines cognitifs (chapitre 3 section 1) avaient déjà permis une ébauche des nuances dans la relation entre SES et chacune des composantes exécutives. Par exemple, chez les enfants de grande section, la composante de contrôle inhibiteur était davantage liée au SES que la composante de mémoire de travail non verbale (Noble et al., 2005). À l'inverse, chez les enfants de CP ou ceux plus âgés (11 ans en moyenne), les composantes de mémoire de travail non verbale et de contrôle exécutif étaient davantage liées au SES que la composante d'inhibition (Noble, McCandliss, & Farah, 2007; Farah et al., 2006 ; voir **Figure 16**, chapitre 3).

En utilisant une tâche différente pour chacune des trois composantes exécutives principales (tâche de Stroop pour l'évaluation de la composante d'inhibition, tâche de Trail Making Test pour l'évaluation de la flexibilité cognitive et tâche d'empan de chiffres de Wechsler, 1991, pour l'évaluation de la mémoire de travail), des données obtenues sur des enfants américains de 10 ans ont suggéré l'existence d'une relation entre SES et chacune de ces composantes (Sarsour et al., 2011). D'autres études utilisant d'autres tâches ont répliqué des phénomènes similaires de covariations entre SES et performances aux trois composantes exécutives, et ce dès l'âge de 3 ans (Bernier, Carlson, Deschênes, & Matte-Gagné, 2012; Vrantsidis, Clark, Chevalier, Espy, & Wiebe, 2020).

Une étude réalisée sur 254 enfants argentins âgés de 7 à 12 ans de milieux socio-économiques variés (évalués à partir des indices de profession, niveau d'éducation et salaire) a également permis de dresser un profil précis de leurs compétences exécutives (Arán-Filippetti & Richaud de Minzi, 2012). Plusieurs tests dédiés aux fonctions exécutives étaient utilisés pour évaluer séparément chacune des composantes : inhibition (tâche de Stroop), la mémoire de travail (épreuves d'empan; Wechsler, 2003), la composante de flexibilité évaluée à l'aide de deux tâches (catégorisation de cartes WCST et fluence phonologique ; *Controlled Oral Word Association Test* ; Benton & Hamsher, 1978) ainsi qu'une tâche de plus haut niveau (planification, *Porteus Maze Test* ; Porteus, 1965). Les résultats à ces épreuves ont d'abord montré l'existence d'une relation entre SES et score total à l'ensemble des épreuves, mais surtout la décomposition des scores a permis de préciser un phénomène de disparités socio-économiques pour chacune des composantes exécutives évaluées (Arán-Filippetti & Richaud de Minzi, 2012).

Une étude portant sur près de 200 enfants canadiens âgés de 6 à 7 ans a obtenu des résultats légèrement différents (Calvo et Bialystok, 2014). L'administration de cinq tâches permettait une évaluation différenciée des fonctions exécutives : la composante d'attention (évaluée via deux tâches visuelles non verbale et verbale, « Pair cancellation », Woodcock, Mather, McGrew, & Wendling, 2001; et « Cancellation », Wechsler, 2003), la composante d'inhibition (« Flanker task »), la composante de mémoire de travail (« the Frog Matrices Task », Morales, Calvo, & Bialystok, 2013) et enfin une tâche de raisonnement abstrait (matrices, Kaufman, 1990). Les résultats détaillés ont mis en évidence l'existence d'une relation significative entre SES et scores des enfants uniquement pour la composante de mémoire de travail, mais des relations seulement marginalement significatives pour la composante d'inhibition et la composante d'attention (et cela exclusivement pour leur modalité verbale).

Cette brève section donne à voir la pluralité des tâches utilisées, y compris pour l'évaluation d'une même composante exécutive. La plupart des tests utilisés sont normés et standardisés et devraient de fait conduire à des mesures similaires. Cependant chacune des tâches utilisées pourrait mettre en jeu d'autres fonctions cognitives (Mazeau & Pouhet, 2014, p. 38; Mink et al., 2004) et par conséquent les différentes études pourraient conduire à des résultats, en apparence, contradictoires.

- *Résultats neurocognitifs*

Une étude récente de Moriguchi et Shinohara (2019) a permis d'illustrer comment des performances équivalentes à une tâche évaluant les fonctions exécutives pouvaient recouvrir des disparités socio-économiques dans le fonctionnement neurocognitif. Pour mesurer l'activité cérébrale de 93 enfants japonais âgés de 5 ans, la technique de spectroscopie proche infrarouge (Near InfraRed spectroscopy, NIRS) a été utilisée pendant la résolution d'une tâche de flexibilité cognitive (similaire à celle du WCST et adaptée à partir des instruments de mesure utilisés au sein de la cohorte NIH pour une utilisation en IRM ; Zelazo et al., 2013). Au niveau comportemental, les résultats obtenus étaient en faveur d'une absence de relation entre SES et performances comportementales sur cette composante exécutive. Néanmoins, une dissociation de l'activité cérébrale préfrontale pendant la résolution de cette tâche était observée selon les caractéristiques socio-économiques familiales. En effet, seuls les enfants les plus favorisés montraient des activations préfrontales. Moriguchi et Shinohara (2019) ont conclu à l'existence d'une relation potentielle entre SES et développement fonctionnel des régions préfrontales pour les fonctions exécutives, suggérant que les enfants plus défavorisés réussissant la tâche devaient certainement recruter d'autres régions cérébrales. Ces résultats d'imagerie fonctionnelle pourraient donc compléter la compréhension des résultats concernant les disparités socio-économiques à l'œuvre dans le fonctionnement exécutif chez les enfants.

On peut également rapporter les résultats de deux études ayant utilisé des mesures de « potentiels évoqués » à partir de la technique d'électroencéphalographie. Ces résultats sont congruents avec ceux rapportés par Moriguchi et Shinohara (2019), autrement dit ils ont mis en évidence une relation entre SES et corrélats de l'activité préfrontale pendant une tâche exécutive. D'Anguilli et collaborateurs (2008) ont étudié, chez 28 enfants de 13 ans, les relations éventuelles entre SES, performances comportementales et activité cérébrale pendant une tâche d'attention sélective auditive. Aucun lien entre SES et performance comportementale n'était objectivé néanmoins étaient rapportées des différences d'activité cérébrale. Seuls les enfants de milieux socio-économiques favorisés présentaient une modification de la réponse corticale frontale selon le type de stimuli (distracteurs ou cibles). Pour les auteurs cette différence indiquait que, à des niveaux de performance pourtant comparables (temps de réponse et précision), les enfants de niveau SES élevé parvenaient à ignorer les distracteurs tandis que les enfants de faible niveau SES portaient une attention équivalente aux distracteurs et aux cibles (D'Anguilli et al., 2008). Une seconde étude portant sur 26 enfants américains âgés de 7 à 12 ans a visé à étudier leurs performances ainsi que leur activité cérébrale pendant une tâche de détection de cible (attention sélective visuelle) selon leurs milieux socio-économiques (Kishiyama, Boyce, Jimenez, Perry, & Knight, 2009). Les données ont montré que les

performances comportementales étaient équivalentes quel que soient les caractéristiques socio-économiques des enfants, mais une dissociation cérébrale était également objectivée. Pendant la résolution de la tâche, la réactivité du cortex préfrontal était réduite chez les enfants issus des milieux socio-économiques défavorisés.

Ces quelques études convergent à désigner une modulation, selon les caractéristiques socio-économiques des enfants, de l'activité du cortex préfrontal recruté lors de certaines tâches exécutives. Ces résultats soulignent l'intérêt de coupler des mesures neurocognitives à celles comportementales afin d'améliorer la compréhension des mécanismes de disparités socio-économiques.

A2.2.2. Analyser la relation entre SES et différentes composantes exécutives en précisant davantage les performances

Si l'hétérogénéité des résultats concernant la relation entre SES et composante exécutive est susceptible de provenir, au moins en partie, de la grande variété de tâches utilisées pour leur évaluation, une première façon d'adresser cette hétérogénéité pourrait être d'utiliser, au sein d'un même protocole expérimental, plusieurs tâches visant à évaluer une même composante exécutive et leurs relations avec les caractéristiques socio-économiques des sujets.

Ardila et collaborateurs (2005) ont testé les disparités socio-économiques sur les compétences exécutives de plus de 600 enfants (colombiens et mexicains) répartis en deux groupes d'âge (5 à 6 ans et 13 à 14 ans). Les épreuves utilisées ciblaient l'évaluation de la seule composante de flexibilité cognitive (4 épreuves de fluence, verbales et graphiques, et une de catégorisation de cartes, WCST) ainsi que des fonctions exécutives dites de « haut niveau »¹ (trois épreuves de raisonnement abstrait verbal et non verbal : matrices, similitudes, et planification via la tâche de *Mexican Pyramid*, Matute et al., 2008). Le fait d'administrer plusieurs tâches différentes pour l'évaluation d'une même composante exécutive a permis aux auteurs de révéler des dissociations développementales dans le phénomène de disparités socio-économiques. Ainsi pour la composante de flexibilité cognitive, chacun des scores de fluence était en lien avec le SES familial et cela quel que soit l'âge des enfants. Néanmoins, pour le score de catégorisation de cartes, cette relation n'était objectivable que pour les enfants les plus jeunes. Par ailleurs pour la composante de raisonnement de plus haut niveau, selon la tâche utilisée, s'observait également une interaction entre âge des sujets et phénomène de disparités socio-économiques : les scores à la tâche de similitude étaient liés au SES pour tous les enfants, tandis que les scores à la tâche de matrices n'étaient liés au SES que pour le groupe d'enfants les plus âgés. Enfin, aucune relation n'était objectivée entre scores à la tâche de planification et SES, quel que soit l'âge.

Plutôt que de multiplier les tâches utilisées pour l'évaluation d'une composante exécutive spécifique, une seconde façon d'explorer l'hétérogénéité des résultats pourrait être de limiter le nombre de tâches administrées au sein d'un même protocole, mais de veiller à davantage décomposer la performance à la tâche utilisée. Une étude récente a mis l'accent sur

¹ Selon la classification proposée par Diamond (2013).

une telle nécessité, en suggérant de décomposer les scores aux fonctions exécutives comme des constructions multidimensionnelles afin de mieux interpréter leur.s lien.s avec les caractéristiques socio-économiques familiales (St. John, Kibbe, & Tarullo, 2019). Pour évaluer les performances d'enfants âgés de 5 ans en moyenne, les chercheurs ont utilisé deux tâches informatisées : l'une de mémoire de travail (tâche de de détection de changements ; Luck & Vogel, 1997) et l'autre de contrôle inhibiteur (« go/no-go »). Selon les auteurs, l'usage d'un ordinateur pour administrer ces tâches permettait une décomposition plus précise des aptitudes (le temps de réponse et la précision). Ainsi dans un premier temps, St. John et collaborateurs (2019) ont souligné que les deux types de composantes exécutives, mémoire de travail et inhibition, semblaient être en lien avec le SES. Ils ont montré une corrélation positive entre SES et nombre de réponses des enfants aux deux tâches (ainsi qu'une relation entre SES et temps de réponse à la tâche go/no-go). Néanmoins, en décomposant les performances à chacune de ces tâches, émergeaient des relations plus précises entre SES et composantes exécutives. Par exemple, la relation significative entre SES et performance à la tâche de mémoire de travail s'expliquait uniquement par les performances des enfants lorsque la charge d'information à maintenir était très faible (un seul item) et disparaissait ensuite lorsque la charge mentale augmentait (deux items ou plus). Par ailleurs, un même phénomène de dégradation de l'attention soutenue s'observait au cours de la tâche (c.-à-d. que les performances des enfants, quelles que soient leurs caractéristiques socio-économiques, avaient tendance à diminuer de façon identique au fur et à mesure de la tâche). St. John et collaborateurs (2019) ont suggéré l'existence d'un schéma développemental dans l'émergence des différences socio-économiques au sein d'une même composante exécutive. À 5 ans, il existait une relation entre caractéristiques socio-économiques des enfants et compétences « basiques » mémoire de travail, tandis que cette relation n'était pas (encore) observée pour les compétences « plus élaborées » et alors émergentes à cet âge. Selon les auteurs, l'identification différentielle des mécanismes de disparités socio-économiques au sein des composantes exécutives pourrait permettre ensuite l'élaboration de cibles d'intervention précoces.

Une étude en IRMf, réalisée par Sheridan et collaborateurs (2012) et portant sur 18 enfants américains âgés de 8 à 12 ans (neuf enfants issus de milieux socio-économiques favorisés et neuf enfants issus de milieux plus défavorisés), avait également souligné l'intérêt de décomposer les performances des enfants pour mieux comprendre les phénomènes de disparités socio-économiques. Comme dans l'étude de Moriguchi et Shinohara (2019), une adaptation d'une tâche de type WCST était utilisée pour être administrée en IRMf. Cette tâche supposait d'associer un bouton d'une manette avec une famille de stimuli (tâche évaluant les règles de tri et de catégorisation dimensionnelle, c.-à-d. la flexibilité cognitive ; Diamond, 2013). Au niveau des compétences comportementales, les résultats obtenus ont montré des disparités socio-économiques en faveur des enfants les plus favorisés. Au niveau de l'activité cérébrale associée à la tâche, les résultats ont également montré une relation entre SES et recrutement du gyrus frontal moyen droit, mais cette relation était négative (autrement dit les enfants les plus défavorisés d'un point de vue socio-économique recrutaient davantage cette région que les enfants favorisés). En décomposant les performances à la tâche, les auteurs ont par ailleurs suggéré l'existence d'une dissociation (bien que non significative statistiquement) dans la relation entre activation du gyrus frontal moyen droit et performance à la tâche, selon

le SES : le recrutement du gyrus frontal moyen droit était positivement corrélé aux performances des enfants dans le groupe défavorisé ; son recrutement était au contraire négativement corrélé aux performances de leurs pairs plus favorisés.

On peut soulever que ces résultats présentent une relation inverse à celle rapportée dans l'étude par IRMf de Moriguchi et collaborateurs (2019) présentée précédemment. Ces derniers ont proposé d'expliquer cette hétérogénéité des résultats par des différences dans les tâches utilisées, mais aussi par des différences dans l'âge des enfants testés entre les deux études. Les enfants de l'étude de Moriguchi étaient plus jeunes (âge préscolaire), et donc dans une période alors « critique » pour le début du recrutement des régions préfrontales pendant les tâches de fonctions exécutives ; tandis que, les participants plus âgés dans l'étude de Sherigan (10 ans en moyenne) pourraient davantage recruter des réseaux cérébraux différents. Néanmoins, ces études nécessiteraient d'être complétées et ces résultats répliqués pour une meilleure compréhension du phénomène liant les disparités socio-économiques des fonctions exécutives et leurs potentiels corrélats neuronaux en IRMf.

La large majorité des travaux ayant visé à caractériser les variations neurocognitives selon les caractéristiques socio-économiques familiales ont donc conduit à l'identification des domaines du langage et des fonctions exécutives. Plusieurs études ont également permis d'approfondir, via des mesures du comportement et de l'activité cérébrale, la compréhension des mécanismes cognitifs propres à chacun de ces domaines et susceptibles d'expliquer ces variations. Dans l'ensemble, leurs conclusions soulignent également l'intérêt de combiner des mesures du fonctionnement cognitif, à la fois comportemental et cérébral, pour mieux comprendre les mécanismes de disparités socio-économiques à l'œuvre dans le domaine de la réussite scolaire.

References

- Abel, A. D., Schneider, J., & Maguire, M. J. (2018). N400 response indexes word learning from linguistic context in children. *Language Learning and Development, 14*(1), 61-71.
- Arán-Filippetti, V., & Richaud de Minzi, M. C. (2012). A Structural Analysis of Executive Functions and Socioeconomic Status in School-Age Children : Cognitive Factors as Effect Mediators. *The Journal of Genetic Psychology, 173*(4), 393-416. <https://doi.org/10.1080/00221325.2011.602374>
- Ardila, A., Rosselli, M., Matute, E., & Guajardo, S. (2005). The influence of the parents' educational level on the development of executive functions. *Developmental neuropsychology, 28*(1), 539-560.
- Baddeley, A. D., & Hitch, G. J. (1994). Developments in the concept of working memory. *Neuropsychology, 8*(4), 485.
- Benton, A. L., & Hamsher, K. (1978). Multilingual aphasia examination manual. *Iowa City: University of Iowa.*
- Bernier, A., Carlson, S. M., Deschênes, M., & Matte-Gagné, C. (2012). Social factors in the development of early executive functioning : A closer look at the caregiving environment. *Developmental Science, 15*(1), 12-24. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2011.01093.x>

- 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>
- Calvo, A., & Bialystok, E. (2014). Independent effects of bilingualism and socioeconomic status on language ability and executive functioning. *Cognition, 130*(3), 278-288.
<https://doi.org/10.1016/j.cognition.2013.11.015>
- Cragg, L., & Nation, K. (2008). Go or no-go ? Developmental improvements in the efficiency of response inhibition in mid-childhood. *Developmental Science, 11*(6), 819-827.
- Crone, E. A., Wendelken, C., Donohue, S., van Leijenhorst, L., & Bunge, S. A. (2006). Neurocognitive development of the ability to manipulate information in working memory. *Proceedings of the National Academy of Sciences, 103*(24), 9315-9320.
- D'Angiulli, A., Herdman, A., Stapells, D., & Hertzman, C. (2008). Children's event-related potentials of auditory selective attention vary with their socioeconomic status. *Neuropsychology, 22*(3), 293-300. <https://doi.org/10.1037/0894-4105.22.3.293>
- Davidson, M. C., Amso, D., Anderson, L. C., & Diamond, A. (2006). Development of cognitive control and executive functions from 4 to 13 years : Evidence from manipulations of memory, inhibition, and task switching. *Neuropsychologia, 44*(11), 2037-2078.
- Diamond, A. (1995). Evidence of robust recognition memory early in life even when assessed by reaching behavior. *Journal of Experimental Child Psychology, 59*(3), 419-456.
- Diamond, A. (2013). Executive functions. *Annual Review of Psychology, 64*, 135-168.
<https://doi.org/10.1146/annurev-psych-113011-143750>
- Dickinson, D. K., & Chaney, C. (1997). Early phonological awareness profile. *Newton, MA: Education Development Center.*
- 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: JSLHR, 42*(6), 1432-1443.
<https://doi.org/10.1044/jslhr.4206.1432>
- Eriksen, B. A., & Eriksen, C. W. (1974). Effects of noise letters upon the identification of a target letter in a nonsearch task. *Perception & psychophysics, 16*(1), 143-149.
- Farah, M. J., Shera, D. M., Savage, J. H., Betancourt, L., Giannetta, J. M., Brodsky, N. L., ... Hurt, H. (2006). Childhood poverty : Specific associations with neurocognitive development. *Brain Research, 1110*(1), 166-174. <https://doi.org/10.1016/j.brainres.2006.06.072>
- Fenson, L., Dale, P. S., Reznick, J. S., Bates, E., Thal, D. J., Pethick, S. J., ... Stiles, J. (1994). Variability in early communicative development. *Monographs of the society for research in child development, i*-185.
- 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>
- Foster, M. A., Lambert, R., Abbott-Shim, M., McCarty, F., & Franze, S. (2005). A model of home learning environment and social risk factors in relation to children's emergent literacy and social outcomes. *Early Childhood Research Quarterly, 20*(1), 13-36.
<https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2005.01.006>
- Garon, N., Bryson, S. E., & Smith, I. M. (2008). Executive function in preschoolers : A review using an integrative framework. *Psychological bulletin, 134*(1), 31.
- Golden, C. J., & Freshwater, S. M. (1978). *Stroop color and word test.*
- Hart, B., & Risley, T. R. (1995). *Meaningful differences in the everyday experience of young American children.* Baltimore, MD, US: Paul H Brookes Publishing.

- Heaton, R. K., Chelune, G. J., Talley, J. L., Kay, G. G., & Curtiss, G. (1993). *Wisconsin Card Sorting Test (WCST) : Manual : Revised and expanded*. Psychological Assessment Resources (PAR).
- Hoff, E. (2003). The specificity of environmental influence : Socioeconomic status affects early vocabulary development via maternal speech. *Child development, 74*(5), 1368-1378.
- 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>
- Huttenlocher, J., Vasilyeva, M., Cymerman, E., & Levine, S. C. (2002). Language input and child syntax. *Cognitive psychology, 45*(3), 337-374.
- 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>
- Kaufman, A. S. (1990). *Kaufman brief intelligence test : KBIT*. AGS, American Guidance Service Circle Pines, MN.
- Kishiyama, M. M., Boyce, W. T., Jimenez, A. M., Perry, L. M., & Knight, R. T. (2009). Socioeconomic disparities affect prefrontal function in children. *Journal of cognitive neuroscience, 21*(6), 1106-1115.
- Klee, S. H., & Garfinkel, B. D. (1983). The computerized continuous performance task : A new measure of inattention. *Journal of abnormal child psychology, 11*(4), 487-495.
- Kortte, K., Horner, M., & Windham, W. (2002). The Trail Making Test, Part B : Cognitive Flexibility or Ability to Maintain Set? *Applied neuropsychology, 9*, 106-109. https://doi.org/10.1207/S15324826AN0902_5
- Last, B. S., Lawson, G. M., Breiner, K., Steinberg, L., & Farah, M. J. (2018). Childhood socioeconomic status and executive function in childhood and beyond. *PLOS ONE, 13*(8), e0202964. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0202964>
- Lawson, G. M., Hook, C. J., & Farah, M. J. (2018). A meta-analysis of the relationship between socioeconomic status and executive function performance among children. *Developmental Science, 21*(2), e12529. <https://doi.org/10.1111/desc.12529>
- Lawson, G. M., Hook, C. J., Hackman, D. A., & Farah, M. J. (2016). Socioeconomic status and the development of executive function : Behavioral and neuroscience approaches. In *Executive function in preschool-age children : Integrating measurement, neurodevelopment, and translational research* (p. 259-278). Washington, DC, US: American Psychological Association. <https://doi.org/10.1037/14797-012>
- Levine, D., Pace, A., Luo, R., Hirsh-Pasek, K., Michnick Golinkoff, R., de Villiers, J., ... Sweig Wilson, M. (2020). Evaluating socioeconomic gaps in preschoolers' vocabulary, syntax and language process skills with the Quick Interactive Language Screener (QUILS). *Early Childhood Research Quarterly, 50*, 114-128. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2018.11.006>
- Luck, S. J., & Vogel, E. K. (1997). The capacity of visual working memory for features and conjunctions. *Nature, 390*(6657), 279-281. <https://doi.org/10.1038/36846>
- Matute, E., Chamorro, Y., Inozemtseva, O., Barrios, O., Rosselli, M., & Ardila, A. (2008). The effect of age in a planning and arranging task ('Mexican pyramid') among schoolchildren. *Revista de neurologia, 47*(2), 61-70.
- Mazeau, M., & Pouhet, A. (2014). *Neuropsychologie et troubles des apprentissages chez l'enfant*. Elsevier.
- Mestres-Missé, A., Rodriguez-Fornells, A., & Münte, T. F. (2007). Watching the brain during meaning acquisition. *Cerebral Cortex, 17*(8), 1858-1866.

