



HAL
open science

Habiletés numériques à l'entrée en maternelle et facteurs prédictifs de leur évolution

Florence Bouvier Pouch, Marie-Aline Catier Hauville

► **To cite this version:**

Florence Bouvier Pouch, Marie-Aline Catier Hauville. Habiletés numériques à l'entrée en maternelle et facteurs prédictifs de leur évolution. Sciences cognitives. 2013. dumas-00877929

HAL Id: dumas-00877929

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-00877929>

Submitted on 2 Nov 2015

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.

**ACADÉMIE DE PARIS
UNIVERSITÉ PARIS VI PIERRE et MARIE CURIE
MÉMOIRE POUR LE CERTIFICAT DE CAPACITÉ D'ORTHOPHONISTE**

**HABILETÉS NUMÉRIQUES À L'ENTRÉE EN MATERNELLE
ET FACTEURS PRÉDICTIONNELS DE LEUR ÉVOLUTION**

Directeur : Michel FAYOL

ANNÉE UNIVERSITAIRE 2012-2013

**BOUVIER
POUCH
FLORENCE
Née le 23/02/1971**

**CATIER
HAUVILLE
MARIE-ALINE
Née le 07/04/1974**

Tous nos sincères remerciements

au Professeur Michel Fayol, pour ce beau sujet, les traitements statistiques et sa très grande disponibilité,

à Madame Anne Mirassou, rapporteur,

à tous les enfants qui se sont prêtés de bonne grâce à notre protocole, et à leurs parents qui nous ont autorisés à les tester,

à la municipalité de Sainte-Geneviève-des-Bois (91) et au personnel de la petite enfance de la crèche du Parc et du « multi-accueil » de Sainte-Geneviève-des-Bois, à l'ensemble de l'équipe de la crèche JMMV de Cachan (94) pour leur disponibilité et la qualité de leur accueil,

à Monsieur Bour, Inspecteur de l'Education Nationale de la circonscription de Sainte-Geneviève-des-Bois,

à Mesdames les Directrices et à Monsieur et Mesdames les maître et maîtresses des écoles maternelles de L'Etang, Jean Macé et Marcel Cachin de Sainte-Geneviève-des-Bois pour l'intérêt manifesté pour ce travail et la qualité de leur accueil,

à Monsieur le Directeur et aux enseignantes de petites et moyennes sections de l'école Notre-Dame de Saint-Grégoire (35) pour leur accueil chaleureux et leur implication dans cette étude,

à nos proches, pour leur soutien et leur patience...

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION.....	1
PARTIE THEORIQUE.....	3
1. Synthèse des modèles actuels de la cognition mathématique.....	3
1.1 Le modèle modulaire de McCloskey.....	3
1.2 Le modèle du transcodage asémantique de Deloche et Séron.....	4
1.3 Le modèle en réseau de Campbell et Clark.....	4
1.4 Le modèle du triple code de Dehaene et Cohen.....	5
1.4.1 Une représentation de la quantité.....	5
1.4.2 Une représentation verbale du nombre.....	5
1.4.3 Une représentation spatiale du nombre.....	5
2. Les fondements du nombre chez l'enfant.....	6
2.1 Le développement du nombre grâce à la logique : théorie de Piaget.....	6
2.2 Le développement du nombre grâce à d'autres facultés.....	7
2.2.1 Les origines langagières du nombre.....	7
2.2.1.1 Le langage, source innée du nombre.....	7
2.2.1.2 Le développement du nombre par la manipulation des mots.....	8
2.2.1.2.1 La manipulation de la chaîne numérique.....	9
2.2.1.2.2 Le dénombrement à l'origine du nombre ?.....	9
2.2.1.3 L'organisation des numéraux verbaux.....	10
2.2.1.4 Les effets du langage sur la cognition mathématique.....	11
2.2.1.4.1 Les effets du code verbal.....	11
2.2.1.4.2 La compréhension des épreuves.....	11
2.2.1.4.3 Aptitudes mathématiques et troubles du langage.....	12
2.2.2 Un sens inné du nombre ?.....	13
2.2.2.1 L'estimation des grands nombres.....	13
2.2.2.2 L'accès précis aux petites quantités.....	15
2.2.2.3 Des performances numériques, voire même arithmétiques ?.....	16
2.2.3 Nombre et espace.....	17
2.2.3.1 La représentation spatiale des nombres.....	17
2.2.3.2 La mémoire à court terme visuo-spatiale.....	17

2.2.4	Mémoire de travail et boucle phonologique.....	18
2.2.4.1	L'acquisition du lexique numérique	18
2.2.4.2	La rétention de l'ordre sériel.....	19
2.2.4.3	Les effets de l'administrateur central.....	19
3.	La synthèse opérée par le jeune enfant	21
3.1	Les preuves de ces liens.....	21
3.2	La construction de ces liens.....	22
3.2.1	La synthèse par l'entraînement au dénombrement.....	22
3.2.2	La synthèse par une représentation non verbale du nombre, précédant le langage.....	24
	PROBLEMATIQUE - HYPOTHESES.....	28
	PARTIE PRATIQUE	29
1.	Méthodologie	29
1.1	La construction du protocole	29
1.1.1	Les tests existants	29
1.1.1.1	TEDI-MATH.....	29
1.1.1.2	UDN II	30
1.1.1.3	ZAREKI-R.....	31
1.1.1.4	ECPN	31
1.1.1.5	NUMERICAL.....	32
1.1.1.6	BATELEM	33
1.1.1.7	MATH EVAL	33
1.1.1.8	Conclusions par rapport aux tests existants	34
1.1.2	Le matériel de test	34
1.1.2.1	Le thème retenu et les supports de tests.....	34
1.1.2.2	Les évolutions du protocole	35
1.1.2.3	Les sub-tests.....	36
1.1.2.3.1	Le langage	36
1.1.2.3.2	Les épreuves de mémoire à court terme.....	37
1.1.2.3.2.1	L'empan de chiffres.....	37
1.1.2.3.2.2	L'épreuve de répétition de mots.....	37
1.1.2.3.2.3	L'empan visuo-spatial	37
1.1.2.3.2.4	L'ordre sériel	38
1.1.2.3.3	La chaîne numérique.....	38
1.1.2.3.4	Les épreuves de discrimination.....	39
1.1.2.3.5	Les épreuves de cardinalité	39

1.1.2.3.5.1	La cardinalité en désignation.....	39
1.1.2.3.5.2	La cardinalité en production.....	40
1.1.2.3.6	Les épreuves d'arithmétique	40
1.2	La population étudiée	41
1.2.1	La scolarisation des enfants testés.....	41