- Mink, P. J., Goodman, M., Barraj, L. M., Imrey, H., Kelsh, M. A., & Yager, J. (2004). Evaluation of Uncontrolled Confounding in Studies of Environmental Exposures and Neurobehavioral Testing in Children. *Epidemiology*, *15*(4), 385-393.
- Moeschler, J., & Auchlin, A. (2009). *Introduction à la linguistique contemporaine*. Armand Colin.
- Morales, J., Calvo, A., & Bialystok, E. (2013). Working memory development in monolingual and bilingual children. *Journal of Experimental Child Psychology*, *114*(2), 187-202. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2012.09.002>
- Moriguchi, Y., & Shinohara, I. (2019). Socioeconomic disparity in prefrontal development during early childhood. *Scientific Reports*, *9*(1), 1-8. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-39255-6>
- Morisset, C. E., Barnard, K. E., Greenberg, M. T., Booth, C. L., & Spieker, S. J. (1990). Environmental influences on early language development : The context of social risk. *Development and Psychopathology*, *2*(2), 127-149. <https://doi.org/10.1017/S0954579400000663>
- Noble, K. G., Farah, M. J., & McCandliss, B. D. (2006). Socioeconomic background modulates cognition–achievement relationships in reading. *Cognitive Development*, *21*(3), 349-368.
- 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>
- Noble, K. G., Norman, M. F., & Farah, M. J. (2005). Neurocognitive correlates of socioeconomic status in kindergarten children. *Developmental Science*, *8*(1), 74-87. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2005.00394.x>
- Noble, K. G., Wolmetz, M. E., Ochs, L. G., Farah, M. J., & McCandliss, B. D. (2006). Brain-behavior relationships in reading acquisition are modulated by socioeconomic factors. *Developmental Science*, *9*(6), 642-654. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2006.00542.x>
- Norman, D. A., & Shallice, T. (1986). Attention to action. In *Consciousness and self-regulation* (p. 1-18). Springer.
- 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>
- Porteus, S. D. (1965). *Porteus Maze Tests : Fifty years' application*.
- Raizada, R. D. S., Richards, T. L., Meltzoff, A., & Kuhl, P. K. (2008). Socioeconomic status predicts hemispheric specialisation of the left inferior frontal gyrus in young children. *NeuroImage*, *40*(3), 1392-1401. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2008.01.021>
- Ralph, Y. K., Schneider, J. M., Abel, A. D., & Maguire, M. J. (2020). Using the N400 event-related potential to study word learning from context in children from low- and higher-socioeconomic status homes. *Journal of Experimental Child Psychology*, *191*, 104758. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2019.104758>
- Raz, I. S., & Bryant, P. (1990). Social background, phonological awareness and children's reading. *British Journal of Developmental Psychology*, *8*(3), 209-225. <https://doi.org/10.1111/j.2044-835X.1990.tb00837.x>
- Sarsour, K., Sheridan, M., Jutte, D., Nuru-Jeter, A., Hinshaw, S., & Boyce, W. T. (2011). Family socioeconomic status and child executive functions : The roles of language, home environment, and single parenthood. *Journal of the International Neuropsychological Society: JINS*, *17*(1), 120-132. <https://doi.org/10.1017/S1355617710001335>
- Semel, E. M., Wiig, E. H., & Secord, W. (1995). *CELF3 : Clinical evaluation of language fundamentals*. Psychological Corporation, Harcourt Brace.
- Sethi, A., Mischel, W., Aber, J. L., Shoda, Y., & Rodriguez, M. L. (2000). The role of strategic attention deployment in development of self-regulation : Predicting preschoolers' delay of gratification from mother–toddler interactions. *Developmental psychology*, *36*(6), 767.

- Sheridan, M. A., Sarsour, K., Jutte, D., D'Esposito, M., & Boyce, W. T. (2012). The Impact of Social Disparity on Prefrontal Function in Childhood. *PLOS ONE*, 7(4), e35744. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0035744>
- St. John, A. M., Kibbe, M., & Tarullo, A. R. (2019). A systematic assessment of socioeconomic status and executive functioning in early childhood. *Journal of Experimental Child Psychology*, 178, 352-368. <https://doi.org/10.1016/j.jecp.2018.09.003>
- Thomas, A., Tazouti, Y., Hoareau, L., Luxembourger, C., Hubert, B., Fischer, J.-P., & Jarlégan, A. (2021). Development of a French-language early literacy scale : Structural analysis and links between the dimensions of early literacy. *Journal of Research in Reading*, 44(2), 379-399. <https://doi.org/10.1111/1467-9817.12344>
- Turkeltaub, P. E., Gareau, L., Flowers, D. L., Zeffiro, T. A., & Eden, G. F. (2003). Development of neural mechanisms for reading. *Nature neuroscience*, 6(7), 767-773.
- Ursache, A., & Noble, K. G. (2016). Neurocognitive development in socioeconomic context : Multiple mechanisms and implications for measuring socioeconomic status. *Psychophysiology*, 53(1), 71-82. <https://doi.org/10.1111/psyp.12547>
- Vasilyeva, M., Waterfall, H., & Huttenlocher, J. (2008). Emergence of syntax : Commonalities and differences across children. *Developmental Science*, 11(1), 84-97. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7687.2007.00656.x>
- Vrantsidis, D. M., Clark, C. A. C., Chevalier, N., Espy, K. A., & Wiebe, S. A. (2020). Socioeconomic status and executive function in early childhood : Exploring proximal mechanisms. *Developmental Science*, 23(3), e12917. <https://doi.org/10.1111/desc.12917>
- Wechsler, D. (1991). Wechsler Intelligence Scale for Children-III. *Edizione Italiana*.
- Wechsler, D. (2003). Wechsler intelligence scale for children—Fourth Edition (WISC-IV). *San Antonio, TX: The Psychological Corporation*.
- Woodcock, R. W., Mather, N., McGrew, K. S., & Wendling, B. J. (2001). *Woodcock-Johnson III tests of cognitive abilities*.
- Younger, J. W., Lee, K.-W., Demir-Lira, O. E., & Booth, J. R. (2019). Brain lateralization of phonological awareness varies by maternal education. *Developmental Science*, 22(6). <https://doi.org/10.1111/desc.12807>
- Zelazo, P. D., Anderson, J. E., Richler, J., Wallner-Allen, K., Beaumont, J. L., & Weintraub, S. (2013). II. NIH Toolbox Cognition Battery (CB) : Measuring executive function and attention. *Monographs of the Society for Research in Child Development*, 78(4), 16-33.

Annexe 3 : Caractéristiques de l'environnement familial d'apprentissage en littératie et les compétences langagière de l'enfant

Le modèle de l'environnement familial d'apprentissage en littératie (ou « *Home Literacy Environment* ») a permis de proposer un premier cadre de compréhension, et de mesure, des caractéristiques de l'environnement familial susceptibles de contribuer au développement des compétences en langage de l'enfant. Celui-ci est présenté de façon synthétique dans la section 2 du chapitre 4, cette annexe propose de reprendre et développer certains des éléments présentés dans le manuscrit principal.

A3.1. Décomposer les types d'activités en lien avec la littératie

A3.1.1. Capturer la variabilité des activités pratiquées en famille

L'expérience de l'enfant en lien avec la littératie au sein de sa famille pourrait dépendre de plusieurs situations spécifiques d'interaction. Le modèle formalisé par Sénéchal (2006) propose de distinguer deux types d'activités impliquant le langage : informelles et formelles (voir section 2.1 chapitre 4).

Les activités de littératie dites « informelles » exposeraient l'enfant au langage écrit (ou oral) de manière fortuite et seraient ainsi susceptibles d'entraîner un apprentissage incident au cours d'activités de la vie quotidienne. Ces activités de littératie informelles ont majoritairement été étudiées via la mesure des activités de lecture partagée entre l'enfant et son parent. À l'inverse, les activités de littératie dites « formelles » impliqueraient une activité d'enseignement explicite de la part des parents. Ces activités formelles, par ailleurs, supposeraient un but conscient et explicite de transmission ou d'enseignement de la part des parents sur la structure de la langue en demandant à leur enfant un effort conscient sur certains aspects du langage. Par exemple, les parents solliciteraient leur enfant pour leur apprendre certaines compétences, par exemple apprendre à reconnaître les lettres de leur prénom pour ensuite l'écrire (Sénéchal, 2006; Sénéchal & LeFevre, 2001, 2002; Sénéchal, LeFevre, Thomas, & Daley, 1998). De façon importante, au sein d'un même foyer, les fréquences des deux types d'activités pourraient ne pas être liées (Burris, Phillips, & Lonigan, 2019; Evans, Shaw, & Bell,

2000; Sénéchal, 2006; Sénéchal & LeFevre, 2002; Sénéchal et al., 1998), d'où l'intérêt d'en dissocier la mesure pour ne pas masquer leurs potentiels effets différentiels.

A3.1.2. Outils de mesure de ces activités de littératie

Pour évaluer la fréquence de réalisation de ces différentes activités de littératie, le modèle proposé par Sénéchal est basé avant tout sur l'usage d'un questionnaire permettant aux parents de rapporter la fréquence de réalisation de diverses activités de littératie ou le nombre de livres possédés (mesure *formelle* : fréquence d'enseignement des compétences de lecture ou d'écriture et fréquence ; mesure *informelle* : nombre de livres pour enfants disponibles; Sénéchal & LeFevre, 2002). Ce type de questionnaire a été majoritairement utilisé à travers les études visant à mesurer les activités familiales d'apprentissage de la littératie au sein de la famille (Sénéchal, 2006; Sénéchal & LeFevre, 2002, 2014). Certaines d'entre elles ont étendu la mesure des activités informelles au-delà de la fréquence rapportée à la seule activité de lecture partagée en mesurant la fréquence d'autres activités informelles de langage (comme, jouer avec des rimes, chanter des rimes ; Skwarchuk, Sowinski, & LeFevre, 2014).

Pour l'évaluation des activités informelles, il a aussi été utilisé des mesures plus indirectes en considérant que la mesure de fréquences auto-rapportées par les parents serait moins fiable étant donné le caractère de ces activités moins « conscientisé » par les parents puisque justement sans nécessaire but didactique (bien que l'aspect didactique des activités informelles a cependant pu être discuté ; voir Krijnen, van Steensel, Meeuwisse, Jongerling, & Severiens, 2020; Sénéchal, Whissell, & Bildfell, 2017). Ces mesures indirectes ont consisté à demander aux parents de rapporter le nombre de livres disponibles pour l'enfant au sein du foyer (Sénéchal, 2006; Sénéchal & LeFevre, 2002, 2014) ou d'évaluer leur familiarité avec la littérature enfantine (parmi une liste de titres de littérature enfantine, certains fictifs et d'autres réels, les parents devaient indiquer ceux qui leur étaient familiers ; Dilnot, Hamilton, Maughan, & Snowling, 2017; Evans et al., 2000; Farver, Xu, Eppe, & Lonigan, 2006; Foy & Mann, 2003; Hamilton, Hayiou-Thomas, Hulme, & Snowling, 2016; Hood, Conlon, & Andrews, 2008; Sénéchal & LeFevre, 2002; Sénéchal, LeFevre, Hudson, & Lawson, 1996; Sénéchal et al., 1998).

A3.2. Un modèle de dissociation sur les compétences comportementales susceptibles d'être entraînées

A3.2.1. Des résultats obtenus via l'administration de scores comportementaux évaluant différentes composantes du langage

Par ailleurs sur la base de résultats d'études antérieures, un aspect important du modèle proposé par Sénéchal est que la dissociation entre activités formelles et informelles serait le corolaire d'une distinction entre différentes composantes cognitives du langage et de la lecture.

Tout d'abord, les activités de lecture partagée, dites « informelles », favoriseraient le développement des aspects sémantiques du langage (le vocabulaire) chez l'enfant (pour revue

et méta-analyse, voir Bus, van IJzendoorn, & Pellegrini, 1995; Fletcher & Reese, 2005). Cette relation a été mise en évidence dans de nombreuses études employant des questionnaires portant directement sur les pratiques (Mol & Bus, 2011; Sénéchal, 2000; Sénéchal, Cornell, & Broda, 1995; Torppa, Poikkeus, Laakso, Eklund, & Lyytinen, 2006) ou demandant d'indiquer le nombre de livres possédés ainsi que la familiarité du parent à une liste de titres de livres (Burriss et al., 2019; Farver et al., 2006; Skwarchuk et al., 2014). Cette mise en lien de la lecture partagée et des compétences en vocabulaire de l'enfant a pu être justifiée notamment en raison de la potentielle richesse du lexique employé grâce à la lecture (Montag, Jones, & Smith, 2015) ou par la possibilité de sollicitations parentales supplémentaires pendant la lecture (Whitehurst et al., 1988). Les activités informelles seraient également susceptibles de participer, dans un second temps, aux compétences ultérieures de compréhension de lecture chez l'enfant (Ouellette & Beers, 2010; Sénéchal, 2006; Sénéchal & LeFevre, 2002).

D'après le modèle suggéré par Sénéchal (2006), les activités « formelles » seraient davantage liées aux connaissances du langage écrit chez l'enfant (Sénéchal, 2015; Sénéchal & LeFevre, 2002; Sénéchal et al., 1998; Skwarchuk et al., 2014), c'est-à-dire des compétences orientées vers la lecture, comme la connaissance des lettres (Evans et al., 2000; Manolitsis, Georgiou, Stephenson, & Parrila, 2009; Torppa et al., 2006) les compétences de décodage des mots (Hood et al., 2008; Sénéchal & LeFevre, 2002) et enfin la fluence de la lecture (Lehrl, Ebert, & Roßbach, 2013).

De façon générale, ce modèle offre une lecture de décomposition très schématique du type d'activités fréquemment engagées et les compétences de langage sollicitées. Ce modèle a été largement répliqué à travers différentes études (Evans et al., 2000; Hood et al., 2008; Manolitsis, Georgiou, & Tziraki, 2013; Rodriguez & Tamis-LeMonda, 2011; Sénéchal, 2006; Sénéchal & LeFevre, 2001, 2002; Sénéchal et al., 1998; Sénéchal & Young, 2008; Skwarchuk et al., 2014). Soulignons cependant que cette dichotomie très schématique a parfois été remise en question. Notamment la pertinence de la dissociation du type d'activités dans leurs relations avec les performances observées a été questionnée (Burriss et al., 2019; Kalia & Reese, 2009; Lehrl, Ebert, Blaurock, Rossbach, & Weinert, 2020; Manolitsis, Georgiou, & Parrila, 2011). La méta-analyse de Bus (1995) rapportait une taille d'effet moyenne ($d = 0.58$) pour la relation entre lecture partagée et diverses compétences en littératie émergente (incluant l'écriture de mots, la désignation des lettres et la conscience phonologique). De façon générale, il a été proposé que les activités de littératie (formelles et informelles) pourraient être liées aux compétences de lecture chez l'enfant (Levy, Gong, Hessels, Evans, & Jared, 2006; Molfese, Modglin, & Molfese, 2016; Sénéchal, 2006; Sénéchal & LeFevre, 2014; Sénéchal & Young, 2008) et notamment de façon longitudinale (Hood et al., 2008; Sénéchal, 2006; Sénéchal & LeFevre, 2002).

Par ailleurs, le modèle de « home literacy » a été répliqué dans la plupart des pays, utilisant des langages divers (toutefois pour des résultats plus nuancés sur cette généralisation à toutes les langues, voir Krijnen et al., 2020) ; par exemple chez des enfants anglophones en Australie (Hood et al., 2008), des enfants anglophones au Canada (Levy et al., 2006; Stephenson, Parrila, Georgiou, & Kirby, 2008), des enfants américains hispanophones (Farver, Xu, Lonigan, & Eppe, 2013), des enfants de langue grecque (Georgiou, Parrila, & Papadopoulos, 2008) des enfants chinois (Chen, Zhou, Zhao, & Davey, 2010; néanmoins seulement partiellement pour Zhang, Inoue, Shu, & Georgiou, 2020) et même chez des enfants

parlant français (Ryan, 2021). Pour conclure cette section sur la relation entre activités familiales et compétences comportementales dédiées au langage, précisons que le modèle proposé par Sénéchal (2006) a été construit sur la base de résultats d'études corrélationnelles. Néanmoins, sur la base de plusieurs résultats d'études interventionnelles, une relation causale semble tout à fait plausible. Sénéchal et Young (2008) ont ainsi pu analyser les résultats combinés des 16 études d'intervention, représentant 1 340 familles. Leur méta-analyse était en faveur d'un effet causal positif de l'implication des parents dans les activités de littératie avec leur enfant sur l'acquisition de différentes compétences langagières, et notamment de lecture, chez ces derniers.

A3.2.2. Spécifier les caractéristiques du langage échangé au sein de l'environnement familial

L'évaluation des activités au sein de l'environnement familial de littératie a majoritairement été réalisée via l'administration de questionnaires (Burris et al., 2019), néanmoins d'autres méthodes, plus qualitatives, ont aussi pu être utilisées via des mesures directes du langage échangé.

Dans un premier temps, la question des apports langagiers fournis à l'enfant a été largement explorée par des études qui portaient sur le développement des compétences langagières, notamment celles qui avaient exploré les caractéristiques du langage de l'enfant via des enregistrements d'échanges spontanés entre l'enfant et sa mère (voir chapitre 2 section 2.3). En plus d'exploiter ces riches données d'enregistrement pour caractériser les compétences des enfants, ces études ont également analysé les caractéristiques du langage adressé par la mère à l'enfant (Hart & Risley, 1995; Hoff, 2003b, 2006). L'analyse de ces données langagières a permis de tester l'hypothèse selon laquelle les disparités socio-économiques observées dans les compétences des enfants (rapportées dans le chapitre 2) pourraient s'expliquer par les différentes expériences langagières au sein de leur foyer. De fait, le travail de Hart et Risley (1995) avait également permis de quantifier le nombre moyen de mots adressés à l'enfant par sa mère. En plus de montrer l'existence d'une relation entre SES et compétences précoces de vocabulaire chez l'enfant, leurs données avaient permis d'estimer que, dès l'âge de 3 ans, les enfants issus des milieux les plus favorisés avaient d'ores et déjà entendu, en moyenne, 30 millions de mots de plus que les enfants issus de milieux moins favorisés. Hart et Risley (1995) soulignaient que, comparativement à leurs pairs plus défavorisés, les enfants issus des milieux les plus favorisés entendaient non seulement plus de mots au total, mais surtout que les mots entendus présentaient une plus grande variété linguistique. Les auteurs, en conclusion, proposaient d'expliquer les disparités socio-économiques des compétences précoces de vocabulaire chez l'enfant par les caractéristiques du langage qui lui était adressé au sein de leur famille.

Ces résultats ont ainsi pu être répliqués et étendus à d'autres compétences langagières chez l'enfant, comme les compétences grammaticales (Hoff, 2003b; Huttenlocher, Vasilyeva, Cymerman, & Levine, 2002; Huttenlocher, Waterfall, Vasilyeva, Vevea, & Hedges, 2010; Rowe, 2012; Weizman & Snow, 2001; pour revues, voir Hoff, Laursen, & Tardif, 2002; Hoff, 2006). D'autres aspects proximaux du langage ont aussi pu être étudiés, comme les contextes

« conversationnels » (avec des notions telles que les « tours de parole » ou l'analyse de « séquentialité de la conversation »). De façon générale, il a été proposé que les inégalités socio-économiques pourraient être associées à des différences dans la quantité et la qualité des expériences linguistiques précoces, ce qui en retour pourrait expliquer les différentes compétences langagières des enfants (pour revues, voir Hoff, 2006; Romeo, 2019; Rowe, 2018; Rowe & Zuckerman, 2016; Schwab & Lew-Williams, 2016).

Plus récemment, les progrès technologiques ont permis la réalisation d'enregistrements encore plus « écologiques » de l'exposition des enfants au langage au sein de leur foyer (c.-à-d. sans la présence d'un expérimentateur pour réaliser l'enregistrement ; Oller et al., 2010; Weisleder & Fernald, 2013). Un tel dispositif d'enregistrement, le « Language Environment Analysis » (LENA), qui se caractérise par sa petite taille (peut être glissé dans une poche du vêtement de l'enfant) et son autonomie, permet d'enregistrer les interactions langagières de l'enfant sur une journée entière. Le LENA peut également caractériser de façon automatique certains aspects langagiers, tels que le nombre de mots prononcés par l'adulte se trouvant à proximité de l'enfant, la quantité d'interactions entre l'adulte et l'enfant ou encore la fréquence de la production vocale de l'enfant (Gilkerson et al., 2017). Ce dispositif LENA a permis de répliquer l'existence de disparités socio-économiques substantielles dans les caractéristiques du langage adressé aux enfants dès le plus jeune âge, par exemple chez des nourrissons australiens (Dwyer et al., 2019), ou chez de jeunes enfants américains (âgés de 2 à 48 mois ; Gilkerson et al., 2017), mais également plus âgés (de 5 à 7 ans en moyenne ; Merz, Maskus, Melvin, He, & Noble, 2020; Romeo, Leonard, et al., 2018).

L'étude en neuro-imagerie de Romeo et collaborateurs (2018) est présentée dans la section 2.3 du chapitre 4. Leurs résultats étaient en faveur d'une médiation totale de la relation entre stimulations langagières des enfants à domicile et leurs scores verbaux par l'activité cérébrale pendant une tâche d'écoute d'histoire (dans l'IFG).

A3.3. Mesures proximales de l'environnement familial et variabilité intra-SES

Plusieurs études ont amené à considérer le phénomène de variabilité potentielle des facteurs proximaux de l'environnement familial d'apprentissage comme pouvant être indépendant des caractéristiques socio-économiques. Ainsi il pourrait être important de considérer que les différents « niveaux » de caractérisation de l'environnement familial, du plus « distal » (le SES) aux niveaux plus « proximaux » (environnement familial d'apprentissage), pourraient ne pas être liés par une simple relation « mécanistique linéaire ».

A3.3.1. Disparités intra-SES des activités d'apprentissage

Quel que soit le type de mesures utilisées, a souvent été décrit un phénomène de disparités des stimulations parentales indépendamment de leur statut socio-économique.

Par exemple, l'administration de l'échelle HOME (plus exactement du sous-score de stimulations cognitives) avait permis l'identification de liens avec les compétences cognitives chez l'enfant (rapporté dans la section 1.2 du chapitre 4). La plupart des travaux réalisés avaient montré comment les scores de cette échelle étaient susceptibles d'expliquer la relation entre SES et différences de scores cognitifs des enfants. Toutefois, ces résultats ne devraient pas amener à négliger d'autres études qui ont souligné que la relation entre les sous-scores HOME et les compétences des enfants pourrait aussi être indépendante du SES, comme dans l'analyse des données de la cohorte ECLS-K proposée par Elliott et Bachman (2018).

Afin d'améliorer la mesure des stimulations de l'environnement familial d'apprentissage, beaucoup d'études ont cherché à évaluer le type ou la fréquence d'activités de langage spécifiques (formelles ou informelles) dans le but premier d'expliquer les disparités socio-économiques dans les compétences langagières. Cependant, là aussi, de nombreuses études ont souligné un phénomène de variation indépendamment des caractéristiques socio-économiques familiales : soit en observant que la relation entre activités et compétences restait significative malgré la prise en compte du SES familial (certaines études comportementales, comme Martini & Sénéchal, 2012; Skwarchuk et al., 2014; mais aussi l'ensemble des études de neuro-imagerie précédemment citées pour avoir utilisé des mesures d'activités de l'environnement familial d'apprentissage : Hutton et al., 2015; Powers, Wang, Beach, Sideridis, & Gaab, 2016; Su et al., 2020) ; soit en montrant la persistance d'une telle relation entre expériences proximales et compétences des enfants au sein d'un groupe socio-économique pourtant homogène, notamment au sein d'un des milieux les plus défavorisés (Aram & Levin, 2001; Burris et al., 2019; Mendive, Lara, Aldoney, Pérez, & Pezoa, 2020; Steensel, 2006).

A3.3.2. Disparités intra-SES des caractéristiques du langage employé

Les caractéristiques du langage, employé par les parents lorsqu'ils s'adressent à leur enfant, pourraient donc ne pas dépendre des seules caractéristiques socio-économiques du foyer. Par exemple, grâce à l'utilisation du dispositif LENA, Gilkerson et collaborateurs (2017) avaient certes montré une relation entre SES et quantité de mots prononcés par l'adulte en direction de l'enfant (voir section 2.3 du chapitre 4 et section A3.3.2 de cette annexe 3), mais ils avaient également souligné que cette relation ne devait pas amener à négliger l'existence d'un phénomène de variabilité de ces mesures au sein d'un même groupe socio-économique. De manière congruente, certaines études ont permis de souligner que, même après contrôle des caractéristiques socio-économiques, les variations dans l'exposition des enfants au langage restaient liées à leurs performances langagières (Rowe, 2012; Weisleder & Fernald, 2013; Weizman & Snow, 2001) ainsi qu'aux différences mesurées au niveau cérébral (Merz et al., 2020; Romeo, Leonard, et al., 2018; Romeo, Segaran, et al., 2018). Des variations ont également été rapportées dans l'exposition langagière des enfants au sein de groupes socio-économiques homogènes (Hirsh-Pasek et al., 2015; Pan, Rowe, Singer, & Snow, 2005; Weisleder & Fernald, 2013). Une méta-analyse récente portant sur des données obtenues via le dispositif LENA au sein de 22 échantillons indépendants (Piot, Havron, & Cristia, 2020) a suggéré l'existence d'une relation plutôt faible entre SES et mesures proximales du langage ($r=.19$). Enfin, une revue de littérature réalisée par Schwab & Lew-Williams (2016) a répertorié certains résultats ayant conduit à identifier des disparités socio-économiques dans les

expériences langagières des enfants. Néanmoins les auteurs ont surtout souligné l'existence de disparités importantes pour ces expériences langagières au sein d'une même classe socio-économique.

A3.4. Vers une caractérisation de l'environnement familial comme objet d'étude à part entière : préciser les expériences de l'enfant et mesurer les traits parentaux

A3.4.1. Le caractère multidimensionnel des expériences induites par les disparités de statut socio-économique

Une première voie de compréhension du phénomène d'hétérogénéité des expériences proximales de littératie des enfants au sein de milieux familiaux pourtant homogènes d'un point de vue socio-économique, pourrait être d'invoquer le caractère multi-facette du facteur SES (Conger & Donnellan, 2007).

En effet, comme précisé en conclusion du chapitre 3, différents facteurs SES distaux supposent nécessairement, statistiquement, un grand nombre d'expériences proximales différentes pour chaque enfant et celles-ci ne se limitent bien sûr pas aux caractéristiques de leur environnement familial d'apprentissage (les stimulations cognitives familiales). Autrement dit, il s'avère illusoire de penser que les mesures d'activités et/ou de langage familiales détaillées dans cette section puissent permettre de rendre compte de l'ensemble des variations de situations vécues par l'enfant selon son milieu socio-économique. Cependant, c'est justement parce que la mesure distale du SES ne se traduit pas uniquement à travers les seules expériences proximales de l'environnement familial d'apprentissage de l'enfant, qu'il est important d'en réaliser la mesure et d'en tenir compte pour analyser les liens entre compétences de l'enfant et activités d'apprentissage mesurées au sein de sa famille. En somme, il importe de s'assurer que les éventuelles relations mises en évidence soient bien significatives, « toutes choses égales par ailleurs » vis-à-vis de la dimension multi-facette du SES (puisque, contrairement à l'expérimentation animale évoquée en conclusion du chapitre 3, les différents facteurs proximaux du SES ayant tendance à être corrélés les uns aux autres, il est impossible, chez l'humain, d'étudier un facteur proximal du SES en l'isolant totalement de tous les autres). Étudier l'environnement d'apprentissage familial sans mesurer et contrôler la variabilité inhérente aux mesures socio-économiques pourrait par exemple amener à conclure à l'existence de certaines relations alors que celles-ci pourraient en réalité être davantage expliquées par d'autres facettes du SES comme les facteurs nutritionnels, d'exposition aux toxines ou encore de stress.

A3.4.2. Combiner les mesures proximales de stimulations cognitives familiales pour mieux les discriminer

Une seconde façon d'adresser la compréhension de cette hétérogénéité des mesures d'environnement familial d'apprentissage intra-SES pourrait être de chercher à mesurer

d'autres expériences cognitives significatives au sein de la famille ou encore à les mesurer de façon plus nuancée (Huttenlocher et al., 2010). De la même manière que le modèle proposé par Sénéchal (2006) avait déjà mis l'accent sur la nécessité de discriminer les activités de littératie informelles et formelles, l'étude des expériences d'apprentissage de l'enfant dans son environnement familial pourrait gagner à être davantage dissociée selon leurs aspects qualitatifs. L'article de revue de Pace et collaborateurs (2017) a ainsi souligné que les recherches récentes ont corroboré le fait que les différences liées au SES dans l'environnement familial d'apprentissage pourraient ne pas porter sur les seuls aspects quantitatifs du langage, mais plutôt s'étendre aux aspects qualitatifs des interactions et des occasions d'apprentissage. Ce degré qualitatif supplémentaire ne signifierait pas nécessairement le besoin d'accéder à un niveau de mesure encore plus « microscopique » des expériences d'apprentissages de l'enfant (celui de la mesure des échanges langagiers étant déjà extrêmement précis), mais signifierait plutôt l'intérêt de cumuler au sein d'une même étude différents indices sur les expériences familiales d'apprentissage de l'enfant.

Par exemple, en ce qui concerne justement les mesures des stimulations verbales adressées à l'enfant au sein de sa famille, certaines études avaient déjà pu souligner l'intérêt de ne pas utiliser la seule quantification des mots entendus par l'enfant, mais aussi de caractériser d'autres aspects comme les « tours conversationnels » (Romeo, Leonard, et al., 2018; Romeo, Segaran, et al., 2018). D'autres études ont aussi souligné l'importance de considérer le contexte des échanges langagiers, en combinant des mesures « micro » des aspects langagiers, avec des mesures « moins micro » des activités.

À titre illustratif, on propose de considérer l'exemple de deux mesures déjà présentées dans ce chapitre : celle de la fréquence d'activité informelle de lecture partagée (questionnaire) et celle de la caractérisation des échanges langagiers adressés à l'enfant (enregistrement). L'activité de lecture partagée serait susceptible d'offrir un cadre d'interaction propice à une plus grande richesse d'expérience lexicale pour l'enfant par rapport au langage qui lui est habituellement adressé (voir **Figure A5**, tirée de Montag et al., 2015) ; il a été proposé que ce cadre d'interaction pourrait même aller jusqu'à gommer les disparités socio-économiques mesurées par ailleurs dans le langage spontané adressé à l'enfant (Hoff, 2003a). Aussi précises soient-elles, les mesures réalisées à partir des échanges langagiers pourraient ne pas suffire à rendre compte à elles seules de la variété des expériences familiales d'apprentissage. Combiner des mesures différentes des expériences d'apprentissage familiales des enfants (ici, les mesures des activités de littératie *et* celles d'enregistrements des interactions langagières) pourrait probablement participer à réduire l'hétérogénéité des résultats. Skwarchuk et collaborateurs (2014) ont également proposé de différencier les activités familiales d'apprentissage mesurées à l'aide des questionnaires selon leur degré de difficulté par rapport à l'âge de l'enfant.

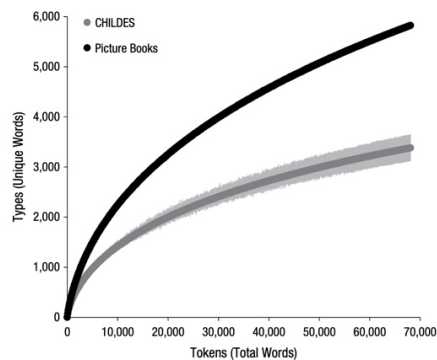


Figure A5 : Figure tirée de Montag et al. (2015) illustrant la variété lexicale des mots (en ordonnée) susceptibles d'être utilisés pendant une activité de lecture (lexique tiré des livres d'images ; en noir sur le graphique) par rapport à la variété lexicale utilisée dans les échanges spontanés du parent avec son enfant (toute classe sociale confondue, tirées données tirées du corpus CHILDES, Child Language Data Exchange System ; en gris sur le graphique) par rapport au nombre total de mots prononcés (en abscisse).

A3.4.3. Intégrer des mesures des traits parentaux

Skwarchuk et collaborateurs (2014) ont suggéré d'enrichir le modèle initial de Sénéchal (2006) sur l'environnement familial d'apprentissage en ne le limitant pas aux seules mesures des stimulations cognitives directes des enfants (les activités ou le langage), mais en intégrant des mesures concernant les traits parentaux : leur attitude à l'égard de la littératie ainsi que leurs attentes concernant la réussite scolaire de leur enfant. Ces caractéristiques parentales pourraient agir comme des prédicteurs potentiels de la fréquence des activités (informelles ou formelles) pratiquées en famille, voire être directement liées aux compétences mesurées chez les enfants. Martini et Sénéchal (2012) ont, par exemple, rapporté que le niveau d'attentes mesuré chez les parents concernant la réussite scolaire de leurs enfants pouvait expliquer les différences de compétences précoces de lecture chez ces derniers ainsi que leur connaissance des lettres (et cela même en contrôlant pour le score d'activités familiales de littératie formelle). Des recherches antérieures avaient déjà suggéré que les attitudes et les croyances des parents à l'égard de la lecture (Rowe, 2008) étaient susceptibles d'impacter les activités familiales de lecture partagée, et ainsi le développement de la lecture chez les enfants (Machida, Taylor, & Kim, 2002; Vernon-Feagans et al., 2008; Weigel, Martin, & Bennett, 2006). L'analyse de Vernon-Feagans et collaborateurs (2008), portant sur des données obtenues auprès de 1157 familles américaines, a permis de suggérer que les connaissances ou les croyances des mères sur le développement de leur enfant pourraient expliquer les différences dans leurs pratiques de lecture. Fletcher et Reese (2005), dans un article de revue de la littérature (sur les activités familiales de lecture partagées auprès d'enfants de moins de 3 ans), avaient souligné l'importance d'identifier d'autres « facteurs proximaux » : les caractéristiques parentales, telles que leurs systèmes de croyances ou leur perception de leurs propres compétences de lecture, pourraient influencer leurs pratiques de lecture partagée avec leur enfant.

Par ailleurs, des analyses de données tirées de la cohorte néerlandaise « Familial Influences on Literacy Abilities » ont permis à Van Bergen et collaborateurs (2015; 2016) de souligner également le rôle des compétences parentales dans le domaine du langage. Ils ont montré que les compétences en fluence de lecture des enfants à 10 ans étaient liées aux

compétences en fluences de lecture de chacun de leurs parents (van Bergen et al., 2015). Ils ont également montré que si la mesure du nombre de livres disponibles au domicile familial permettait de prédire une part de la variance des compétences en fluence de lecture des enfants ; après prise en compte des compétences de fluence des parents, la part de variance expliquée par la variable du nombre de livres persistait, mais diminuait significativement (la part de variance expliquée passait de 13% à 5% ; tandis que les compétences des deux parents permettaient d'expliquer 17% de la variance ; van Bergen et al., 2016). Par ailleurs, une autre étude a également souligné la nécessité de mesurer les compétences de langage des parents pour comprendre l'environnement familial d'apprentissage dans son ensemble : après contrôle des performances maternelles, la fréquence des activités de lecture partagée (activité de littératie informelle) n'était plus significativement liée aux performances mesurées chez les enfants à 5 ans et demi (Puglisi, Hulme, Hamilton, & Snowling, 2017). Enfin, au niveau cérébral, l'étude de Powers et collaborateurs (2016) a également permis de montrer une potentielle dissociation du lien entre environnement familial de littératie et activité cérébrale dédiée au langage chez les enfants selon la présence d'un « risque familial » de dyslexie (pour description, voir section 2.4 chapitre 4). L'ensemble de ces études indiquent l'intérêt de veiller à capturer une image la plus globale des différentes caractéristiques de l'environnement familial d'apprentissage (sans se limiter aux seules mesures des expériences d'apprentissage et du SES).

A3.5. Conclusion intermédiaire : l'environnement familial d'apprentissage comme objet d'étude à part entière

Le modèle d'environnement familial de littératie offre un cadre d'identification des différents types d'expériences d'apprentissage de l'enfant au sein de sa famille, notamment via l'évaluation de la fréquence d'activités (dissociées ou non selon leur caractère formel/informel), de la disponibilité de matériels éducatifs (comme les livres) ou encore de mesures du langage adressé à l'enfant. Plutôt qu'objectiver un simple score susceptible de jouer un rôle médiateur dans la relation entre SES et disparités neurocognitives chez l'enfant, l'environnement familial d'apprentissage pourrait être considéré comme un objet d'étude, complexe, à part entière.

Ainsi pour être en mesure de comprendre, au moins en partie, les mécanismes sous-jacents aux variations de profils neurocognitifs parmi les enfants, il pourrait être crucial d'éviter une image trop parcellaire des expériences d'apprentissage que l'enfant rencontre au sein de la famille. Pour saisir l'ensemble des simulations cognitives dont pourrait bénéficier un enfant au sein de son foyer, il pourrait donc être nécessaire de combiner différentes échelles de mesures proximales de l'environnement familial d'apprentissage. Il faudrait donc chercher à combiner des mesures au plus près de l'expérience concrète de l'enfant (mesurer un large champ d'activités en lien avec la littératie en veillant à différencier leur caractère formel ou informel ainsi que leur niveau de complexité et/ou caractériser de façon précise et contextuelle les échanges langagiers) avec des mesures des traits parentaux, en apparence plus éloignés des mécanismes à l'origine des variations neurocognitives chez l'enfant, mais pourtant tout à fait susceptibles de jouer un rôle tout aussi fondamental (c.-à-d. les caractéristiques socio-

économiques, mais aussi les mesures des attentes, des attitudes ou des compétences des parents).

References

- Aram, D., & Levin, I. (2001). Mother-child joint writing in low SES : Sociocultural factors, maternal mediation, and emergent literacy. *Cognitive Development, 16*(3), 831-852. [https://doi.org/10.1016/S0885-2014\(01\)00067-3](https://doi.org/10.1016/S0885-2014(01)00067-3)
- Burris, P. W., Phillips, B. M., & Lonigan, C. J. (2019). Examining the Relations of the Home Literacy Environments of Families of Low SES with Children's Early Literacy Skills. *Journal of education for students placed at risk, 24*(2), 154-173. <https://doi.org/10.1080/10824669.2019.1602473>
- Bus, A. G., van IJzendoorn, M. H., & Pellegrini, A. D. (1995). Joint book reading makes for success in learning to read : A meta-analysis on intergenerational transmission of literacy. *Review of Educational Research, 65*(1), 1-21. <https://doi.org/10.2307/1170476>
- Chen, X., Zhou, H., Zhao, J., & Davey, G. (2010). Home Literacy Experiences and Literacy Acquisition among Children in Guangzhou, South China. *Psychological Reports, 107*(2), 354-366. <https://doi.org/10.2466/04.11.17.21.28.PR0.107.5.354-366>
- Conger, R. D., & Donnellan, M. B. (2007). An Interactionist Perspective on the Socioeconomic Context of Human Development. <https://doi-org.insb.bib.cnrs.fr/10.1146/annurev.psych.58.110405.085551>, *Annu. Rev. Psychol.*(58), 175-199. (world). <https://doi.org/10.1146/annurev.psych.58.110405.085551>
- Dilnot, J., Hamilton, L., Maughan, B., & Snowling, M. J. (2017). Child and environmental risk factors predicting readiness for learning in children at high risk of dyslexia. *Development and Psychopathology, 29*(1), 235-244. <https://doi.org/10.1017/S0954579416000134>
- Dwyer, A., Jones, C., Davis, C., Kitamura, C., & Ching, T. Y. C. (2019). Maternal education influences Australian infants' language experience from six months. *Infancy: The Official Journal of the International Society on Infant Studies, 24*(1), 90-100. <https://doi.org/10.1111/inf.12262>
- Elliott, L., & Bachman, H. J. (2018). Parents' educational beliefs and children's early academics : Examining the role of SES. *Children and Youth Services Review, 91*, 11-21. <https://doi.org/10.1016/j.chilyouth.2018.05.022>
- Evans, M. A., Shaw, D., & Bell, M. (2000). Home literacy activities and their influence on early literacy skills. *Canadian Journal of Experimental Psychology = Revue Canadienne De Psychologie Experimentale, 54*(2), 65-75.
- Farver, J. A. M., Xu, Y., Eppe, S., & Lonigan, C. J. (2006). Home environments and young Latino children's school readiness. *Early Childhood Research Quarterly, 21*(2), 196-212. <https://doi.org/10.1016/j.ecresq.2006.04.008>
- Farver, J. A. M., Xu, Y., Lonigan, C. J., & Eppe, S. (2013). The home literacy environment and Latino head start children's emergent literacy skills. *Developmental Psychology, 49*(4), 775-791. <https://doi.org/10.1037/a0028766>
- Fletcher, K. L., & Reese, E. (2005). Picture book reading with young children : A conceptual framework. *Developmental Review, 25*(1), 64-103. <https://doi.org/10.1016/j.dr.2004.08.009>
- Foy, J. G., & Mann, V. (2003). Home literacy environment and phonological awareness in preschool children : Differential effects for rhyme and phoneme awareness. *Applied Psycholinguistics, 24*(1), 59-88. <https://doi.org/10.1017/S0142716403000043>
- Georgiou, G. K., Parrila, R., & Papadopoulos, T. C. (2008). Predictors of word decoding and reading fluency across languages varying in orthographic consistency. *Journal of Educational Psychology, 100*(3), 566.

- Gilkerson, J., Richards, J. A., Warren, S. F., Montgomery, J. K., Greenwood, C. R., Kimbrough Oller, D., ... Paul, T. D. (2017). Mapping the Early Language Environment Using All-Day Recordings and Automated Analysis. *American Journal of Speech-Language Pathology*, 26(2), 248-265. https://doi.org/10.1044/2016_AJSLP-15-0169
- Hamilton, L. G., Hayiou-Thomas, M. E., Hulme, C., & Snowling, M. J. (2016). The home literacy environment as a predictor of the early literacy development of children at family-risk of dyslexia. *Scientific Studies of Reading*, 20(5), 401-419. <https://doi.org/10.1080/10888438.2016.1213266>
- Hart, B., & Risley, T. R. (1995). *Meaningful differences in the everyday experience of young American children*. Baltimore, MD, US: Paul H Brookes Publishing.
- Hirsh-Pasek, K., Adamson, L. B., Bakeman, R., Owen, M. T., Golinkoff, R. M., Pace, A., ... Suma, K. (2015). The contribution of early communication quality to low-income children's language success. *Psychological science*, 26(7), 1071-1083.
- Hoff, E. (2003a). Causes and consequences of SES-related differences in parent-to-child speech. In *Monographs in parenting series. Socioeconomic status, parenting, and child development* (p. 147-160). Mahwah, NJ, US: Lawrence Erlbaum Associates Publishers.
- Hoff, E. (2003b). 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., Laursen, B., & Tardif, T. (2002). *Socioeconomic status and parenting. Handbook of parenting : Vol. 2. Biology and ecology of parenting*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Hood, M., Conlon, E., & Andrews, G. (2008). Preschool home literacy practices and children's literacy development : A longitudinal analysis. *Journal of Educational Psychology*, 100(2), 252-271. <https://doi.org/10.1037/0022-0663.100.2.252>
- Huttenlocher, J., Vasilyeva, M., Cymerman, E., & Levine, S. C. (2002). Language input and child syntax. *Cognitive psychology*, 45(3), 337-374.
- 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>
- Hutton, J. S., Horowitz-Kraus, T., Mendelsohn, A. L., DeWitt, T., Holland, S. K., & Consortium, the C.-M. A. (2015). Home Reading Environment and Brain Activation in Preschool Children Listening to Stories. *Pediatrics*, 136(3), 466-478. <https://doi.org/10.1542/peds.2015-0359>
- Kalia, V., & Reese, E. (2009). Relations Between Indian Children's Home Literacy Environment and Their English Oral Language and Literacy Skills. *Scientific Studies of Reading*, 13(2), 122-145. <https://doi.org/10.1080/10888430902769517>
- Krijnen, E., van Steensel, R., Meeuwisse, M., Jongerling, J., & Severiens, S. (2020). Exploring a refined model of home literacy activities and associations with children's emergent literacy skills. *Reading and Writing*, 33(1), 207-238. <https://doi.org/10.1007/s11145-019-09957-4>
- 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. (2013). *Facets of Preschoolers' Home Literacy Environments : What Contributes to Reading Literacy in Primary School?*
- 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>

- Machida, S., Taylor, A. R., & Kim, J. (2002). The Role of Maternal Beliefs in Predicting Home Learning Activities in Head Start Families*. *Family Relations*, 51(2), 176-184.
<https://doi.org/10.1111/j.1741-3729.2002.00176.x>
- Manolitsis, G., Georgiou, G. K., & Parrila, R. (2011). Revisiting the home literacy model of reading development in an orthographically consistent language. *Learning and Instruction*, 21(4), 496-505.
<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2010.06.005>
- 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.
- Manolitsis, G., Georgiou, G., Stephenson, K., & Parrila, R. (2009). Beginning to read across languages varying in orthographic consistency : Comparing the effects of non-cognitive and cognitive predictors. *Learning and Instruction*, 19(6), 466-480.
<https://doi.org/10.1016/j.learninstruc.2008.07.003>
- Martini, F., & Sénéchal, M. (2012). Learning Literacy Skills at Home : Parent Teaching, Expectations, and Child Interest. *Canadian Journal of Behavioural Science/Revue canadienne des sciences du comportement*, 44, 210-221. <https://doi.org/10.1037/a0026758>
- Mendive, S., Lara, M. 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*, 91(6), 2042-2062. <https://doi.org/10.1111/cdev.13382>
- Merz, E. C., Maskus, E. A., Melvin, S. A., He, X., & Noble, K. G. (2020). Socioeconomic Disparities in Language Input Are Associated With Children's Language-Related Brain Structure and Reading Skills. *Child Development*, 91(3), 846-860. <https://doi.org/10.1111/cdev.13239>
- 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.
- Molfese, V. J., Modglin, A., & Molfese, D. L. (2016). The Role of Environment in the Development of Reading Skills : A Longitudinal Study of Preschool and School-Age Measures. *Journal of Learning Disabilities*. (Sage CA: Los Angeles, CA).
<https://doi.org/10.1177/00222194030360010701>
- Montag, J. L., Jones, M. N., & Smith, L. B. (2015). The Words Children Hear : Picture Books and the Statistics for Language Learning. *Psychological Science*, 26(9), 1489-1496.
<https://doi.org/10.1177/0956797615594361>
- Oller, D. K., Niyogi, P., Gray, S., Richards, J. A., Gilkerson, J., Xu, D., ... Warren, S. F. (2010). Automated vocal analysis of naturalistic recordings from children with autism, language delay, and typical development. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107(30), 13354-13359. <https://doi.org/10.1073/pnas.1003882107>
- Ouellette, G., & Beers, A. (2010). A not-so-simple view of reading : How oral vocabulary and visual-word recognition complicate the story. *Reading and Writing*, 23(2), 189-208.
<https://doi.org/10.1007/s11145-008-9159-1>
- 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>
- Pan, B. A., Rowe, M. L., Singer, J. D., & Snow, C. E. (2005). Maternal correlates of growth in toddler vocabulary production in low-income families. *Child Development*, 76(4), 763-782.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2005.00876.x>
- Piot, L., Havron, N., & Cristia, A. (2020). Socioeconomic status correlates with measures of Language ENvironment Analysis (LENA) system : A meta-analysis. *Journal of Child Language*, 1-15.
- Powers, S. J., Wang, Y., Beach, S. D., Sideridis, G. D., & Gaab, N. (2016). Examining the relationship between home literacy environment and neural correlates of phonological processing in beginning

- readers with and without a familial risk for dyslexia : An fMRI study. *Annals of Dyslexia*, 66(3), 337-360. <https://doi.org/10.1007/s11881-016-0134-2>
- Puglisi, M. L., Hulme, C., Hamilton, L. G., & Snowling, M. J. (2017). The Home Literacy Environment Is a Correlate, but Perhaps Not a Cause, of Variations in Children's Language and Literacy Development. *Scientific Studies of Reading*, 21(6), 498-514. <https://doi.org/10.1080/10888438.2017.1346660>
- Rodriguez, E. T., & Tamis-LeMonda, C. S. (2011). Trajectories of the home learning environment across the first 5 years : Associations with children's vocabulary and literacy skills at prekindergarten. *Child Development*, 82(4), 1058-1075. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2011.01614.x>
- Romeo, R. R. (2019). Socioeconomic and Experiential Influences on the Neurobiology of Language Development. *Perspectives of the ASHA Special Interest Groups*, 4(6), 1229-1238. https://doi.org/10.1044/2019_PERSP-19-00073
- Romeo, R. R., Leonard, J. A., Robinson, S. T., West, M. R., Mackey, A. P., Rowe, M. L., & Gabrieli, J. D. E. (2018). Beyond the 30-Million-Word Gap : Children's Conversational Exposure Is Associated With Language-Related Brain Function. *Psychological Science*, 29(5), 700-710. <https://doi.org/10.1177/0956797617742725>
- Romeo, R. R., Segaran, J., Leonard, J. A., Robinson, S. T., West, M. R., Mackey, A. P., ... Gabrieli, J. D. E. (2018). Language Exposure Relates to Structural Neural Connectivity in Childhood. *Journal of Neuroscience*, 38(36), 7870-7877. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0484-18.2018>
- Rowe, M. L. (2008). Child-directed speech : Relation to socioeconomic status, knowledge of child development and child vocabulary skill. *Journal of Child Language*, 35(1), 185-205. <https://doi.org/10.1017/s0305000907008343>
- Rowe, M. L. (2012). A Longitudinal Investigation of the Role of Quantity and Quality of Child-Directed Speech in Vocabulary Development. *Child Development*, 83(5), 1762-1774. <https://doi.org/10.1111/j.1467-8624.2012.01805.x>
- Rowe, M. L. (2018). Understanding socioeconomic differences in parents' speech to children. *Child Development Perspectives*, 12(2), 122-127.
- Rowe, M. L., & Zuckerman, B. (2016). Word gap redux : Developmental sequence and quality. *JAMA pediatrics*, 170(9), 827-828.
- Ryan, È. (2021). The impact of home literacy on bilingual vocabulary development. *Bilingual Research Journal*, 44(1), 108-123. <https://doi.org/10.1080/15235882.2021.1905105>
- Schwab, J. F., & Lew-Williams, C. (2016). Language learning, socioeconomic status, and child-directed speech. *WIREs Cognitive Science*, 7(4), 264-275. <https://doi.org/10.1002/wcs.1393>
- Sénéchal, M. (2000). Examen du lien entre la lecture de livres et le développement du vocabulaire chez l'enfant préscolaire. *Enfance*, 53(2), 169-186. <https://doi.org/10.3406/enfan.2000.3175>
- Sénéchal, 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
- Sénéchal, M. (2015). Young children's home literacy experiences. In *Oxford library of psychology. The Oxford handbook of reading* (p. 397-414). New York, NY, US: Oxford University Press.
- Sénéchal, M., Cornell, E. H., & Broda, L. S. (1995). Age-related differences in the organization of parent-infant interactions during picture-book reading. *Early Childhood Research Quarterly*, 10(3), 317-337.
- Sénéchal, M., & LeFevre, J.-A. (2001). Storybook reading and parent teaching : Links to language and literacy development. *New Directions for Child and Adolescent Development*, (92), 39-52; discussion 91-98. <https://doi.org/10.1002/cd.14>

- 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>
- Sénéchal, M., LeFevre, J.-A., Hudson, E., & Lawson, E. P. (1996). Knowledge of storybooks as a predictor of young children's vocabulary. *Journal of Educational Psychology, 88*(3), 520-536.
<https://doi.org/10.1037/0022-0663.88.3.520>
- Sénéchal, M., LeFevre, J.-A., Thomas, E. M., & Daley, K. E. (1998). Differential effects of home literacy experiences on the development of oral and written language. *Reading Research Quarterly, 33*(1), 96-116. <https://doi.org/10.1598/RRQ.33.1.5>
- Sénéchal, M., Whissell, J., & Bildfell, A. (2017). Starting from home : Home literacy practices that make a difference. *Theories of reading development, 383-408*.
- Sénéchal, M., & Young, L. (2008). The effect of family literacy interventions on children's acquisition of reading from kindergarten to grade 3 : A meta-analytic review. *Review of Educational Research, 78*(4), 880-907.
- 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>
- Steensel, R. V. (2006). Relations between socio-cultural factors, the home literacy environment and children's literacy development in the first years of primary education. *Journal of Research in Reading, 29*(4), 367-382. <https://doi.org/10.1111/j.1467-9817.2006.00301.x>
- Stephenson, K. A., Parrila, R. K., Georgiou, G. K., & Kirby, J. R. (2008). Effects of Home Literacy, Parents' Beliefs, and Children's Task-Focused Behavior on Emergent Literacy and Word Reading Skills. *Scientific Studies of Reading, 12*(1), 24-50. <https://doi.org/10.1080/10888430701746864>
- Su, M., Thiebaut de Schotten, M., Zhao, J., Song, S., Zhou, W., Gong, G., ... Shu, H. (2020). Influences of the early family environment and long-term vocabulary development on the structure of white matter pathways : A longitudinal investigation. *Developmental Cognitive Neuroscience, 42*, 100767. <https://doi.org/10.1016/j.dcn.2020.100767>
- Torppa, M., Poikkeus, A.-M., Laakso, M.-L., Eklund, K., & Lyytinen, H. (2006). Predicting delayed letter knowledge development and its relation to grade 1 reading achievement among children with and without familial risk for dyslexia. *Developmental psychology, 42*(6), 1128.
- van Bergen, E., Bishop, D., van Zuijen, T., & de Jong, P. F. (2015). How does parental reading influence children's reading ? A study of cognitive mediation. *Scientific studies of reading, 19*(5), 325-339.
- van Bergen, E., van Zuijen, T., Bishop, D., & F. de Jong, P. (2016). Why Are Home Literacy Environment and Children's Reading Skills Associated? What Parental Skills Reveal. *Reading Research Quarterly*. <https://doi.org/10.1002/rrq.160>
- Vernon-Feagans, L., Pancsofar, N., Willoughby, M., Odom, E., Quade, A., Cox, M., & Investigators, F. L. K. (2008). Predictors of maternal language to infants during a picture book task in the home : Family SES, child characteristics and the parenting environment. *Journal of Applied Developmental Psychology, 29*(3), 213-226.
- Weigel, D. J., Martin, S. S., & Bennett, K. K. (2006). Contributions of the home literacy environment to preschool-aged children's emerging literacy and language skills. *Early Child Development and Care, 176*(3-4), 357-378. <https://doi.org/10.1080/03004430500063747>

- 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>
- Weizman, Z. O., & Snow, C. E. (2001). Lexical input as related to children's vocabulary acquisition : Effects of sophisticated exposure and support for meaning. *Developmental Psychology*, 37(2), 265-279. <https://doi.org/10.1037/0012-1649.37.2.265>
- Zhang, S.-Z., Inoue, T., Shu, H., & Georgiou, G. K. (2020). How does home literacy environment influence reading comprehension in Chinese? Evidence from a 3-year longitudinal study. *Reading and Writing*, 33(7), 1745-1767. <https://doi.org/10.1007/s11145-019-09991-2>

Annexe 4 : Nurturing the reading brain: Home literacy practices are associated with children's neural response to printed words through vocabulary skills.

Article 3 : Girard Cléa, Bastelica Thomas, Léone Jessica., Epinat-Duclos Justine., Longo Léa & Prado Jérôme (2021). Nurturing the reading brain: Home literacy practices are associated with children's neural response to printed words through vocabulary skills, *npj Science of Learning*. <https://doi.org/10.1038/s41539-021-00112-9>

Abstract

Previous studies indicate that children are exposed to different literacy experiences at home. Although these disparities have been shown to affect children's literacy skills, it remains unclear whether and how home literacy practices influence brain activity underlying word-level reading. In the present study, we asked parents of French children from various socioeconomic backgrounds ($n = 66$; 8.46 ± 0.36 years, range 7.52–9.22; 20 girls) to report the frequency of home literacy practices. Neural adaptation to the repetition of printed words was then measured using functional magnetic resonance imaging (fMRI) in a subset of these children ($n = 44$; 8.49 ± 0.33 years, range 8.02–9.14; 13 girls), thereby assessing how sensitive was the brain to the repeated presentation of these words. We found that more frequent home literacy practices were associated with enhanced word adaptation in the left posterior inferior frontal sulcus ($r = 0.32$). We also found that the frequency of home literacy practices was associated with children's vocabulary skill ($r = 0.25$), which itself influenced the relation between home literacy practices and neural adaptation to words. Finally, none of these effects were observed in a digit adaptation task, highlighting their specificity to word recognition. These findings are consistent with a model positing that home literacy experiences may improve children's vocabulary skill, which in turn may influence the neural mechanisms supporting word-level reading.

ARTICLE OPEN



Nurturing the reading brain: home literacy practices are associated with children's neural response to printed words through vocabulary skills

Cléa Girard¹, Thomas Bastelica¹, Jessica Léone¹, Justine Epinat-Duclos¹, Léa Longo¹ and Jérôme Prado¹

Previous studies indicate that children are exposed to different literacy experiences at home. Although these disparities have been shown to affect children's literacy skills, it remains unclear whether and how home literacy practices influence brain activity underlying word-level reading. In the present study, we asked parents of French children from various socioeconomic backgrounds ($n = 66$; 8.46 ± 0.36 years, range 7.52–9.22; 20 girls) to report the frequency of home literacy practices. Neural adaptation to the repetition of printed words was then measured using functional magnetic resonance imaging (fMRI) in a subset of these children ($n = 44$; 8.49 ± 0.33 years, range 8.02–9.14; 13 girls), thereby assessing how sensitive was the brain to the repeated presentation of these words. We found that more frequent home literacy practices were associated with enhanced word adaptation in the left posterior inferior frontal sulcus ($r = 0.32$). We also found that the frequency of home literacy practices was associated with children's vocabulary skill ($r = 0.25$), which itself influenced the relation between home literacy practices and neural adaptation to words. Finally, none of these effects were observed in a digit adaptation task, highlighting their specificity to word recognition. These findings are consistent with a model positing that home literacy experiences may improve children's vocabulary skill, which in turn may influence the neural mechanisms supporting word-level reading.

npj Science of Learning (2021)6:34; <https://doi.org/10.1038/s41539-021-00112-9>

INTRODUCTION

Literacy skills are fundamental to children's personal and professional growth in our society. Yet, children vary greatly in their reading development throughout the school years¹. Because such individual differences can be observed as early as in the preschool years, it has been argued that the home literacy environment (HLE) may play an important role in scaffolding early literacy skills². The HLE typically refers to the literacy-related interactions, resources, and attitudes that children experience at home³. Though the quality of the HLE may be estimated through various measures (e.g., title recognition, reading exposure, language input), it is most often assessed using parental self-administered questionnaires^{4,5}. Consistent with a scaffolding role of the HLE for the development of literacy, studies have found that a supportive HLE is associated with both enhanced vocabulary^{4,6,7} and improved reading skills^{4,5,8,9} in children. This has notably led some to hypothesize that the relation between the HLE and children's reading may be mediated by vocabulary^{5,10,11}. In other words, more frequent home literacy activities may improve children's reading efficiency by fostering vocabulary skills (which are an important foundation for word recognition)¹² (see Fig. 1a). This also prompted various organizations to call for greater parent and caregiver involvement in home literacy education^{13,14}.

What are the neural mechanisms supporting the relation between the HLE and literacy development in children? The first line of evidence comes from studies investigating how differences in children's brain structure and function may relate to disparities in family socioeconomic status (SES), an index of family status and position in society (often obtained using measures of parental income, education, or occupation). Indeed, differences in SES are well known to be associated with differences in language input

and literacy environment^{15,16}. Overall, these studies have found that SES is associated with structural and functional differences in brain regions typically associated with literacy. For example, studies have found a positive relation between emergent literacy skills and cortical thickness in left perisylvian regions¹⁷. However, lower SES has been associated with lesser cortical thickness in these regions^{18,19}. Children from disadvantaged families have also less cortical surface area²⁰ in left perisylvian regions than more advantaged peers. Finally, these children have been found to have a weaker specialization of the left inferior frontal gyrus (IFG) during a rhyming task²¹. Thus, there is growing evidence that SES is associated with the structure and function of left perisylvian areas in children, a relation that might be mediated by cognitive precursors to reading acquisition, such as vocabulary²² (see Fig. 1a).

The second line of evidence comes from recent studies that have more directly investigated the relation between HLE and brain development, either using parental questionnaires or home recordings. For instance, home reading exposure and maternal shared reading quality have been associated with white matter integrity²³ and left perisylvian activity during story-listening tasks in preschoolers^{24,25}. Using home audio recordings, studies have also showed that the quality of conversational experience with parents at home is associated with greater surface area²⁶ and structural connectivity²⁷ within the left perisylvian system in children, as well as increased activity in the left IFG during a story-listening task²⁸. Another study employing parental questionnaires has found that structural connectivity of left perisylvian areas is associated with both HLE and vocabulary development²⁹, in line with the idea that both dimensions may interact to account for reading acquisition²². Finally, more supportive HLE has also been

¹Lyon Neuroscience Research Center (CRNL), INSERM U1028 - CNRS UMR5292, University of Lyon, 69500 Bron, France. ✉email: clea.girard@etu.univ-lyon1.fr; jerome.prado@univ-lyon1.fr

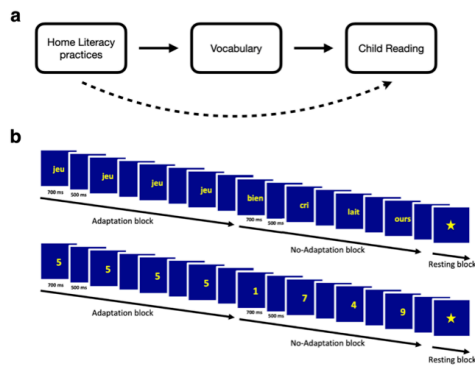


Fig. 1 Model and experimental design. **a** Hypothesized model of the relations between home literacy practices, vocabulary and reading. **b** Experimental task. Participants were sequentially presented with words (top) or digits (bottom) that were identical (adaptation blocks) or different (no-adaptation blocks).

linked to increased activity in the left IFG during a sound matching task in 5-year-olds³⁰. Therefore, in keeping with studies investigating SES, neuroimaging studies that have more explicitly assessed the HLE also suggest that the quality of adult-child literacy interactions at home might affect both structure and function of left perisylvian areas (particularly at the level of the left IFG).

These previous studies, however, only provide indirect evidence that the HLE relates to brain regions associated with word-level reading in children. This is because studies to date have either assessed structural (not functional) properties of the brain of reading children^{26,29} or have only used functional magnetic resonance imaging (fMRI) to measure the brain activity of pre-reading children using auditory tasks that did not involve word recognition^{24,25,28,30}. Thus, although one previous study has assessed the relation between SES and brain regions supporting pseudo-word processing¹⁶, we do not know if the frequency of home literacy practices is associated with fMRI activity during a word recognition task in children. We also do not know whether this relation may be mediated by pre-literacy skills such as vocabulary, as some have hypothesized²².

In the present study, we aimed to test whether fMRI activity in areas supporting word recognition may be related to the HLE of elementary school children. To test this, parents of 8-year-olds completed an extensive questionnaire evaluating the frequency of literacy practices shared with children at home. Children's literacy skills were also assessed using measures of reading fluency and vocabulary. Finally, fMRI activity associated with word recognition was measured using a word adaptation task developed by Perrachione et al.³¹. In this task, participants are passively presented with blocks of visual (written) words that are either identical (adaptation blocks) or different (no-adaptation blocks) (see Fig. 1b). Such fMRI-adaptation paradigms rely on the idea that presenting a given stimulus repeatedly leads to a decrease of fMRI signal in the region that processes this stimulus because firing rates of the neuronal population decrease³². Thus, how sensitive a region is to word processing can be measured by comparing no-adaptation to adaptation blocks, i.e., the so-called neural adaptation effect³¹. Critically, this neural adaptation effect appears to be functionally relevant because it is related to reading skills in adults (i.e., it is smaller in dyslexic readers than in typical readers³¹). To compare our findings to that of Perrachione et al.³¹ (who tested English-speaking adults) and therefore assess task replicability³³, we first identified the network in which a neural adaptation effect was found across the whole brain in our

sample of French-speaking children. To increase statistical power³⁴ and provide an unbiased estimate of effect sizes, we then employed a hypothesis-driven approach and measured the word adaptation effect in the exact same regions that were found to exhibit a word adaptation effect in Perrachione et al. in typical readers³¹.

We made five predictions. First, we expected that the frequency of home literacy practices would be associated with both vocabulary and reading fluency skills in children, in line with previous behavioral studies⁵. Second, we anticipated replicating and extending Perrachione et al.'s findings by showing word adaptation effects in the regions that were identified in that previous study using the same task in French-speaking children. These were our regions of interest (ROIs). Third, we expected that more frequent home literacy practices would also be associated with greater neural adaptation to words (i.e., a larger difference in fMRI activity between no-adaptation and adaptation blocks) in at least some of the ROIs, reflecting a relation between HLE and fMRI activity associated with word recognition. Fourth, in line with the model shown in Fig. 1a, we hypothesized that the relation between HLE and both reading fluency skills and word adaptation would be mediated by children's vocabulary skills. Fifth, we expected that none of the above effects would be observed in a control adaptation task in which words were replaced by other types of stimuli. Therefore, we also presented participants with a control adaptation task in which words were replaced by Arabic digits (see Fig. 1b). This allowed us to test whether any of our effects were specific to words (as compared to any kind of symbolic information), thereby also controlling for general perceptual adaptation. Indeed, processing symbolic numbers involves parietal mechanisms that support quantity processing to a much greater extent than the brain circuits of reading³⁵.

RESULTS

Samples

Demographic information about children and parents can be found in Table 1 and Methods. The behavioral sample consisted of 66 French-speaking children from age 7.52 to 9.22 (mean = 8.46), while the fMRI sample consisted of 44 of these participants (age range = 8.02–9.14; mean = 8.49). SES ranged from relatively low to relatively high in both samples (see Table 1 and Methods for details). Age-normalized scores for reading fluency and vocabulary skills (assessed using the Alouette-R test³⁶ and the "vocabulaire" subtest of the NEMI-2 test³⁷, see Methods) were in the normal to superior range in both samples. IQ was also in the normal to the superior range. Parental reading scores were in the normal range (see Table 1). The subset of children in the fMRI sample did not differ from children in the behavioral sample in terms of demographics and scores (all p 's > 0.27).

Behavioral results

Figure 2 shows the frequency of the different home literacy practices reported by parents across items in our questionnaire (parents indicated the frequency of each practice on a six-point rating scale, see Methods). Practices were categorized according to whether they were informal or formal as well as basic or advanced, in line with the previous literature on the HLE^{5,38}. As can be seen on Fig. 2, there was large individual variability in the reported frequencies of home literacy practices. Frequencies were then averaged across items within each category to gather separate scores of informal, formal basic, and formal advanced practices. Between parents, average responses on the rating scale ranged from 1 to 3.75 for practices that were considered informal ($M = 2.080$, $SD = 0.548$), from 0.5 to 4 for practices that were considered formal but basic for the child's age ($M = 2.140$, $SD = 0.876$), and from 0.670 to 3.840 for practices that were considered

Table 1. Demographic information and test scores of children and parents.

Measure	Behavioral sample (<i>n</i> = 66)				fMRI sample (<i>n</i> = 44)			
	Children		Parents		Children		Parents	
	Mean (SD) or <i>n</i>	Range	Mean (SD) or <i>n</i>	Range	Mean (SD) or <i>n</i>	Range	Mean (SD) or <i>n</i>	Range
Age (years) ^a	8.46 (0.36)	7.52–9.22	39.53 (4.95)	29–51	8.49 (0.33)	8.02–9.14	39.25 (4.78)	32–51
Sex (female)	<i>n</i> = 20	–	<i>n</i> = 59	–	<i>n</i> = 13	–	<i>n</i> = 39	–
Child grade (second grade) ^b	<i>n</i> = 20	–	–	–	<i>n</i> = 12	–	–	–
Parental education ^c	–	–	3.05 (2.36)	–7–8	–	–	3.41 (2.17)	–1–8
primary	–	–	<i>n</i> = 1	–	–	–	<i>n</i> = 0	–
secondary	–	–	<i>n</i> = 8	–	–	–	<i>n</i> = 6	–
undergraduate	–	–	<i>n</i> = 33	–	–	–	<i>n</i> = 20	–
master or higher	–	–	<i>n</i> = 24	–	–	–	<i>n</i> = 17	–
Monthly income ^d	–	–	1727 (1078)	500–5500	–	–	1659 (1098)	500–5500
€0–1000	–	–	<i>n</i> = 18	–	–	–	<i>n</i> = 14	–
€1000–2000	–	–	<i>n</i> = 25	–	–	–	<i>n</i> = 15	–
€2000–3000	–	–	<i>n</i> = 16	–	–	–	<i>n</i> = 11	–
€3000–4000	–	–	<i>n</i> = 5	–	–	–	<i>n</i> = 3	–
€4000–5000	–	–	<i>n</i> = 1	–	–	–	<i>n</i> = 0	–
€5000–6000	–	–	<i>n</i> = 1	–	–	–	<i>n</i> = 1	–
Reading accuracy ^e	105 (8)	86–120	96 (15)	40–115	106 (8)	86–120	95 (16)	40–115
Reading speed ^e	112 (16)	81–155	107 (13)	74–157	114 (17)	81–155	106 (13)	74–147
Vocabulary ^f	9 (2)	4–14	–	–	10 (2)	6–14	–	–
IQ composite ^e	112 (11)	83–135	–	–	113 (12)	83–135	–	–

There was no difference between the behavioral and the fMRI samples in terms of demographics or performance (all *p*'s > 0.27).
^aAll children were 8 years of age, except for one who was younger (7.51) and three who were slightly older (9.06 to 9.22) at the time of testing.
^bChildren were either in second or third grade.
^cEducation level was measured using the number of years pre- or post- high school graduation, with high school graduation set at 0.
^dAs a reference, the median monthly income in France is about €1,700 (Robin, 2019).
^eStandard score.
^fScaled score.

formal and relatively advanced ($M = 2.006$, $SD = 0.695$). Correlation analyses indicated that neither education nor income was associated with home literacy practices in the behavioral sample (all *p*'s > 0.19, two-tailed). However, education tended to be associated with both basic and formal advanced home literacy practices in the fMRI sample (basic: $r(64) = -0.259$, $p = 0.090$, two-tailed; advanced: $r(64) = -0.280$, $p = 0.066$, two-tailed). As is standard in the literature on the home learning environment, all further analyses were controlled for parental SES (parental income and education).

We first investigated the relations between overall home literacy practices (a composite measure calculated by summing the frequency of informal, formal basic, and formal advanced practices) and both reading fluency and vocabulary across this entire behavioral sample. Our first hypothesis was only partly supported. In line with expectations, partial correlations controlling for parental income and education indicated a small positive relation between overall frequency of home literacy practices and child vocabulary (partial $r(64) = 0.250$, $p = 0.023$). However, there was no positive relation between overall frequency of home literacy practices and either child reading accuracy (partial $r(64) = 0.148$, $p = 0.126$) or child reading speed (partial $r(64) = 0.121$, $p = 0.174$) (see Fig. 3). Follow-up analyses revealed that the relation between home literacy practices and vocabulary was relatively consistent across all types and complexity of literacy practices (informal: partial $r(64) = 0.187$, $p = 0.070$, basic formal: partial $r(64) = 0.182$, $p = 0.075$; advanced formal: partial $r(64) = 0.240$, $p = 0.028$). Therefore, neuroimaging analyses focus on the composite measure of the overall frequency of literacy practices.

fMRI results

We then turned to neuroimaging data and analyzed adaptation effects measured in the word adaptation task (see Fig. 1b) in the fMRI sample. Critically, this task was used in a previous study by Perrachione et al.³¹ (see their Experiment 2B), who investigated neural adaptation to words in a sample of typical ($n = 23$, standardized reading score = 108.0 ± 6.7 , see Table 1 in Perrachione et al.³¹) and dyslexic ($n = 23$, standardized reading score = 84.2 ± 6.6 , see Table 1 in Perrachione et al.³¹) adult readers. In typical readers, Perrachione et al.³¹ found widespread word adaptation effects in a left-lateralized network, including the temporal (fusiform gyrus, inferior temporal gyrus, superior, and middle temporal gyri), frontal (inferior frontal gyrus, frontal operculum, premotor cortex, and pre-supplementary motor area), and visual (pericalcarine) cortices (see Fig. 3b and Table S5 in Perrachione et al.³¹). In dyslexic readers, word adaptation effects were weaker and centered around the left inferior frontal cortex (with more limited adaptation in the left middle temporal and inferior temporal cortices).

In our sample of French-speaking 8-year-olds, whole-brain analyses (see Methods) showed enhanced word adaptation effects across all participants in a left-lateralized network that was largely similar to that found in typical readers in Perrachione et al.³¹. In our sample, word adaptation effects were also found in the temporal (superior, middle, and inferior temporal gyri), frontal (notably the left triangular and orbital parts of the inferior frontal gyrus), and visual (inferior occipital gyri) cortices (see Fig. 4a and Table 2). There was, however, less extensive activation in the left

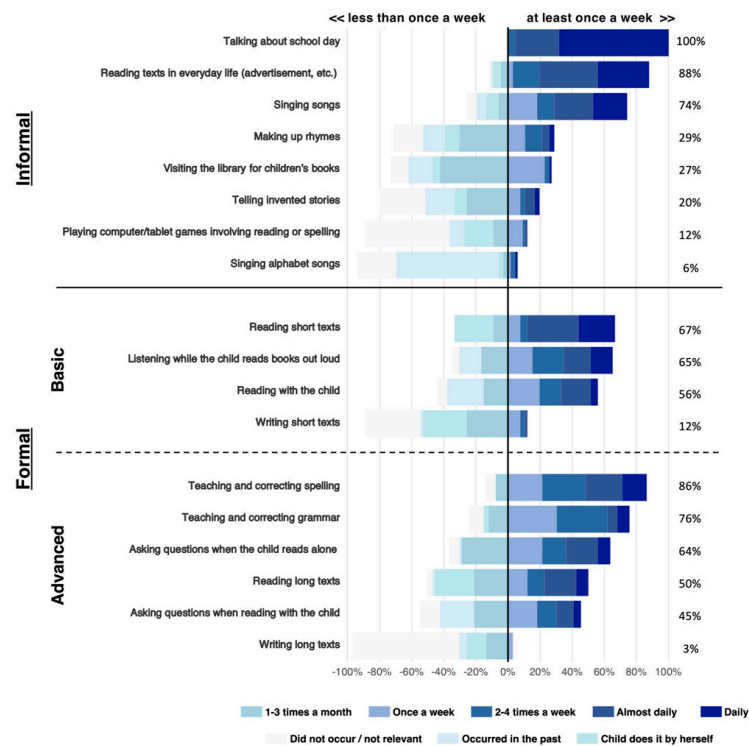


Fig. 2 Divergent stacked bar chart showing the frequencies of informal, basic formal, and advanced formal practices among parents ($n = 66$). Percentages on the right indicate the share of parents who engage in each practice at least once a week. Practices are ordered from the most (top) to the least frequent (bottom) for each level of complexity.

precentral gyrus and left parietal cortex (see Fig. 3b in Perrachione et al.³¹).

Given the similarity between the brain regions showing a word adaptation effect for typical readers in Perrachione et al.³¹ and in our study (see above), we used the activation peaks for typical readers reported in Table 55 of Perrachione et al.³¹ to define regions of interest (ROIs) in the present study (see Methods). Specifically, Perrachione et al. (2016) reported peaks in the left posterior inferior frontal sulcus (pIFs; MNI coordinates: $x = -39$, $y = 11$, $z = 26$), left posterior dorsal superior temporal sulcus (pdSTS; MNI coordinates: $x = -56$, $y = -39$, $z = 6$), left pre-supplementary motor area (pre-SMA; MNI coordinates: $x = -6$, $y = 10$, $z = 52$), left occipital cortex (OC; MNI coordinates: $x = -17$, $y = -76$, $z = 12$), left posterior temporal fusiform gyrus (pTF; MNI coordinates: $x = -38$, $y = -41$, $z = -19$), left Putamen (MNI coordinates: $x = -21$, $y = 7$, $z = 0$), and right Putamen (MNI coordinates: $x = 22$, $y = 12$, $z = -1$) (see Fig. 4b). Note that the pTF corresponds to the anterior part of the visual word form area (VWFA)^{39,40}.

Averaging across all children from the fMRI sample ($n = 44$), word adaptation effects were significant after Bonferroni correction for multiple comparisons in three of these ROIs: the pIFs ($t(43) = 2.698$, $p_{corr} = 0.035$, $d = 0.407$), pdSTS ($t(43) = 3.794$, $p_{corr} = 0.002$, $d = 0.572$), and pTF ($t(43) = 4.613$, $p_{corr} < 0.001$, $d = 0.695$). The word adaptation effect, however, was only partially significant in the putamen (left Putamen: $t(43) = 2.674$, $p_{corr} = 0.037$, $d = 0.403$, right Putamen: $t(43) = 1.912$, $p_{corr} = 0.217$, $d = 0.288$) and was not

significant in the pre-SMA ($t(43) = 1.335$, $p_{corr} = 0.658$, $d = 0.201$) and the OC (word: $t(43) = -3.103$, $p_{corr} > 0.999$, $d = -0.468$) (see Fig. 5a).

We then tested our third prediction that the overall frequency of home literacy practices would be related to word adaptation effects in ROIs. We focused here on the ROIs for which we found significant word adaptation effects across all participants (excluding the putamen as a word adaptation effect was not uniformly found in that ROI). After correcting for multiple comparisons, there was a positive relation between frequency of home literacy practices and word adaptation in the pIFs ($r(42) = 0.322$, $p_{corr} = 0.048$), but not in the pdSTS ($r(42) = 0.052$, $p_{corr} > 0.999$) and pTF ($r(42) = -0.056$, $p_{corr} > 0.999$). The relation between frequency of home literacy practices and word adaptation remained significant in the pIFs after controlling for parental income and education (partial $r(42) = 0.302$, $p = 0.026$) (see Fig. 5b, left).

Finally, our fourth prediction was that the relation between HLE and either reading fluency or word adaptation would be influenced by children's vocabulary skills. Because we did not find a relation between home literacy practices and reading fluency, we focused on word adaptation. First, we tested whether vocabulary was related to word adaptation effects in the pIFs, the only region in which there was a relation between activity and frequency of home literacy practices (see above). Controlling for parental income and education, there was a positive relation between vocabulary and word adaptation in the pIFs (partial $r(42) = 0.317$, $p = 0.020$) (see Fig. 5b, right). Therefore, the frequency of

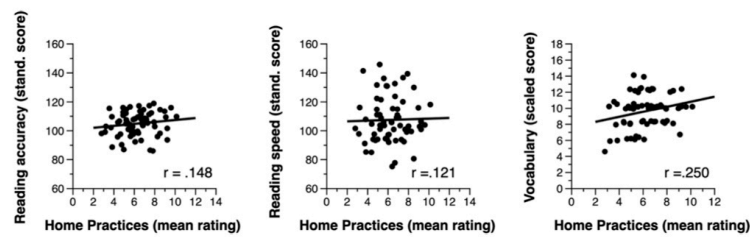


Fig. 3 Behavioral results. Scatterplots of child reading accuracy, reading speed, and vocabulary as a function of the overall frequency of home literacy practices (controlled for parental income and education, $n = 66$).

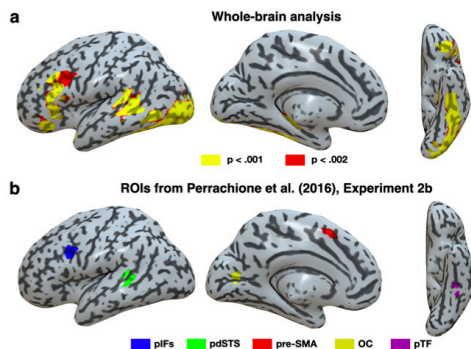


Fig. 4 Whole-brain neural adaptation to words and location of ROIs. **a** Brain regions more activated for no-adaptation than adaptation blocks in the word adaptation task across the whole brain. **b** Location of ROIs on lateral and ventral views of an inflated rendering of the cortical surface and an axial slice of an MNI normalized brain. pIFs left inferior frontal sulcus, pdSTS left posterior dorsal superior temporal sulcus, pre-SMA left pre-supplementary motor area, OC left occipital cortex, pTF left posterior temporal fusiform gyrus.

home literacy practices was related to both vocabulary and word adaptation in the pIFs. Vocabulary was then entered as a potential mediator of the relation between overall frequency of home literacy practices and word adaptation in the pIFs in a mediation analysis (see Methods and Fig. 6). As expected, the total relationship between home literacy practices and word adaptation was significantly positive, even in the fMRI sample (path c, coefficient = 0.063, standard error, or STE = 0.033, 95% CI Lower = 0.011, $p = 0.024$). Also as expected, more frequent home literacy practices were associated with improved vocabulary (path a, coefficient = 0.427, STE = 0.198, 95% CI Lower = 0.063, $p = 0.024$). Improved vocabulary also tended to be associated with larger word adaptation even after controlling for frequency of home literacy practices (path b, coefficient = 0.036, STE = 0.026, 95% CI Lower = -0.003, $p = 0.062$). Critically, the relation between frequency of home literacy practices and word adaptation was significantly mediated by vocabulary (path a*b, coefficient = 0.015, STE = 0.014, 95% CI Lower = 0.001, $p = 0.046$). Finally, the relation between frequency of home literacy practices and word adaptation was no longer significant after accounting for vocabulary (direct effect or path c', coefficient = 0.048, STE = 0.031, 95% CI Lower = -0.001, $p = 0.052$).

Additional analyses

We performed four sets of additional control analyses. First, to evaluate the specificity of our effects for print words, we measured

the relation between adaptation to digits in the ROIs and both home literacy practices and vocabulary. There was no positive relation between digit adaptation and either frequency of home literacy practices or vocabulary in any of the seven ROIs (home literacy practices: all r 's < 0.004, all p 's > 0.493; vocabulary: all r 's < 0.188, all p 's > 0.117), including the pIFs (see Supplementary Fig. 1 and Supplementary Table 1). Figure 7 shows the unthresholded t -maps of the relation between either word or digit adaptation and home literacy practices and vocabulary across the whole brain.

Second, adaptation effects were measured using a passive task. Therefore, it is possible that individual differences in task engagement might influence our results. To test for this possibility, we embedded a target detection task among the stimuli (see Methods). On average, children detected 89% of targets (SD = 15) in the word adaptation task and 89% of targets (SD = 19) in the digit adaptation task. There was no difference in target detection rate between tasks (Wilcoxon rank-sum test: $p = 0.730$). Critically, target detection rates were not correlated with home literacy practices or vocabulary in any of the tasks (word adaptation: all r hos < -0.045, all p 's > 0.615; digit adaptation: all r hos < 0.114, all p 's > 0.231).

Third, although it has been hypothesized that home literacy practices are related to children's reading through improved vocabulary, it is also possible that parents engage in more frequent literacy practices at home because they perceive that their child is skilled in reading (which may result in both improved vocabulary and enhanced brain sensitivity to print words). To tease apart these possibilities, we asked parents to indicate their perception of their child's reading skill. This parental estimate was positively correlated with both reading accuracy ($r(64) = 0.386$, $p < 0.001$) and reading speed ($r(64) = 0.534$, $p < 0.001$), though it was not positively correlated with vocabulary ($r(64) = 0.124$, $p = 0.161$). However, this parental perception of reading skills was not correlated with home literacy practices (controlling for parental income and education, partial $r(64) = 0.025$, $p = 0.421$) or word adaptation in the pIFs (controlling for parental income and education, partial $r(42) = 0.115$, $p = 0.229$). When controlling for this parental estimate of child's reading skill, literacy practices remained related to vocabulary (controlling for parental income and education, partial $r(64) = 0.249$, $p = 0.022$) and word adaptation in the pIFs (controlling for parental income and education, partial $r(42) = 0.302$, $p = 0.023$).

Finally, associations between literacy practices and children's skills may also result (at least to some extent) from genetic predispositions to high academic achievement that parents may pass on to children. For instance, skilled parents might maintain relatively high-quality literacy environments⁴¹. Following Hart, Little, and Bergen⁴², we attempted to control for this effect by measuring parental reading fluency as a genetic proxy for predisposition to literacy skill. Critically, the relation between literacy practices and vocabulary remained significant after controlling for parent reading accuracy and reading speed

Anatomical Location	Cluster size (mm ³)	MNI coordinates			t-score
		X	Y	Z	
Left occipital cortex	7224	-22	-98	-4	6.03
Left inferior temporal gyrus	-	-46	-46	-15	5.35
Left inferior occipital cortex	-	-38	-86	-8	5.31
Left inferior frontal gyrus pars orbitalis	1246	-36	32	-8	4.65
Left inferior frontal gyrus pars orbitalis	-	-42	28	-15	4.18
Left inferior frontal gyrus pars orbitalis	-	-26	30	-12	3.44
Left inferior frontal gyrus pars triangularis	840	-52	26	16	4.61
Left superior temporal gyrus	938	-58	-40	6	4.50
Left middle temporal gyrus	-	-62	-48	6	4.43

MNI Montreal neurological institute.

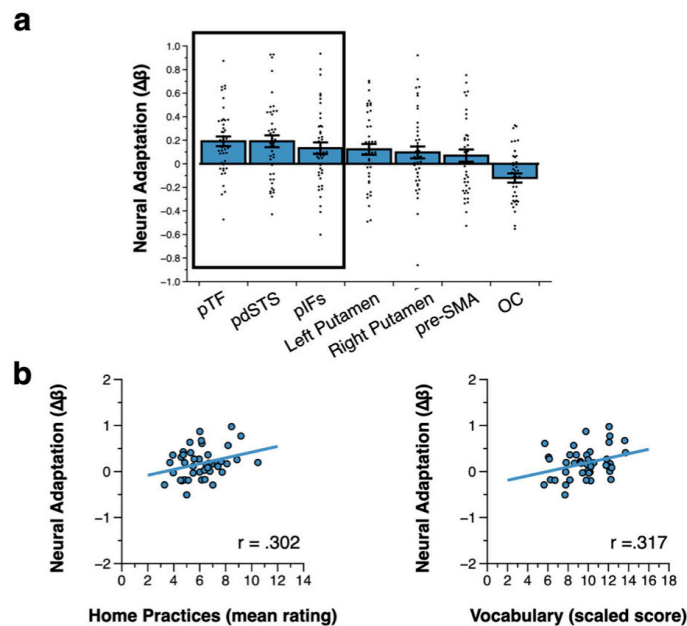


Fig. 5 Neural adaptation to words ($n = 44$). **a** Average neural adaptation to words in the ROIs, ranked by effect size. The dark outline shows the brain regions for which word adaptation was significant after correction for multiple comparisons (excluding the left putamen, see text). Error bars represent the standard error of the mean (SEM). Each dot represents a participant. **b** Scatterplots of neural adaptation to words in the pIFs as a function of the overall frequency of home literacy practices (left) and child vocabulary (right). Analyses were controlled for parental income and education.

(also controlling for parental income and education, partial $r(64) = 0.248$, $p = 0.022$).

DISCUSSION

Studies indicate large variations in the home literacy environment of children. Although these variations have been shown to relate to children's reading skills, the relation between home literacy practices and brain activity underlying word-level reading remains unknown. The main goal of this study was to assess whether home literacy practices are associated with activity in brain

regions supporting word recognition in 8-year-olds. We also aimed to test whether the relation between home literacy practices and activity associated with word recognition may be influenced by children's vocabulary, as suggested by previous studies^{22,29}.

First, based on prior literature, we predicted that the frequency of home literacy practices would be positively related to both children's reading fluency and vocabulary skills. This hypothesis was only partially supported. We did find a relation between more frequent parental practices and enhanced children's vocabulary, in keeping with a long line of previous studies on the HLE^{4,6,43}.

However, there was no significant relation between home literacy practices and any of our measures of reading fluency (accuracy or speed). Although this may be surprising given multiple reports of such a relation in the literature^{5,8}, we could think of at least two reasons why we failed to find this association here. A first possibility is that the reading fluency test we used³⁶ might have lacked sensitivity to discriminate between the reading fluency of our participants. Indeed, the Alouette test was initially designed to screen for dyslexia among children based on phonological-recoding skills⁴⁴, which are early precursors of decoding skills. However, all of our participants were typical readers and it is possible that this 3-min test might not have been sensitive enough to capture variance within this population. A second possible reason is that the influence of the home environment on reading fluency skills may vary depending on children's age^{1,45}. Our participants were 8-year-olds who were already relatively efficient readers. For example, it is possible that individual differences in the reading fluency of these children might have been better captured by a reading comprehension task⁴⁶. Note that we also did not find a relation between the frequency of home literacy practices and SES. Although this is inconsistent with several previous studies^{15,16}, it is possible that this lack of relation might be due to the relatively high concentration of children from middle to high SES families in our sample.

Second, we assessed the replicability of our task by evaluating whether word adaptation effects would be found across participants in the same regions reported by Perrachione et al.³¹, who used the same task in a different population (adults) and language (English). Both whole-brain and ROI analyses

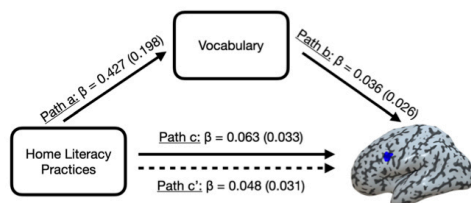


Fig. 6 Mediation analysis ($n = 44$). The relation between home literacy practices and word adaptation in the pIFs was influenced by vocabulary (see main text). The solid line from home literacy practices to word adaptation in the pIFs represents the total effect (Path c). The dotted line represents the direct effect (Path c'). The analysis was controlled for parental income and education.

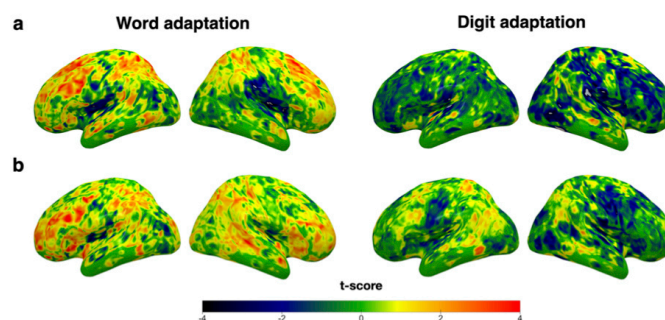


Fig. 7 Unthresholded maps of t values showing the relations between neural adaptation, home literacy practices, and child vocabulary across the whole brain ($n = 44$). **a** Lateral views of the left and right hemispheres showing regions in which neural adaptation to words (left) and digits (right) increased with the overall frequency of home literacy practices. **b** Lateral views of the left and right hemispheres showing regions in which word adaptation (left) and digit adaptation (right) increased with child vocabulary.

showed that we largely replicated Perrachione et al.'s findings³¹. That is, word adaptation effects were found in a left-lateralized brain network that encompassed the inferior frontal, temporal, and occipital cortices. Not only are these regions located in the classic reading brain network^{47,48}, these findings suggest that the task robustly assesses neural adaptation to print words in both French and English and generalizes across two different samples. This is significant given recent concerns about the reliability and replicability of fMRI studies⁴⁹.

Third, we predicted that home literacy practices would be associated with activity in brain regions supporting word recognition. Somewhat surprisingly, we did not find any relation between home literacy practices and brain regions associated with visual processing, including the VWFA that has been shown to be specialized for letter strings⁵⁰. Because this region develops during the first years of reading acquisition in children⁵¹, it is possible that VWFA activity during word recognition might be influenced by home literacy practices in younger children. In any case, our results suggest that home literacy practices may not strongly influence the visual processing of words in 8-year-olds. However, we found that home literacy practices were associated to word adaptation in the left pIFs in our sample of 8-year-olds. In other words, children benefiting from a higher quality home literacy environment had heightened sensitivity to the repetition of print words in an area located in the dorsal and posterior part of the left inferior frontal gyrus (IFG). This area, together with the larger adjacent left IFG pars triangularis, has consistently been associated with reading in both adults and children, as shown in a meta-analysis of studies involving reading or reading-related tasks with visual word, nonword, or letter string stimuli⁵⁰. The specific role of this region - and of the larger anterior reading circuit—during reading remains unclear and may involve both phonological and semantic processing^{52,53}. Nonetheless, there is evidence that reading skills are positively correlated with activity associated with print words in the pars triangularis in a sample of children from third and fourth grade⁵⁴. Interestingly, several studies have previously found associations between the home literacy environment and the structure and function of the left IFG more broadly^{21,25,28,30}. However, to our knowledge, none of these studies have directly measured activity associated with word-level reading in this region. Therefore, our study provides the first evidence that disparities in children's home literacy environment may relate to functional differences in how the dorsal part of the left IFG processes words.

Fourth, based on prior literature^{22,29} we aimed to assess whether vocabulary may mediate the relation between home literacy practices and activity associated with word recognition.

Not only did we find an association between children's vocabulary skills and word adaptation in the left pIFs, our results indicate that the relation between home literacy practices and word adaptation in the left pIFs was mediated by children's vocabulary. This is consistent with a model positing that children's vocabulary skills mediate the relation between home literacy environment and mechanisms supporting word-level reading (see Fig. 1a). This is also consistent with previous behavioral studies showing that HLE effects on literacy outcomes may be mediated by earlier precursor skills, most notably vocabulary^{3,29,55}. Overall, these findings support the general idea that the relation between the home environment and the brain mechanisms supporting reading in children is influenced by cognitive precursors to reading, such as vocabulary²² (see Fig. 1a).

Fifth, we anticipated that the relations between home literacy practices and neural adaptation would not be specific to words. Therefore, we also presented participants with an adaptation task in which words were replaced by Arabic numerals. We did not find any significant relation between home literacy practices and digit adaptation in any of our ROIs. There was also no significant relation between vocabulary and digit adaptation in the ROIs. Therefore, our effects cannot be easily explained by low-level perceptual adaptation effects or adaptation effects involving domain-general symbolic processing.

Finally, it is important to consider some limitations of this study. For example, our cross-sectional design does not allow us to formally test causal claims in Fig. 1a. Specifically, the relations that we observed are in line with this model. However, there may be other models that are compatible with our findings (e.g., the frequency of home literacy practices may increase in response to children's reading skills). Our measure of the HLE also relies on a questionnaire. Not only may questionnaires be associated with a recall bias (i.e., parents may inaccurately or incompletely remember events that happened in the past), they might also be associated with a social desirability bias (i.e., parents may have reported more frequent literacy practices in an effort to avoid embarrassment and project a more favorable image to the experimenters)⁵⁶. Finally, our study is restricted in terms of sample size, age range investigated, and reading task. Clearly, reading encompasses much more than word recognition and it is unclear to what extent our findings may apply to other age groups (e.g., home literacy practices may change with age) as well as to the relation between home literacy practices and brain mechanisms underlying reading comprehension or other higher-level reading processes.

We attempted to minimize these limitations in several ways. For instance, although our study is fundamentally correlational, the model we test here is based on extensive prior research on the HLE^{5,11,22,29}. We also attempted to control for other plausible interpretations by gathering information about parental skills and perception of children's reading skill (see Additional analyses). Even though recall and social desirability biases may still be present, we attempted to limit these biases by asking parents to report information about a very wide range of home activities and expectations (e.g., math, sport, music). Although our sample size is similar to that of previous studies that explored associations between home literacy practices and the reading network in the brain^{26,28}, we adopted ROI analyses to maximize power³⁴ (though a drawback of this approach is that it leaves open the possibility than other meaningful relations may be observed elsewhere in the brain). Notwithstanding these attempts to address limitations, it is clear that our results need to be substantiated by interventional studies in order to test the causal claims suggested here, as well as by future neuroimaging studies investigating the relation between home literacy practices and the reading brain in younger children and different tasks.

To conclude, we found that home literacy practices are associated with brain mechanisms supporting word recognition

in 8-year-olds, in line with the idea that experiences beyond the classroom may influence brain regions supporting reading and learning⁵⁷. Our results also support a model suggesting that home literacy practices may affect children's reading through precursors skills such as vocabulary^{10,11}. Nonetheless, our study was cross-sectional and the effects found were relatively small in size. Therefore, it calls for future longitudinal and interventional studies investigating how home literacy practices in younger children shape the development of the brain networks supporting reading.

METHODS

Participants

Seventy-three right-handed children from second and third grade and one of their parents were recruited through flyers sent to schools and advertisements on social media. The experiment involved two sessions. In the first session, parents and children completed tests and questionnaires in the lab. In the second session, children completed the experimental tasks in the scanner. Seven children were excluded from analyses of the first session because they (1) were seeing a speech-language pathologist on a regular basis ($n = 3$), (2) had an intelligence quotient (IQ) lower than the 25th percentile ($n = 2$), (3) had a delay in speech and language acquisition ($n = 1$), and (4) were diagnosed with attention deficit disorder ($n = 1$). Therefore, 66 children were included in the behavioral sample. Out of the 58 children who participated the second (i.e., fMRI) session, 14 were excluded from the fMRI analyses because of incomplete data acquisition ($n = 7$) or excessive motion in the scanner ($n = 7$) (see criteria below). Therefore, our fMRI sample consisted of 44 children who had at least one run of data analyzable in both the word and digit adaptation tasks.

Children had a full-scale IQ comprised between 83 and 135 (mean = 112, standard deviation [SD] = 11), as measured by the NEMI-2 test³⁷. A previous study⁵⁸ explored the relation between brain activity and home numeracy practices in the same sample of participants. Demographic information about children and parents can be found in Table 2. All children and parents were native French speakers. Eighty-nine percent of the parents were mothers. Parental income ranged from less than €6000 to more than €60,000 per year (the median annual income in France is about €20,400⁵⁹). Fourteen percent of parents reported only having a secondary degree, 50% reported having an undergraduate degree, and 36% a master's degree or higher. One parent did not go to high school. Therefore, SES ranged from relatively low to relatively high. Parents gave written informed consent and children gave their assent to participate in the study. The study was approved by a French ethics committee (Comité de Protection des Personnes Sud-Est 2). Families were paid 80 euros for their participation.

Justification of fMRI sample size

The relation between children's literacy skills and home literacy practices typically ranges between $r = 0.40$ to $r = 0.60$ ^{30,60}. This range is in line with two previous studies that investigated the relation between home literacy practices and language-related (phonological processing and story listening) brain activity in young children. Specifically, Powers et al.³⁰ and Romeo et al.²⁸ ($n = 36$) found effect sizes of this relation ranging from $r = 0.40$ and $r = 0.58$ (see Table 5 in Powers et al.³⁰ and openly available dataset in Romeo et al.²⁸). Considering these estimates, power analyses using G*Power version 3.1⁶¹ indicate that our final fMRI sample size of $n = 44$ would provide at least 88% power to detect correlations between home literacy practices and reading-related activity in the expected direction ($\alpha = 0.05$, one-tailed). Because the present study also aims at investigating whether reading-related brain activity mediates the relation between home literacy practices and literacy skills, we performed a power analysis of such a mediation using the exact parameters reported by Romeo et al.²⁸ in their mediation analysis involving language-related brain activity, conversational turns, and literacy skills. Monte Carlo simulations implemented in the online tool developed by Schoemann, Boulton, and Short⁶² (https://schoemanna.shinyapps.io/mc_power_med/) indicated a power of 86% to detect an influence of the mediator (i.e., brain activity) on the relation between the predictor (i.e., home literacy practices) and the outcome (i.e., literacy skills) based on Romeo et al.'s estimates (1000 iterations, 95% Confidence level). Overall, although it is important to note that this effect size is likely inflated because of publication bias⁶³, our final fMRI sample size appears to be adequately powered to detect the hypothesized relations.

Assessment of child and parent literacy skills

Children's reading and vocabulary skills were assessed using the Alouette-R test³⁶ and the "vocabulaire" subtest of the NEMI-2³⁷. The Alouette-R test is a standardized test that is frequently used to test reading skills in French-speaking countries. This test requires participants to read a 265-word text aloud in 3 min. The number of words read and the number of pronunciation errors are used to calculate indices of reading speed and reading accuracy, respectively. The test has notably been shown to be a sensitive and specific screening tool detecting individuals with reading difficulties⁴⁴. The NEMI-2 is a standardized IQ test that is similar to the Stanford-Binet Intelligence Scales. It uses measures of verbal intelligence (i.e., "general knowledge", "vocabulary", and "comparison" subtests) and matrix reasoning (i.e., "Raven's matrices" subtest) to provide a composite IQ score that is highly correlated ($r = 0.80$) with the WISC score³⁷. The "vocabulaire" subtest of the NEMI-2 requires children to define up to 27 words that decrease in frequency. The subtest is untimed and is stopped after three consecutive errors. Age-normalized reading and vocabulary scores are presented in Table 2. Parental reading skills were also tested using the Alouette-R test.

Parental questionnaire

The frequency of home literacy practices was assessed using an electronic questionnaire given to parents on a tablet. After providing information about SES, parents were asked how often they engaged in home literacy activities with their children. Questions also concerned practices involving other academic and non-academic domains (e.g., math, music, biology). These questions, which helped reduce the focus on literacy practices, are considered fillers in the present study (items about math practices are analyzed in Girard et al.⁵⁸). Practices were adapted from the questionnaire used by Skwarchuk and colleagues³⁹. Using a six-point rating scale (Did not occur/Activity is not relevant to my child, 1–3 times per month, Once per week, 2–4 times per week, almost daily, daily), parents rated the frequency with which they engaged in that practice with their child at home during the past month. Parents also had the option to indicate whether the practice occurred in the past but no longer at the time of testing (rated 1 point) and whether the child engaged in the practice at home but on her own (also rated 1 point).

Among the 77 questions, 18 concerned home literacy practices. These included a mixture of informal and formal practices (Fig. 2). As defined in Sénéchal and LeFevre (p. 1552⁵), "informal literacy experiences are those where the print is present but is not the focus of the parent-child interaction. In contrast, formal literacy activities are those where the attention is on the print itself". Formal practices were of varying difficulty, encompassing both basic or more advanced activities for an 8-year-old child. For example, listening when children read out loud was considered relatively basic but asking questions when children read was considered more advanced. Because some advanced activities were inherently related to more basic activities (e.g., reading/writing short texts and reading/writing long texts), those advanced items were presented to parents only if they stated that the corresponding more basic activity had occurred at home. This was done to avoid parents having to repeatedly say no to an activity they had never engaged in). Ratings associated with frequencies of home literacy practices are shown in Fig. 2. Frequencies of activities were averaged across items within each category to gather separate scores of informal, formal basic, and formal advanced practices. We also used a composite score, corresponding to the sum of these three subscores. Finally, parents were asked to provide a subjective estimate of their child's skills in reading (and other domains) using a six-point rating scale (i.e., Not sure, Severe difficulty, Difficulty, Average skills, Good skills, Very good skills).

Experimental tasks

We adapted from Experiment 2B of Perrachione et al.³¹ a task in which a series of words were passively presented in blocks at the center of the screen (see Fig. 1b). As in Perrachione et al.³¹, words were monosyllabic nouns of three to five letters in length (mode = 4). The only difference between our task and that of Perrachione et al.³¹ was that our stimuli were in French instead of English. Words were thematically varied and equated for frequency using the CHACQFAM database in <http://www.lexique.org/shiny/openlexicon/>. In another version of the task that served as a control in the present study, words were replaced by Arabic digits ranging from 1 to 8. Word and digit adaptation tasks were each composed of two runs. In each of these runs, participants were presented with adaptation and

no-adaptation blocks. Adaptation blocks consisted of the repetition of the same stimulus (word or digit) eight times. No-adaptation blocks consisted of the presentation of eight different stimuli. Another task involving dot arrays was included in the scanning session but is not analyzed here.

fMRI data acquisition

Images were collected using a Siemens Prisma 3 T MRI scanner with a transmit body coil and a 64-channel receiver head-neck coil (Siemens Healthcare, Erlangen, Germany) at the CERMEP Imagerie du vivant in Lyon, France. The BOLD signal was measured with a susceptibility-weighted single-shot EPI sequence. Imaging parameters were as follows: TR = 2000 ms, TE = 24 ms, flip angle = 80°, matrix size = 128 × 120, field of view = 220 × 206 mm, slice thickness = 3 mm (0.48 mm gap), number of slices = 32. A high-resolution T1-weighted whole-brain anatomical volume was also collected for each participant. Parameters were as follows: TR = 3500 ms, TE = 2.24 ms, flip angle = 8°, matrix size = 256 × 256, field of view = 224 × 224 mm, slice thickness = 0.9 mm, number of slices = 192.

Experimental timeline

The experimental timeline, which was directly taken from Perrachione et al.³¹, was identical in both the word and digit adaptation task. In each block, stimuli remained on the screen for 700 ms, with a 500 ms inter-stimulus interval (for a total block duration of 9.6 s). Ten adaptation blocks and ten no-adaptation blocks were presented along with ten blocks of visual fixation (duration = 9.6 s) in each run. Block presentation was pseudo-randomized such that two blocks of the same type could not follow each other. Finally, ten target stimuli (a picture of a rocket) randomly appeared in each run (outside of blocks). Participants were asked to press a button every time this target appeared.

fMRI data preprocessing

Images were analyzed with SPM12 (Wellcome Department of Cognitive Neurology, London, UK). The first four images of each run were discarded to allow for T1 equilibration effects. Functional images were corrected for slice acquisition delays and spatially realigned to the first image of the first run to correct for head movements. Realigned images were smoothed with a Gaussian filter (4 mm × 4 mm × 7 mm full-width at half maximum). Using ArtRepair (<https://cibsr.stanford.edu/tools/human-brain-project/artrepair-software.html>), functional volumes with a global mean intensity greater than three standard deviations from the average of the run or a volume-to-volume motion greater than 2 mm were identified as outliers and substituted by the interpolation of the two nearest non-repaired volumes²⁸. Participants with outliers in more than 20% of volumes were excluded from the analyses ($n = 7$). After outlier exclusion, the movement range was on average 0.01 (SD = 0.04), 0.17 (SD = 0.30), and 0.18 (SD = 0.64) mm in the x, y, and z direction, with 0.27 (SD = 0.87), 0.37 (SD = 1.17), 0.45 (SD = 1.46) degrees of roll, pitch, and yaw.

Finally, functional images were normalized into the same stereotaxic space. Studies have found that anatomical differences between children older than 7–8-year-olds and adults are small enough that they are beyond the resolution of fMRI experiments^{64,65}. Therefore, considering the age of our participants, the resolution of our data, and the fact that we wanted to be able to compare our results to that from Perrachione et al.³¹ with adult participants, we normalized all individual brains into the standard adult Montreal Neurological Institute (MNI) space. This was done in two steps. First, after coregistration with the functional data, the structural image was segmented into gray matter, white matter, and cerebrospinal fluid by using a unified segmentation algorithm⁶⁶. Second, the functional data were normalized to the MNI space by using the normalization parameters estimated during unified segmentation (normalized voxel size, 2 mm³ × 2 mm³ × 3.5 mm³).

fMRI data analysis

Statistical analysis of fMRI data was performed according to the GLM. Brain activity associated with periods of adaptation and no-adaptation was modeled as epochs with onsets time-locked to the beginning of each block and a duration of 9.6 s. All epochs were convolved with a canonical hemodynamic response function. The time-series data were high-pass filtered (1/128 Hz), and serial correlations were corrected using an autoregressive AR(1) model.

For each participant, the word adaptation effect was identified by subtracting activity associated with adaptation blocks from activity associated with no-adaptation blocks. Individual contrasts were then

submitted to one-sample *t*-tests across all participants. First, we used a whole-brain voxelwise approach to evaluate whether the overall brain network involved in word adaptation was similar to that found in Perrachione et al.³¹. An FDR-corrected cluster-level threshold of $p < 0.05$ (defined using voxel-level thresholds of $p < 0.001$ and $p < 0.002$) was applied to the whole-brain statistical map to assess brain activations. Second, we used an a priori region of interest (ROI) approach to measure activity in the seven brain regions that showed a word adaptation effect (i.e., lower activity in adaptation than no-adaptation blocks of the word adaptation task) in normal adults in Perrachione et al.³¹ (see Fig. 3). All ROIs were 6-mm radius spheres centered on coordinates reported in Table S5 for Experiment 2B of Perrachione et al.³¹. We tested for the presence of a word adaptation effect in each ROI using a series of one-sample *t*-tests. *P* values were Bonferroni-corrected for multiple comparison. In ROIs for which there was a significant word adaptation effect, the neural adaptation effect was then correlated with the frequency of home literacy practices. Mediation analyses were then performed to test whether, in regions for which there was a relation between home literacy practices and word adaptation, there was a mediating effect of vocabulary. These analyses were performed using the M3 toolbox in Matlab (<https://github.com/canlab/MediationToolbox>⁶²). Briefly, a mediation estimates the degree to which a variable (e.g., M) can explain the relation between two other variables (e.g., X and Y). Here, X was defined as the frequency of home literacy practices, Y was defined as the word adaptation effect, M was defined as vocabulary. Path a reflected the relation between home literacy practices and vocabulary. Path b reflected the relation between vocabulary and word adaptation, controlling for home literacy practices. The total relationship between frequency of home literacy practices and word adaptation (including direct and indirect effects) is reflected in path c, while the direct effect of the relationship between frequency of home literacy practices and word adaptation (controlling for vocabulary) is reflected in path c'. Finally, the significance of the mediator was tested in the product $a \times b^{67-69}$. A bias-corrected bootstrap test over 10,000 iterations was used to measure the statistical significance of the mediator. Mediation analyses systematically included as covariates parental education and income to control for differences in SES between children.

Because our hypotheses were directional (i.e., we only anticipated lesser activity in adaptation than no-adaptation blocks, as well as increases in either literacy skills or neural adaptation effects as a function of home literacy practices), *p* values for behavioral and fMRI results are one-sided (unless otherwise noted). Accordingly, only 95% lower bound confidence intervals (95% CI Lower) are reported.

Reporting Summary

Further information on research design is available in the [Nature Research Reporting Summary](#) linked to this article.

DATA AVAILABILITY

The task, electronic version of the questionnaire (in French), behavioral data, and individual MRI data are available from Zenodo (<https://doi.org/10.5281/zenodo.5112814>). The ROI images and the whole-brain unthresholded *p*-maps corresponding to Fig. 4a and Fig. 7 are available from NeuroVault (<https://identifiers.org/neurovault.collection:9453>).

CODE AVAILABILITY

The Matlab scripts used to analyze fMRI data are available from GitHub (<https://github.com/BBL-lab/BBL-batch-system>). The M3 toolbox is also available from GitHub (<https://github.com/canlab/MediationToolbox>).

Received: 25 February 2021; Accepted: 29 October 2021;

Published online: 03 December 2021

REFERENCES

- Storch, S. A. & Whitehurst, G. J. Oral language and code-related precursors to reading: evidence from a longitudinal structural model. *Dev. Psychol.* **38**, 934 (2002).
- Janus, M. & Duku, E. The school entry gap: socioeconomic, family, and health factors associated with children's school readiness to learn. *Early Educ. Dev.* **18**, 375–403 (2007).
- Hamilton, L. G., Hayiou-Thomas, M. E., Hulme, C. & Snowling, M. J. The home literacy environment as a predictor of the early literacy development of children at family-risk of dyslexia. *Sci. Stud. Read.* **20**, 401–419 (2016).
- Sénéchal, M. Testing the home literacy model: parent involvement in kindergarten is differentially related to grade 4 reading comprehension, fluency, spelling, and reading for pleasure. *Sci. Stud. Read.* **10**, 59–87 (2006).
- Sénéchal, M. & LeFevre, J.-A. Continuity and change in the home literacy environment as predictors of growth in vocabulary and reading. *Child Dev.* **85**, 1552–1568 (2014).
- Pan, B. A., Rowe, M. L., Singer, J. D. & Snow, C. E. Maternal correlates of growth in toddler vocabulary production in low-income families. *Child Dev.* **76**, 763–782 (2005).
- Weizman, Z. O. & Snow, C. E. Lexical input as related to children's vocabulary acquisition: effects of sophisticated exposure and support for meaning. *Dev. Psychol.* **37**, 265–279 (2001).
- Molfese, V. J., Modglin, A. & Molfese, D. L. The role of environment in the development of reading skills: a longitudinal study of preschool and school-age measures. *J. Learn. Disabil.* **36**, 59–67 (2003).
- Sénéchal, M. & Young, L. The effect of family literacy interventions on children's acquisition of reading from kindergarten to grade 3: a meta-analytic review. *Rev. Educ. Res.* **78**, 880–907 (2008).
- Hood, M., Conlon, E. & Andrews, G. Preschool home literacy practices and children's literacy development: a longitudinal analysis. *J. Educ. Psychol.* **100**, 252–271 (2008).
- Relyea, J. E., Zhang, J., Liu, Y. & Wui, M. G. L. Contribution of home language and literacy environment to English reading comprehension for emergent bilinguals: sequential mediation model analyses. *Read. Res. Q.* **55**, 473–492 (2020).
- Ouellette, G. & Beers, A. A not-so-simple view of reading: How oral vocabulary and visual-word recognition complicate the story. *Read. Writ.* **23**, 189–208 (2010).
- Council on Early Childhood, High, P. C. & Klass, P. Literacy promotion: an essential component of primary care pediatric practice. *Pediatrics* **134**, 404–409 (2014).
- World Health Organization. *Guidelines on Physical Activity, Sedentary Behaviour and Sleep for Children Under 5 Years of Age: Web Annex: Evidence Profiles* (WHO, 2019).
- Hoff, E. How social contexts support and shape language development. *Dev. Rev.* **26**, 55–88 (2006).
- Noble, K. G., Wolmetz, M. E., Ochs, L. G., Farah, M. J. & McCandliss, B. D. Brain-behavior relationships in reading acquisition are modulated by socioeconomic factors. *Dev. Sci.* **9**, 642–654 (2006).
- Hutton, J. S. et al. Validation of the reading house and association with cortical thickness. *Pediatrics* **147**, e20201641 (2021).
- Jednoróg, K. et al. The influence of socioeconomic status on children's brain structure. *PLoS ONE* **7**, e42486 (2012).
- Mackey, A. P. et al. Neuroanatomical correlates of the income-achievement gap. *Psychol. Sci.* **26**, 925–933 (2015).
- Noble, K. G. et al. Socioeconomic disparities in neurocognitive development in the first two years of life. *Dev. Psychobiol.* **57**, 535–551 (2015).
- Raizada, R. D. S., Richards, T. L., Meltzoff, A. & Kuhl, P. K. Socioeconomic status predicts hemispheric specialisation of the left inferior frontal gyrus in young children. *NeuroImage* **40**, 1392–1401 (2008).
- Noble, K. G., Farah, M. J. & McCandliss, B. D. Socioeconomic background modulates cognition-achievement relationships in reading. *Cogn. Dev.* **21**, 349–368 (2006).
- Hutton, J. S., Dudley, J., Horowitz-Kraus, T., DeWitt, T. & Holland, S. K. Associations between home literacy environment, brain white matter integrity and cognitive abilities in preschool-age children. *Acta Paediatrica* **109**, 1376–1386 (2020).
- Hutton, J. S. et al. Home reading environment and brain activation in preschool children listening to stories. *Pediatrics* **136**, 466–478 (2015).
- Hutton, J. S. et al. Shared reading quality and brain activation during story listening in preschool-age children. *J. Pediatrics* **191**, 204–211. e1 (2017).
- Merz, E. C., Maskus, E. A., Melvin, S. A., He, X. & Noble, K. G. Socioeconomic disparities in language input are associated with children's language-related brain structure and reading skills. *Child Dev.* **91**, 846–860 (2020).
- Romeo, R. R. et al. Language exposure relates to structural neural connectivity in childhood. *J. Neurosci.* **38**, 7870–7877 (2018).
- Romeo, R. R. et al. Beyond the 30-million-word gap: children's conversational exposure is associated with language-related brain function. *Psychol. Sci.* **29**, 700–710 (2018).
- Su, M. et al. Influences of the early family environment and long-term vocabulary development on the structure of white matter pathways: a longitudinal investigation. *Dev. Cogn. Neurosci.* **42**, 100767 (2020).
- Powers, S. J., Wang, Y., Beach, S. D., Sideridis, G. D. & Gaab, N. Examining the relationship between home literacy environment and neural correlates of phonological processing in beginning readers with and without a familial risk for dyslexia: an fMRI study. *Ann. Dyslexia* **66**, 337–360 (2016).

31. Perrachione, T. K. et al. Dysfunction of rapid neural adaptation in dyslexia. *Neuron* **92**, 1383–1397 (2016).
32. Grill-Spector, K. & Malach, R. fMR-adaptation: a tool for studying the functional properties of human cortical neurons. *Acta Psychol.* **107**, 293–321 (2001).
33. Bossier, H. et al. The empirical replicability of task-based fMRI as a function of sample size. *Neuroimage* **212**, 116601 (2020).
34. Saxe, R., Brett, M. & Kanwisher, N. Divide and conquer: a defense of functional localizers. *Neuroimage* **30**, 1088–1096 (2006). discussion 1097–1099.
35. Amalric, M. & Dehaene, S. Origins of the brain networks for advanced mathematics in expert mathematicians. *Proc. Natl Acad. Sci. USA* **113**, 4909–4917 (2016).
36. Lefavrais, P. Test de l'Alouette, version révisée. Paris: ECPA (2005).
37. Cognet, G. NEMI-2: Nouvelle Echelle Métrique de l'Intelligence-2. (2006).
38. Skwarchuk, S.-L., Sowinski, C. & LeFevre, J.-A. Formal and informal home learning activities in relation to children's early numeracy and literacy skills: the development of a home numeracy model. *J. Exp. Child Psychol.* **121**, 63–84 (2014).
39. Olulade, O. A., Flowers, D. L., Napoliello, E. M. & Eden, G. F. Dyslexic children lack word selectivity gradients in occipito-temporal and inferior frontal cortex. *Neuroimage Clin.* **7**, 742–754 (2015).
40. Szwed, M., Qiao, E., Jobert, A., Dehaene, S. & Cohen, L. Effects of literacy in early visual and occipitotemporal areas of Chinese and French readers. *J. Cogn. Neurosci.* **26**, 459–475 (2014).
41. van Bergen, E., van Zuijen, T., Bishop, D. & de Jong, P. F. Why are home literacy environment and children's reading skills associated? What parental skills reveal. *Read. Res. Q.* **52**, 147–160 (2017).
42. Hart, S. A., Little, C. & van Bergen, E. Nurture might be nature: cautionary tales and proposed solutions. *npj Sci. Learn.* **6**, 1–12 (2021).
43. Hart, B. & Risley, T. R. *Meaningful Differences in the Everyday Experience of Young American Children* (Paul H Brookes, 1995).
44. Cavalli, E. et al. Screening for dyslexia in French-speaking university students: an evaluation of the detection accuracy of the Alouette test. *J. Learn. Disabil.* **51**, 268–282 (2018).
45. de Jong, P. F. & Leseman, P. P. M. Lasting effects of home literacy on reading achievement in school. *J. Sch. Psychol.* **39**, 389–414 (2001).
46. Perfetti, C. Reading ability: lexical quality to comprehension. *Sci. Stud. Read.* **11**, 357–383 (2007).
47. Price, C. J., Wise, R. J. S. & Frackowiak, R. S. J. Demonstrating the implicit processing of visually presented words and pseudowords. *Cereb. cortex* **6**, 62–70 (1996).
48. Turkeltaub, P. E., Gareau, L., Flowers, D. L., Zeffiro, T. A. & Eden, G. F. Development of neural mechanisms for reading. *Nat. Neurosci.* **6**, 767–773 (2003).
49. Elliott, M. L. et al. What is the test-retest reliability of common task-functional MRI measures? New empirical evidence and a meta-analysis. *Psychol. Sci.* **31**, 792–806 (2020).
50. Martin, A., Schurz, M., Kronbichler, M. & Richlan, F. Reading in the brain of children and adults: a meta-analysis of 40 functional magnetic resonance imaging studies. *Hum. Brain Mapp.* **36**, 1963–1981 (2015).
51. Dehaene-Lambertz, G., Monzalvo, K. & Dehaene, S. The emergence of the visual word form: longitudinal evolution of category-specific ventral visual areas during reading acquisition. *PLoS Biol.* **16**, e2004103 (2018).
52. Taylor, J. S. H., Rastle, K. & Davis, M. H. Can cognitive models explain brain activation during word and pseudoword reading? A meta-analysis of 36 neuroimaging studies. *Psychol. Bull.* **139**, 766 (2013).
53. Binder, J. R. & Desai, R. H. The neurobiology of semantic memory. *Trends Cogn. Sci.* **15**, 527–536 (2011).
54. Malins, J. G. et al. Individual differences in reading skill are related to trial-by-trial neural activation variability in the reading network. *J. Neurosci.* **38**, 2981–2989 (2018).
55. Inoue, T., Georgiou, G. K., Parrila, R. & Kirby, J. R. Examining an extended home literacy model: the mediating roles of emergent literacy skills and reading fluency. *Sci. Stud. Read.* **22**, 273–288 (2018).
56. King, M. F. & Bruner, G. C. Social desirability bias: a neglected aspect of validity testing. *Psychol. Mark.* **17**, 79–103 (2000).
57. Noble, K. G. & Giebler, M. A. The neuroscience of socioeconomic inequality. *Curr. Opin. Behav. Sci.* **36**, 23–28 (2020).
58. Girard, C. et al. Nurturing the mathematical brain: home numeracy practices are associated with children's neural responses to Arabic numerals. *Psychol. Sci.* (in the press).
59. Robin, M. Davantage de personnes vivent dans un ménage médian dans les régions de l'Ouest. *Insee Focus* (2019).
60. Bus, A. G., van IJzendoorn, M. H. & Pellegrini, A. D. Joint book reading makes for success in learning to read: a meta-analysis on intergenerational transmission of literacy. *Rev. Educ. Res.* **65**, 1–21 (1995).
61. Faul, F., Erdfelder, E., Lang, A.-G. & Buchner, A. G* power 3: a flexible statistical power analysis program for the social, behavioral, and biomedical sciences. *Behav. Res. Methods* **39**, 175–191 (2007).
62. Schoemann, A. M., Boulton, A. J. & Short, S. D. Determining power and sample size for simple and complex mediation models. *Soc. Psychol. Personal. Sci.* **8**, 379–386 (2017).
63. Anderson, S. F., Kelley, K. & Maxwell, S. E. Sample-size planning for more accurate statistical power: a method adjusting sample effect sizes for publication bias and uncertainty. *Psychol. Sci.* **28**, 1547–1562 (2017).
64. Burgund, E. D. et al. The feasibility of a common stereotactic space for children and adults in fMRI studies of development. *Neuroimage* **17**, 184–200 (2002).
65. Kang, H. C., Burgund, E. D., Lugar, H. M., Petersen, S. E. & Schlaggar, B. L. Comparison of functional activation foci in children and adults using a common stereotactic space. *Neuroimage* **19**, 16–28 (2003).
66. Ashburner, J. & Friston, K. J. Unified segmentation. *Neuroimage* **26**, 839–851 (2005).
67. Wager, T. D., Davidson, M. L., Hughes, B. L., Lindquist, M. A. & Ochsner, K. N. Prefrontal-subcortical pathways mediating successful emotion regulation. *Neuron* **59**, 1037–1050 (2008).
68. Wager, T. D. et al. Brain mediators of cardiovascular responses to social threat: Part I: reciprocal dorsal and ventral sub-regions of the medial prefrontal cortex and heart-rate reactivity. *Neuroimage* **47**, 821–835 (2009).
69. Shrout, P. E. & Bolger, N. Mediation in experimental and nonexperimental studies: new procedures and recommendations. *Psychol. Methods* **7**, 422–445 (2002).

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank Franck Lambertson and Danielle Ibarrola for their help with data collection. We are also grateful to the children and parents who participated. This study was funded by the Agence Nationale de la Recherche (ANR-14-CE30-0002 and ANR-17-CE28-0014) to J.P.

AUTHOR CONTRIBUTIONS

C.G. and J.P. developed the study concept, designed the study, and analyzed and interpreted the data. C.G., T.B., J.L., J.E.-D., and L.L. collected the data. C.G. drafted the manuscript. T.B., J.L., J.E.-D., L. L., and J.P. provided critical revisions. All authors approved the final version of the manuscript for submission.

COMPETING INTERESTS

The authors declare no competing interests.


ADDITIONAL INFORMATION

Supplementary information The online version contains supplementary material available at <https://doi.org/10.1038/s41539-021-00112-9>.

Correspondence and requests for materials should be addressed to Cléa. Girard or Jérôme Prado.

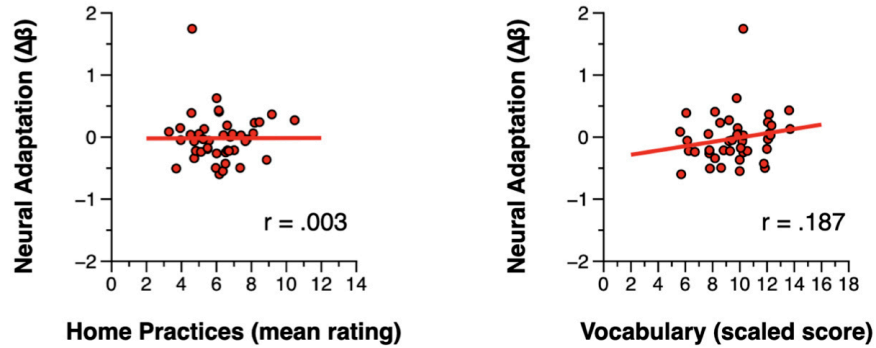
Reprints and permission information is available at <http://www.nature.com/reprints>

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

 **Open Access** This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons license, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons license, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons license and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this license, visit <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

© The Author(s) 2021

Supplementary information



Supplementary Figure 1. Scatterplots of neural adaptation to digits in the pIFs as a function of the overall frequency of home literacy practices (left) and child vocabulary (right). Analyses were controlled for parental income and education.

Supplementary Table 1. Pearson correlation coefficients between home literacy practices, child vocabulary, and digit adaptation in all ROIs

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1- Literacy practices	—								
2- Vocabulary	0.295	—							
3- Left pIFs	0.003	0.187	—						
4- Left pdSTS	-0.177	0.068	0.480	—					
5- Left pre-SMA	-0.146	-0.012	0.699	0.528	—				
6- Left OC	-0.182	-0.012	0.049	0.242	0.212	—			
7-Left pTF	-0.296	-0.009	0.452	0.470	0.525	0.350	—		
8- Left Putamen	-0.049	-0.123	0.592	0.562	0.647	0.108	0.511	—	
9- Right Putamen	-0.077	-0.186	0.547	0.476	0.558	0.161	0.414	0.892	—

Notes. Coefficients are adjusted for parental income and education. Values in bold are significant ($p < .05$, one-tailed)

Annexe 5 : Prior home learning environment predicts adaptation to homeschooling during COVID lockdown.

Article 4 : Girard Cléa & Prado Jérôme (*In revision*). Prior home learning environment predicts adaptation to homeschooling during COVID lockdown.

Abstract

The covid-19 crisis in 2020 led to exceptional measures to contain the spread of the virus. In France as in many countries around the world, the government ordered a lockdown with school closure for several weeks. An emerging literature suggests that family socio-economic status has been an important predictor of how families adapted to homeschooling during lockdown. However, socio-economic status is a distal factor that does not necessarily inform on the specific characteristics of the home learning environment that may more directly influence parental adaptation to homeschooling during lockdown. Here we aimed to examine how parental adaptation to homeschooling during lockdown was influenced by prior parental attitudes and expectations towards academic learning, as well as prior familiarity with literacy and numeracy activities at home. We contacted 52 families who came to our lab in 2018 for a study about the home learning environment. At that time, parents completed an extensive questionnaire assessing their beliefs and attitudes towards academic learning and the frequency of literacy and numeracy activities at home. At the end of the 2020 French lockdown, we again asked parents to complete a questionnaire, this time assessing homeschooling conditions during lockdown as well as parental confidence towards academic domains. Over and above a range of background variables, we found that the frequency of prior shared activities as well as parental expectations towards academic learning predicted daily homeschooling time during lockdown. Both parental attitudes and expectation towards numeracy and literacy also predicted parental confidence in homeschooling. Our results suggest that several aspects of the home learning environment may have influenced how family adapted to homeschooling during the 2020 COVID lockdown.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

Prior home learning environment predicts adaptation to homeschooling during COVID lockdown

Cléa Girard^{1*} & Jérôme Prado^{1*}

¹ Lyon Neuroscience Research Center (CRNL), INSERM U1028 - CNRS UMR5292, University of Lyon, Lyon, France.

* Corresponding authors:
E-mail: clea.girard@etu.univ-lyon1.fr (CG) or jerome.prado@univ-lyon1.fr (JP)

Abstract

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

The covid-19 crisis in 2020 led to exceptional measures to contain the spread of the virus. In France as in many countries around the world, the government ordered a lockdown with school closure for several weeks. An emerging literature suggests that family socio-economic status has been an important predictor of how families adapted to homeschooling during lockdown. However, socio-economic status is a distal factor that does not necessarily inform on the specific characteristics of the home learning environment that may more directly influence parental adaptation to homeschooling during lockdown. Here we aimed to examine how parental adaptation to homeschooling during lockdown was influenced by prior parental attitudes and expectations towards academic learning, as well as prior familiarity with literacy and numeracy activities at home. We contacted 52 families who came to our lab in 2018 for a study about the home learning environment. At that time, parents completed an extensive questionnaire assessing their beliefs and attitudes towards academic learning and the frequency of literacy and numeracy activities at home. At the end of the 2020 French lockdown, we again asked parents to complete a questionnaire, this time assessing homeschooling conditions during lockdown as well as parental confidence towards academic domains. Over and above a range of background variables, we found that the frequency of prior shared activities as well as parental expectations towards academic learning predicted daily homeschooling time during lockdown. Both parental attitudes and expectation towards numeracy and literacy also predicted parental confidence in homeschooling. Our results suggest that several aspects of the home learning environment may have influenced how family adapted to homeschooling during the 2020 COVID lockdown.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

The covid-19 pandemic has led to unprecedented consequences in education. Faced with the spread of the virus, the first response of many countries around the world was to reduce physical contact, notably by closing schools and sending children home. In France, the first lockdown lasted 2 months from March to May 2020. During that period, all schools closed and children had to be homeschooled (Hamilton et al., 2020). As in other countries implementing similar measures, the consequences of school closures for children have quickly become a major concern. For example, the French Pediatric Society recommended a return to normal schooling conditions as soon as possible (Cohen et al., 2020).

Concerns about homeschooling during lockdown grew out of prior research investigating the effects of school interruption on children’s learning. This notably involved absenteeism (Santibañez & Guarino, 2021), holidays (von Hippel & Hamrock, 2019) or strikes (Jaume & Willén, 2019). This research suggests that an interruption of formal schooling typically widens socioeconomic inequalities in education outcomes (Alexander et al., 2007). Interestingly, these data can be used to project the potential impact of covid-related lockdowns on learning (Azevedo et al., 2020; Bao et al., 2020; Kuhfeld et al., 2020). For example, Bao et al. predicted an important learning loss due to covid-related lockdown, but less so for children who have books at home and are used to read daily (Bao et al., 2020). In Europe, it has been suggested that even a "conservative estimate" of the consequences of school closures may translate into a significant learning loss and an exacerbation of existing educational inequalities (Di Pietro et al., 2020). Although the effects of school interruptions on children’s learning might be mediated by a general lack of instructional time, it is important to consider that in many cases schools tried to maintain some contact with children during lockdown through online instruction (Bonal & González, 2020). Because some children might have an easier access to online education than others, it is possible that the reliance on online learning may have increased inequalities even further (Lancker & Parolin, 2020).

Several studies have already been able to take advantage of actual data collected after covid-related lockdowns to evaluate the consequences on children’s learning. For instance, comparing mock exam scores of Chinese university applicants before and after lockdown, Cai et al. (2020) found that a lockdown disproportionately affected economically disadvantaged students. In a large scale study of

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

Dutch school children, Engzell et al. (2021) found lockdown-related learning losses that were larger in children whose parents were less educated. Similar results were obtained by Maldonado & De Witte (2020) in a study of primary school children in Belgium. Finally, Domingue et al. (2021) examined the effects of school closure on oral reading fluency assessments of children in the US. They found that second and third grade were behind expectations after lockdown, but again with an inequitable impact between advantaged and disadvantaged children.

An examination of homeschooling conditions during the French lockdown indicates that learning content was mostly sent by email to parents (80%), with only 20% of online activities for primary school children (vs. 60% in other countries such as Italy) (Champeaux et al., 2020). Therefore, in France as in other countries, homeschooling relied heavily on parents (especially in the case parents of younger children, Petretto et al., 2020). To truly understand the differential effects of homeschooling during covid lockdown, we need to better understand the actual experience of children within the home environment during that period. To date, most reports have explored the time spent working by children, either through parental surveys (Andrew et al., 2020; Bonal & González, 2020; Brom et al., 2020; Champeaux et al., 2020; Domina et al., 2021; Gao et al., 2020; Grewenig et al., 2020) or by combining demographic measures with indirect measures such as data from reading software (Reimer et al., 2021), families' library takeout data of digital children's books (Jæger & Blaabæk, 2020) or google searches on online learning resources (Bacher-Hicks et al., 2021). All of these studies have shown a significant reduction in the time children spent working, as compared to pre-lockdown baseline (Brom et al., 2020; Champeaux et al., 2020; Grewenig et al., 2020). Parental socioeconomic status (SES), however, influenced learning time in most studies (i.e., children from disadvantaged backgrounds spent significantly less time working; Andrew et al., 2020; Bacher-Hicks et al., 2021; Bonal & González, 2020; Domina et al., 2021; Jæger & Blaabæk, 2020; Meeter, 2021; Reimer et al., 2021).

Overall, studies support the idea that SES is a major factor influencing the way families have adapted to school closures during lockdown, with children from disadvantaged families being the most affected. However, it is important to consider that SES is a relatively distal construct that may have affected families' responses to school closures through more proximal factors. These might include parental skills, beliefs, and attitudes towards academic learning, but also a preexisting familiarity with

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

academic activities in the home environment. With the exception of a few studies investigating parental beliefs and feeling of ability during covid-related lockdowns (Bol, 2020; Dong et al., 2020; Garbe et al., 2020), it remains unclear to what extent these more proximal factors might have affected families' response to school closures.

In the present study, we explored how the way parents adapted to homeschooling during lockdown was influenced by prior parental beliefs and attitudes towards academic learning as well as prior familiarity with literacy and numeracy activities at home. At the end of the first 2020 French lockdown (involving school closure), we contacted 52 families who already came to our lab two years earlier for a study about the home learning environment (Girard et al., In press). At that time (T1), both parents and children (who were then 8 years of age) completed tests of reading fluency and arithmetic fluency, while parents also responded to a questionnaire assessing their beliefs and attitudes towards academic learning and the frequency of literacy and numeracy activities at home. At the end of the lockdown (T2), we again asked parents to complete a questionnaire, this time assessing the homeschooling conditions during lockdown as well as parental confidence towards academic subjects. Children also completed an anxiety scale and their reading and arithmetic skills were measured using online tasks.

Material and methods

Participants

Participants were 52 elementary school children (M=10.43, range=9.57-11.29, 17 females) and one of their parents (48 females). Children had no history of neurological disease, mental disorders of attention deficits. All children and parents were native French speakers. Out of the 52 children, 21 were in 4th grade, 29 were in 5th grade and 2 were in 6th grade. Children (and parents) came to the lab approximately 2 years earlier (age of children at that time: M=8.45, range=8.02-09.22) for an evaluation of their skills and of the home learning environment (i.e., T1). All families participating in that study (n=66) were recontacted through email for this follow-up study (i.e., T2). Therefore, there was a 21% attrition rate between T1 and T2. Children in families that did not respond to our request for a follow up

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

were not different from those in families that responded positively with respect to sex, skills, IQ, home practices, parental income and parental education (all p s >.19).

At T1, children’s full-scale IQ was normal to high-normal, ranging from 90 to 135 (average = 113, Standard Deviation [SD] = 10.5). Parents also completed a questionnaire evaluating their SES at T1 (and were asked about changes in SES at T2). At T1, parental income ranged from less than €12,000 to more than €60,000 per year. Ten percent of parents reported to only have a secondary degree, 58% reported to have an undergraduate degree, and 32% a master degree or higher. Socio-economic status remained stable for a large majority of parents between T1 and T2. Ten percent of them declared a change in their level of monthly income (among them, 6% declared an average increase of 1,000 euros per month whereas 4% declared an average decrease of 1,000 euros per month). Therefore, SES ranged from low to high at both T1 and T2. The study was approved by the local ethics committee (CPP Sud-Est 2). Families were paid 40 euros for their participation in the first testing session and children were offered a gift for their participation in the second online testing session.

Measures at T1 (two years before lockdown)

At T1, both parents and children came to the lab for an extensive testing session. This was done in the context of a study on the home learning environment (more information about that study can be found in Girard et al., In press). Parents were given an electronic questionnaire on a tablet. The questionnaire first assessed family SES based on parent’s education level and monthly income. Education level was measured using the number of years pre- or post- high school graduation, with high school graduation set at 0 (i.e., positive numbers indicated that parents completed some years of education after graduating). Approximate monthly income was measured using ranges with increments of €1,000. The minimum possible range was €0 to €999 and the maximum possible range was more than €10,000. For all analyses, we used the median of the reported income range (e.g., €500 for a range between €0 to €1,000) as an approximation of parents’ income.

The questionnaire then assessed parental attitudes and expectations towards numeracy and literacy, as well as the frequency of home numeracy and literacy activities. Items were adapted from a questionnaire developed by Lefevre et al. (2009). More information about the questionnaire and the

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

methodology can be found in Girard et al. (2021). Briefly, parents were first asked to describe on a five-point rating scale (i.e., Not sure, strongly disagree, disagree, Agree, Strongly agree) their current attitudes toward numeracy or literacy (e.g., “I find math/reading enjoyable”, “I avoid situations that involve math” or “My job involves using writing”) and their past school experiences (“When I was at school, I was good at math”). Parental expectations regarding numeracy and literacy learning for their child were explored by asking parents to rate on a six-point rating scale how important it is for them that their child acquires a given skill by the end of elementary school (i.e., no opinion, really not important, not important, important, very important, extremely important). For home learning activities, parents were asked how often they engaged in home learning activities that involved numeracy or literacy with their child (see Girard et al., In press for a list of activities).

Finally, math and reading skills of both parents and children were assessed using the Math Fluency subtest of the Woodcock-Johnson Test of achievement (WJ III; (Woodcock et al., 2001) and the Alouette-R test (Lefavrais, 1967), respectively. In the Math Fluency subtest, participants solve simple addition, subtraction, and multiplication problems within a 3-min time limit. The test consists of 2 pages of 80 problems involving operands from 0 to 10. Addition, subtraction, and multiplication problems are intermixed, but multiplication problems are only introduced after Item 60. In the Alouette-R test, participants have to read a 265-word text aloud in 3 minutes. The number of words read and the number of pronunciation errors are used to calculate indices of reading speed and reading accuracy, respectively.

Measures at T2 (end of lockdown)

Towards the end of the 2020 covid-related lockdown in France, we contacted the families who participated in lab testing at T1. Parents were asked to fill out an online questionnaire from home. After asking for any change in SES situation since T1 as well as working conditions (e.g., loss of salary, possibility of working from home) and material conditions (e.g., number of square meters per person living in the household, access to computer equipment) during lockdown, the questionnaire interrogated parents on both children’s engagement in learning activities at home during lockdown and parental confidence towards academic domains.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

Three survey items were used to measure children’s engagement in learning activities. First parents estimated children overall daily learning time with a 7-point rating scale (Less than 1 hour per day; From 1 to 2 hours per day; From 2 to 3 hours per day; From 3 to 4 hours per day; From 4 to 5 hours per day; From 5 to 6 hours per day, More than 6 hours per day). Second, parents estimated the time they spent themselves every day helping and/or supervising their children with homeschooling using a 10-point rating scale (Never; Less than 15 minutes per day; From 15 to 30 minutes per day; From 30 minutes to 1 hour per day; From 1 to 2 hours per day; From 2 to 3 hours per day; From 3 to 4 hours per day; From 4 to 5 hours per day; From 5 to 6 hours per day, More than 6 hours per day). Third, parents indicated how often they asked their children for extra homework related to arithmetic or to reading with a 7-point rating scale (Did not occur/Activity is not relevant to my child; Very rarely; 1-3 times per month; Once per week; 2-4 times per week; Almost daily; Daily).

We then measured parental confidence towards academic domains. This was done by asking parents to indicate how confident they felt about effectively supporting their child in homeschooling with a 3-point rating scale (Yes, I feel confident to help my child effectively; It is not easy, but I try to help my child as best I can; No, I do not feel confident to help my child effectively).

Finally, parents rated their overall and specific (professional and family related) levels of stress, using numerical scales from 0 to 10 (0 = no stress, 10 = maximum stress) (Lesage et al., 2009; Rolland et al., 2020). Children also completed the Revised Children's Manifest Anxiety Scale (RCMAS, Gerard & Reynolds, 2004). The RCMAS is a 37-item self-administered questionnaire that provides a quantitative assessment of children anxiety. Children were asked to describe on a 2-points rating scale (yes or no) their current feeling toward a large variety of statements (e.g., “I have difficulty falling asleep at night”, “I am always kind”, “I worry about what will happen”) We calculated a total anxiety score and three different sub-scores related to physiological anxiety, anxiety / hypersensitivity, and social concerns.

Finally, children’s math and reading skills were assessed via online tasks, programmed using the Psychopy software (<https://www.psychopy.org>) and hosted on the Pavlovia platform (<https://pavlovia.org>). Math skills were assessed using an arithmetic task in which children were presented with a series of addition, subtraction, and multiplication problems. In each trial, a problem

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

was presented for 800 ms at the center of screen. After an interval of 200 ms, a proposed answer was shown for 800 ms. Children had to indicate whether the answer was valid or invalid as quickly and as accurately as possible by pressing one of two keys on the computer keyboard. There were 60 trials in total (i.e., 12 addition problems, 24 subtraction problems, and 24 multiplication problems). The answer was valid in half of the trials and invalid in the other half. Trials included a variety of problems of various difficulty (see S1 Table for a full list of problems and answers). Trials were randomly presented. Reading skills were assessed using a rhyming task in which children were presented with pairs of written words. In each trial, the first word was presented for 800 ms at the center of screen. After an interval of 200ms, the second word was shown for 800 ms. Children had to indicate whether the words rhymed or not as quickly and as accurately as possible by pressing one of two keys on the computer keyboard. Words could have (1) similar orthography and similar phonology (e.g., “main” and “nain”), (2) similar orthography and different phonology (e.g., “fille” and “ville”), (3) different orthography and similar phonology (e.g., “train” and “pin”), and (4) different orthography and different phonology (e.g., “date” and “saut”). There were 48 trials in total, with 12 trials of each orthography and phonology combination (see S2 Table for a full list of word pairs). Trials were randomly presented. Two children did not complete these tasks (n=50). Children’s accuracy on the online arithmetic task was strongly associated with children’s scores on the Math fluency subtest at T1 ($r(48)=0.470, p<.001$, two-tailed). Children’s accuracy on the online reading task at T2 was also associated with children’s accuracy scores on the Alouette test at T1 ($r(48)=0.319, p=0.024$, two-tailed). Therefore, accuracy on the online arithmetic and reading tasks was converted into z-scores and used in the current analyses to control for children’s math and reading skills in the main analyses below. All data, as well as the parental questionnaire at T1 and T2 can be found on OSF (https://osf.io/r8h65/?view_only=738e8684565945eb9174ab67275d0607).

Data analysis

We used bivariate Pearson correlations to test whether children’s engagement in learning activities during lockdown (T2) as well as parental confidence toward homeschooling during lockdown (T2) increased with different family characteristics measured prior lockdown (T1). Partial correlations

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

were used to control for a variety of either parental or children characteristics. Because we were only interested in positive associations between variables at T1 and T2, one-tailed p-values are reported (unless otherwise noted). All analyses were conducted in Jamovi version 1.6.3.

Results

Physical and emotional environment of families during lockdown (T2)

At T2, a majority of parents reported working from home (44%), a third of them stopped working completely (33%), a minority (8%) saw their working activity reduced (partial unemployment), and 15% continued to physically work at their regular workplace. The economic impact of the lockdown was relatively diverse: 30% of parents stated that the lockdown had no consequence for their budget, while 23% experienced a reduction in their budget reduced. However, only 4% of parents reported that the lockdown could potentially put them in a precarious situation.

Parent average level of perceived personal and professional stress was relatively low but there were important individual differences (perceived personal stress, mean = 4.08, SD = 2.61, range= 0-10; perceived professional stress, mean = 3.60, SD=2.81, range= 0-8). Children anxiety scores were average, but also had important interindividual differences (total anxiety score, mean = 46.84, SD=31.93, range= 1-99; social concerns, mean = 49.14, SD = 26.73, range = 11-99; anxiety / hypersensitivity, mean = 48.20, SD=31.59, range = 4-99; physiological anxiety; mean = 45.73, SD= 28.22, range = 4-93).

Relations between children's engagement in learning activities during lockdown (T2) and family characteristics prior lockdown (T1)

Children's engagement in learning activities during lockdown was measured using three survey items: (1) overall daily learning time, (2) daily time spent by parents helping children, and (3) frequency of extra homeschool work. Overall daily learning time (mean = 3.12 hours, SD= 1.25) was reduced compared to the length of a normal school day (5.5 hours). It was also highly correlated with daily time spent by parents helping children ($r(50) = 0.531, p < .001$). Children who spent the most time working

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

were also those who received extra reading ($r(50)= 0.301, p = 0.015$) and arithmetic homework ($r(50)= 0.371, p= 0.003$) from their parents.

Bivariate correlations between these three output variables measured at T2 and family characteristics measured at T1 are shown in **Table 1**. Overall daily learning time during lockdown increased with parental expectations towards numeracy ($r(50)= 0.27, p = 0.025$) and literacy ($r(50)= 0.28, p = 0.023$) measured two years earlier. Parental expectations towards numeracy and literacy remained positively associated with overall daily learning time when correlations were adjusted for parental education and income (numeracy: $r(50)=0.33, p = 0.009$; literacy: $r(50) = 0.35, p = 0.006$), children’s anxiety (numeracy: $r(50) = 0.27, p = 0.026$; literacy: $r(50) = 0.28, p = 0.024$), children access to digital devices (numeracy: $r(50) = 0.32, p = 0.010$; literacy: $r(50) = 0.30, p = 0.016$), physical space for each member of the household (numeracy: $r(50) = 0.27, p = 0.027$; literacy: $r(50) = 0.28, p = 0.024$), parental level of perceived personal stress (numeracy: $r(50) = 0.28, p = 0.026$; literacy: $r(50) = 0.28, p = 0.023$), parent’s arithmetic skills measured at T1 (numeracy: $r(50) = 0.25, p = 0.037$; literacy: $r(50) = 0.25, p = 0.039$), parents’ reading skills measured at T1 (numeracy: $r(50) = 0.25, p = 0.041$; literacy: $r(50) = 0.23, p = 0.058$), children’s arithmetic skills measured at T2 (numeracy: $r(48) = 0.27, p = 0.030$; literacy: $r = 0.26, p = 0.035$), and children’s reading skills measured at T2 (numeracy: $r(48) = 0.30, p = 0.017$; literacy: $r(50) = 0.28, p = 0.24$).

There was also a positive correlation between daily time spent by parents helping children and the frequency of home learning activities involving numeracy ($r(50) = 0.28, p = 0.022$) and literacy ($r(50) = 0.35, p = 0.005$) two years earlier. Frequency of home learning activities at T1 remained positively associated with daily time spent by parents helping children at T2 when adjusting for parental education and income (numeracy: $r(50)=0.23, p = 0.056$; literacy: $r(50) = 0.32, p = 0.011$), children’s anxiety (numeracy: $r(50) = 0.31, p = 0.014$; literacy: $r(50) = 0.37, p = 0.004$), children access to digital devices (numeracy: $r(50) = 0.29, p = 0.019$; literacy: $r(50) = 0.35, p = 0.006$), physical space for each member of the household (numeracy: $r(50) = 0.30, p = 0.015$; literacy: $r(50) = 0.35, p = 0.006$), parental level of perceived personal stress (numeracy: $r(50) = 0.27, p = 0.030$; literacy: $r(50) = 0.33, p = 0.008$), parent’s arithmetic skills measured at T1 (numeracy: $r(50) = 0.29, p = 0.018$; literacy: $r(50) = 0.37, p = 0.004$), parents’ reading skills measured at T1 (numeracy: $r(50) = 0.30, p = 0.016$; literacy: $r(50) = 0.37,$

1 p = 0.004), children's arithmetic skills measured at T2 (numeracy: $r(48) = 0.29$, $p = 0.024$; literacy:
 2 $r(50) = 0.38$, $p = 0.003$), and children's reading skills measured at T2 (numeracy: $r(48) = 0.28$ $p = 0.025$;
 3 literacy: $r(50) = 0.40$, $p = 0.002$).
 4
 5
 6

7
 8 Finally, children extra arithmetic and reading homework at T2 increased with (1) parental
 9 expectations towards numeracy (extra arithmetic: $r(50) = 0.36$ $p = 0.005$; extra reading: $r(50) = 0.43$, p
 10 $< .001$) and literacy at T1 (extra arithmetic: $r(50) = 0.29$ $p = 0.017$; extra reading: $r(50) = 0.45$, $p < .001$)
 11 as well as (2) frequency of numeracy (only for extra arithmetic activities : $r(50) = 0.24$ $p = 0.045$) and
 12 literacy (extra arithmetic: $r(50) = 0.26$ $p = 0.032$; extra reading: $r(50) = 0.40$ $p : 0.002$) activities at home
 13 at T1. Children extra arithmetic and reading homework at T2 remained associated with parental
 14 expectations towards numeracy and literacy at T1 (all $r > 0.27$ and all $ps < 0.031$) and with literacy (but
 15 not numeracy) at home at T1 (all $r > 0.24$ and all $ps < 0.045$) when adjusting for parental education and
 16 income, children's anxiety, children access to digital devices, physical space for each member of the
 17 household, parental level of perceived personal stress, parent's arithmetic and reading skills measured
 18 at T1, children's arithmetic and reading skills measured at T2.
 19
 20
 21
 22
 23
 24
 25
 26
 27
 28
 29
 30
 31
 32
 33
 34
 35
 36
 37
 38
 39
 40

41 **Table 1. Pearson correlation coefficients between children's engagement in learning activities during**
 42 **lockdown (T2) and family characteristics prior lockdown (T1).**

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
43										
44										
45										
46										
47										
48	1. Overall daily learning									
49	time (T2)									
50	2. Daily time spent by	0.53***								
51	parents helping children									
52	(T2)									
53	3. Frequency of extra	0.37**	0.25*							
54	math homework (T2)									
55	4. Frequency of extra	0.30*	0.29*	0.65***						
56	reading homework (T2)									
57										
58										
59										
60										
61										
62										
63										
64										
65										

5. Home Numeracy Activities (T1)	0.12	0.28*	0.24*	0.16					
6. Home Literacy activities (T1)	0.06	0.35**	0.26	0.40**	0.57***				
7. Parental expectations toward math (T1)	0.27*	0.22	0.36**	0.43***	0.14	0.09			
8. Parental expectations toward literacy (T1)	0.28*	0.27*	0.29*	0.45***	0.02	0.13	0.63***		
9. Parental math attitude (T1)	0.03	-0.34	0.01	0.01	-0.07	-0.05	0.35*	0.16	
10. Parental literacy attitude (T1)	0.11	0.05	0.09	0.27*	0.06	0.15	0.44***	0.43***	0.07 -

N=52; ***, p < .001; **, p < .01; *, p < .05. P values are one-tailed (testing for a positive association).

Relations between parental confidence about homeschooling during lockdown (T2) and family characteristics prior lockdown (T1)

Bivariate correlations between parental confidence in their ability to support their child during lockdown and family characteristics measured at T1 are shown in **Table 2**. Parental confidence increased with both parental attitude towards numeracy ($r(50)=0.39, p=0.002$) and literacy ($r(50)=0.31, p=0.012$) measured two year earlier. It also increased with parental expectations towards numeracy ($r(50)=0.37, p=0.004$) and literacy ($r(50)=0.40, p=0.002$) two years earlier. All these relations remained significant when adjusting for parental education and income, children's anxiety, children access to digital devices, physical space for each member of the household, parental level of perceived personal stress, parent's arithmetic and reading skills measured at T1, children's arithmetic (all $r_s > 0.27$ and all $p_s < 0.031$). Note, however, that the positive relation between parental confidence and parental attitude towards literacy was no longer significant after adjusting for children reading skills measured at T2 ($r(48)=0.18, p=0.112$).

Table 2. Pearson correlation coefficients between parental confidence about homeschooling during lockdown (T2) and family characteristics prior lockdown (T1).

	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.
--	----	----	----	----	----	----	----

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

1. Parental confidence in their ability to help their child for homeschool (T2)							
2. Home Numeracy Activities (T1)	0.01						
3. Home Literacy activities (T1)	-0.11	0.57***					
4. Parental expectations toward math (T1)	0.37**	0.14	0.09				
5. Parental expectations toward literacy (T1)	0.40**	0.02	0.13	0.63***			
6. Parental math attitude (T1)	0.39**	-0.07	-0.05	0.35**	0.16		
7. Parental literacy attitude (T1)	0.31*	0.06	0.15	0.44***	0.43***	0.07	-

N=52; ***, p < .001; **, p < .01; *, p < .05. P values are one-tailed (testing for a positive association).

Discussion

Previous studies have showed a relation between parental adaptation to homeschooling during covid-related lockdown and family SES (Bacher-Hicks et al., 2021; Bol, 2020; Jæger & Blaabæk, 2020; Reimer et al., 2021). SES, however, is a relatively distal factor that does not necessarily capture the specific family characteristics influencing adaptation to homeschooling. Here we aimed to study how parental response to homeschooling during lockdown was influenced by prior parental beliefs and attitudes towards academic learning as well as prior familiarity with literacy and numeracy activities at home. The present study relies on a longitudinal design in which families who participated in a previous study on the home learning environment two years before lockdown were contacted again at the end of the 2020 French lockdown to measure parental adaptation to homeschooling at that time. This allowed us a explore the relations between a range of measures and this adaptation.

How prior parental attitudes and expectations as well as prior shared activities influence parental adaptation to homeschooling during lockdown

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

Consistent with previous studies conducted in other countries (e.g. United-States, Domina et al., 2021; Gao et al., 2020; Czech Republic, Brom et al., 2020; England, Andrew et al., 2020; Germany Grewenig et al., 2020 and Spain, Bonal & González, 2020), we found that French children cut their daily work time in half (compared to a normal school day) during the lockdown. However, the time spent doing homework was variable between families. Notably, it increased with prior parental expectations towards academic learning (both in terms of numeracy and literacy). The time spent doing homework with parents also increased with the prior frequency of both home numeracy and literacy activities measured two years earlier. Finally, we found that parental confidence about homeschooling during lockdown increased with parental expectations and attitudes towards academic learning measured two years earlier.

Overall, these findings are consistent with the idea that parental attitudes and academic expectations as well as shared literacy and numeracy practices between parents and children define what is commonly called the “home learning environment” (Elliott et al., 2019; Elliott & Bachman, 2018). These aspects are likely to be related, as a number of previous studies have found a positive relation between parental expectations regarding children’s academic achievement and the frequency of home learning practices (Galindo & Sheldon, 2012; Kleemans et al., 2012; LeFevre et al., 2002, 2010; Martini & Sénéchal, 2012; Musun-Miller & Blevins-Knabe, 1998; Silver et al., 2021; Skwarchuk et al., 2014; Susperreguy et al., 2020). Our results suggest that characteristics such as the frequency of shared practices at home, but also parental attitudes and expectation towards academic learning, might be relatively stable measures that may continue to predict the home learning environment several years later, even in unprecedented conditions that disrupt the life of both parents and children.

Relations between prior home learning environment and family adaptation to homeschooling during lockdown are not accounted for by a range of background variables

Critically, our study is relatively unique in that we measured a range of background characteristics in both children and parents. This makes it possible to dissociate the effect of home learning characteristics from other effects that may also affect children learning time. We discuss here three of these potential confounds. First, several previous studies of homeschooling during covid-related

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

lockdowns have found an effect of family SES on time spent working by the child (Bonal & González, 2020; Domina et al., 2021; Gao et al., 2020). Here, we found that the relation between parental expectations and daily learning time was independent from SES, as it remained significant even after controlling for parental income and education. Second, the relations between several aspects of the home learning environment and daily learning time were also not dependent upon material characteristics of the home environment, such as children access to digital devices and physical space for each member of the household. This suggests that homeschooling conditions may not necessarily depend on financial or material conditions, but rather on the quality and quantity of interactions between parents and children around numeracy and literacy. Third, our analyses also controlled for differences in parent’s and children’s anxiety scores. This is noteworthy because mental health of both parents and children may be affected by lockdown (Kubb & Foran, 2020). For example, it has been suggested that being a parent increases the risk of experiencing significant stress during lockdown (Achterberg et al., 2020; Brown et al., 2020; Patrick et al., 2020). Levels of child's anxiety during the lockdown have also been shown to correlate with the size of the learning loss (Di Pietro et al., 2020). Here, we show that the relations between the home learning environment and parental adaptation to homeschooling during lockdown were largely independent from anxiety levels.

Limitations

To our knowledge, our study is the first to assess the relations between the home learning environment and homeschooling conditions during lockdown, while controlling for a wide range of factors. However, it is important to acknowledge at least two limitations. A first limitation is that our measure of the homeschooling was an electronic questionnaire sent by email to parents and children. A drawback of this approach is that families without sufficient internet connection or computer equipment would not have been able to participate. The use of a questionnaire also increase the risk of a social desirability bias among parents (King & Bruner, 2000). Second, although our sample includes families from diverse socio-economic backgrounds, it is constrained by the number of families who participated in our previous experiment and is therefore limited in size. Thus, studies with larger samples would be needed to confirm the present results.

1
2
3
4
5
6
7
8
9
10
11
12
13
14
15
16
17
18
19
20
21
22
23
24
25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48
49
50
51
52
53
54
55
56
57
58
59
60
61
62
63
64
65

Conclusion

In sum, our study demonstrates that investigating several aspects of the home learning environment may provide valuable information regarding homeschooling conditions during an unexpected social crisis such that the covid pandemic. Critically, this information goes above and beyond a mere examination of differences in SES between families. Although our results are correlational in nature, they also suggest that parental attitudes and expectations may be promising targets for future interventions aiming to improve the home learning environment of children, particularly in the context of the current crisis.

References

Achterberg, M., Dobbelaar, S., Boer, O. D., & Crone, E. (2020). *Perceived stress as mediator for longitudinal effects of the COVID-19 lockdown on wellbeing of parents and children*. PsyArXiv. <https://doi.org/10.31234/osf.io/pj3sg>

Alexander, K. L., Entwisle, D. R., & Olson, L. S. (2007). Lasting Consequences of the Summer Learning Gap. *American Sociological Review*, 72(2), 167- 180. <https://doi.org/10.1177/000312240707200202>

Andrew, A., Cattan, S., Costa-Dias, M., Farquharson, C., Kraftman, L., Krutikova, S., Phimister, A., & Almudena, S. (2020). Learning during the lockdown : Real-time data on children’s experiences during home learning. *Institute for Fiscal Studies Briefing Note*.

Azevedo, J. P., Hasan, A., Goldemberg, D., Iqbal, S. A., & Geven, K. (2020). *Simulating the Potential Impacts of COVID-19 School Closures on Schooling and Learning Outcomes : A Set of Global Estimates*. The World Bank. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-9284>

Bacher-Hicks, A., Goodman, J., & Mulhern, C. (2021). Inequality in household adaptation to schooling shocks : Covid-induced online learning engagement in real time. *Journal of Public Economics*, 193, 104345. <https://doi.org/10.1016/j.jpubeco.2020.104345>

Bao, X., Qu, H., Zhang, R., & Hogan, T. P. (2020). Modeling Reading Ability Gain in Kindergarten Children during COVID-19 School Closures. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(17), 6371. <https://doi.org/10.3390/ijerph17176371>

Bol, T. (2020). Inequality in homeschooling during the Corona crisis in the Netherlands. First results from the LISS Panel. *Soc.ArXiv*. <https://doi.org/10.31235/osf.io/hf32q>

Bonal, X., & González, S. (2020). The impact of lockdown on the learning gap : Family and school divisions in times of crisis. *International Review of Education*, 66(5), 635- 655. <https://doi.org/10.1007/s11159-020-09860-z>

Brom, C., Lukavský, J., Greger, D., Hannemann, T., Straková, J., & Švaříček, R. (2020). Mandatory Home Education During the COVID-19 Lockdown in the Czech Republic : A Rapid Survey of 1st-9th Graders’ Parents. *Frontiers in Education*, 5. <https://doi.org/10.3389/educ.2020.00103>

Brown, S. M., Doom, J. R., Lechuga-Peña, S., Watamura, S. E., & Koppels, T. (2020). Stress and parenting during the global COVID-19 pandemic. *Child Abuse & Neglect*, 110, 104699.

- 1 <https://doi.org/10.1016/j.chiabu.2020.104699>
- 2 Cai, X., Fu, J., Lu, Y., Tang, X., & Zhong, S. (2020). *Assessing Inequality in the School Closure*
- 3 *Response to COVID-19* (SSRN Scholarly Paper ID 3632103). Social Science Research Network.
- 4 <https://doi.org/10.2139/ssrn.3632103>
- 5 Champeaux, H., Mangiavacchi, L., Marchetta, F., & Piccoli, L. (2020). Learning at Home : Distance
- 6 Learning Solutions and Child Development during the COVID-19 Lockdown. In *IZA Discussion*
- 7 *Papers* (N° 13819; IZA Discussion Papers). Institute of Labor Economics (IZA).
- 8 <https://ideas.repec.org/p/iza/izadps/dp13819.html>
- 9 Cohen, R., Delacourt, C., Gras-Le Guen, C., & Launay, E. (2020). COVID-19 and schools. Guidelines
- 10 of the French Pediatric Society. *Archives de Pédiatrie*, 27(7), 388- 392.
- 11 <https://doi.org/10.1016/j.arcped.2020.09.001>
- 12 Di Pietro, G., Biagi, F., Costa, P., Karpinski, Z., & Mazza, J. (2020). *The likely impact of COVID-19*
- 13 *on education : Reflections based on the existing literature and recent international datasets* (Vol.
- 14 30275). Publications Office of the European Union.
- 15 Domina, T., Renzulli, L., Murray, B., Garza, A. N., & Perez, L. (2021). Remote or Removed :
- 16 Predicting Successful Engagement with Online Learning during COVID-19: *Socius*.
- 17 <https://doi.org/10.1177/2378023120988200>
- 18 Domingue, B. W., Hough, H. J., Lang, D., & Yeatman, J. (2021). *Changing Patterns of Growth in*
- 19 *Oral Reading Fluency During the COVID-19 Pandemic*.
- 20 Dong, C., Cao, S., & Li, H. (2020). Young children’s online learning during COVID-19 pandemic :
- 21 Chinese parents’ beliefs and attitudes. *Children and Youth Services Review*, 118, 105440.
- 22 <https://doi.org/10.1016/j.childyouth.2020.105440>
- 23 Elliott, L., & Bachman, H. J. (2018). How Do Parents Foster Young Children’s Math Skills? *Child*
- 24 *Development Perspectives*, 12(1), 16- 21. <https://doi.org/10.1111/cdep.12249>
- 25 Elliott, L., Bachman, H. J., & Henry, D. A. (2019). Why and how parents promote math learning with
- 26 their young children : A mixed-methods investigation. *Parenting: Science and Practice*, No
- 27 Pagination Specified-No Pagination Specified. <https://doi.org/10.1080/15295192.2019.1694830>
- 28 Engzell, P., Frey, A., & Verhagen, M. D. (2021). Learning loss due to school closures during the
- 29 COVID-19 pandemic. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(17).
- 30 <https://doi.org/10.1073/pnas.2022376118>
- 31 Gao, N., Lafortune, J., & Hill, L. (2020). Who Is Losing Ground with Distance Learning in
- 32 California? *Public Policy Institute of California*.
- 33 Garbe, A., Ogurlu, U., Logan, N., & Cook, P. (2020). Parents’ Experiences with Remote Education
- 34 during COVID-19 School Closures. *American Journal of Qualitative Research*, 4(3), 45- 65.
- 35 <https://doi.org/10.29333/ajqr/8471>
- 36 Gerard, A. B., & Reynolds, C. R. (2004). Characteristics and Applications of the Revised Children’s
- 37 Manifest Anxiety Scale (RCMAS). In *The Use of Psychological Testing for Treatment Planning*
- 38 *and Outcomes Assessment* (3rd Edition). Routledge.
- 39 Girard, C., Bastelica, T., Léone, J., Epinat-Duclos, J., Longo, L., & Prado, J. (In press). Home
- 40 numeracy practices relate to arithmetic skills in elementary school children. *PLoS One*.
- 41 Grewenig, E., Lergetporer, P., Werner, K., Woessmann, L., & Zierow, L. (2020). *COVID-19 and*
- 42 *Educational Inequality : How School Closures Affect Low- and High-Achieving Students* (SSRN
- 43 Scholarly Paper ID 3720405). Social Science Research Network.
- 44 <https://papers.ssrn.com/abstract=3720405>
- 45 Hamilton, L. S., Grant, D., Kaufman, J. H., Diliberti, M., Schwartz, H. L., Hunter, G. P., Setodji, C.
- 46 M., & Young, C. J. (2020). COVID-19 and the State of K–12 Schools : Results and Technical
- 47 Documentation from the Spring 2020 American Educator Panels COVID-19 Surveys. *RAND*
- 48 *Corporation*. <https://doi.org/10.7249/RRA168-1>

- 1 Jæger, M. M., & Blaabæk, E. H. (2020). Inequality in learning opportunities during Covid-19 :
 2 Evidence from library takeout. *Research in Social Stratification and Mobility*, 68, 100524.
 3 <https://doi.org/10.1016/j.rssm.2020.100524>
- 4 Jaume, D., & Willén, A. (2019). The Long-Run Effects of Teacher Strikes : Evidence from Argentina.
 5 *Journal of Labor Economics*, 37(4), 1097- 1139. <https://doi.org/10.1086/703134>
- 6 King, M. F., & Bruner, G. C. (2000). Social desirability bias : A neglected aspect of validity testing.
 7 *Psychology & Marketing*, 17(2), 79- 103. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1520-](https://doi.org/10.1002/(SICI)1520-)
 8 6793(200002)17:2<79::AID-MAR2>3.0.CO;2-0
- 9 Kubb, C., & Foran, H. M. (2020). Measuring COVID-19 Related Anxiety in Parents : Psychometric
 10 Comparison of Four Different Inventories. *JMIR Mental Health*, 7(12), e24507.
 11 <https://doi.org/10.2196/24507>
- 12 Kuhfeld, M., Soland, J., Tarasawa, B., Johnson, A., Ruzek, E., & Liu, J. (2020). Projecting the
 13 Potential Impact of COVID-19 School Closures on Academic Achievement. *Educational*
 14 *Researcher*, 49(8), 549- 565. <https://doi.org/10.3102/0013189X20965918>
- 15 Lancker, W. V., & Parolin, Z. (2020). COVID-19, school closures, and child poverty : A social crisis
 16 in the making. *The Lancet Public Health*, 5(5), e243- e244. <https://doi.org/10.1016/S2468->
 17 2667(20)30084-0
- 18 Lesage, F.-X., Chamoux, A., & Berjot, S. (2009). Stabilité de l'échelle visuelle analogique dans
 19 l'évaluation du stress. *Archives des Maladies Professionnelles et de l'Environnement*, 70(6),
 20 619- 622.
- 21 Maldonado, J. E., & De Witte, K. (2020). The effect of school closures on standardised student test
 22 outcomes. *KU Leuven Department of Economics Discussion Paper DPS20*, 17.
- 23 Meeter, M. (2021). *Primary school mathematics during Covid-19 : No evidence of learning gaps in*
 24 *adaptive practicing results*. PsyArXiv. <https://doi.org/10.31234/osf.io/8un6x>
- 25 Patrick, S. W., Henkhaus, L. E., Zickafoose, J. S., Lovell, K., Halvorson, A., Loch, S., Letterie, M., &
 26 Davis, M. M. (2020). Well-being of Parents and Children During the COVID-19 Pandemic : A
 27 National Survey. *Pediatrics*, 146(4). <https://doi.org/10.1542/peds.2020-016824>
- 28 Petretto, D. R., Masala, I., & Masala, C. (2020). School Closure and Children in the Outbreak of
 29 COVID-19. *Clinical Practice and Epidemiology in Mental Health : CP & EMH*, 16, 189- 191.
 30 <https://doi.org/10.2174/1745017902016010189>
- 31 Reimer, D., Smith, E., Andersen, I. G., & Sortkær, B. (2021). What happens when schools shut down?
 32 Investigating inequality in students' reading behavior during Covid-19 in Denmark. *Research in*
 33 *Social Stratification and Mobility*, 71, 100568. <https://doi.org/10.1016/j.rssm.2020.100568>
- 34 Rolland, B., Haesebaert, F., Zante, E., Benyamina, A., Haesebaert, J., & Franck, N. (2020). Global
 35 Changes and Factors of Increase in Caloric/Salty Food Intake, Screen Use, and Substance Use
 36 During the Early COVID-19 Containment Phase in the General Population in France : Survey
 37 Study. *JMIR Public Health and Surveillance*, 6(3), e19630. <https://doi.org/10.2196/19630>
- 38 Santibañez, L., & Guarino, C. M. (2021). The Effects of Absenteeism on Academic and Social-
 39 Emotional Outcomes : Lessons for COVID-19. *Educational Researcher*, 0013189X21994488.
 40 <https://doi.org/10.3102/0013189X21994488>
- 41 von Hippel, P. T., & Hamrock, C. (2019). Do Test Score Gaps Grow before, during, or between the
 42 School Years? Measurement Artifacts and What We Can Know in Spite of Them. *Sociological*
 43 *Science*, 6, 43- 80. <https://doi.org/10.15195/v6.a3>
- 44 Woodcock, T. A., McGrew, K. S., & Mather, N. (2001). *Woodcock-Johnson III Tests of achievement*.
 45 Itasca, IL : Riverside Publishing.

Supplementary information

S1 Table – List of stimuli for the online arithmetic decision task

Operation	Complexity levels	Pairs of operands	Answers	
			Valid	Invalid
Multiplication	Easy	2x3	6	4
		2x4	8	10
		2x5	10	15
		3x4	12	16
		3x5	15	20
		4x5	20	25
	Advanced	6x7	42	36
		6x8	48	56
		6x9	54	63
		7x8	56	48
		7x9	63	54
		8x9	72	63
Subtraction	Easy	15-12	3	2
		14-12	2	3
		16-13	3	4
		3-2	1	2
		5-3	2	3
	Advanced	4-3	1	2
		7-3	4	3
		8-2	6	4
		9-4	5	6
		18-15	3	2
Addition	Zareki' addition items	16-11	5	6
		19-13	6	5
		5+8	13	12
		4+13	17	15
		9+7	16	15
		15+12	27	29
		13+19	32	34
		17+25	42	43

S2 Table – List of stimuli for the online rhyme task (reading)

Phonology	Orthography	word pairs	Phonology	Orthography	word pairs	
Similar	Similar	presse - tresse	Different	Similar	tabac - hamac	
		main - nain			donc - tronc	
		tard - lard			virus - intrus	
		rouille - fouille			choc - croc	
		miel - ciel			filles - ville	
		local - bocal			amer - ramer	
		table - sable			mille - quille	
		vent - dent			sang - gang	
		sueur - lueur			hiver - boucher	
		folle - colle			dix - prix	
		peau - seau			fusil - avril	
		sac - lac			cours - ours	
	Different	Different		chat - villa	Different	gain - rail
				terre - fer		brosse - botte
				pain - faim		île - ruelle
				sous - doux		part - tir
				soleil - oreille		dire - froid
				cou - loup		bas - pâte
				corps - bord		role - roux
				dos - taux		cas - sport
				place - basse		date - saut
				train - pin		fort - vitre
				bois - poids		beau - madame
				salle - ovale		île - ruelle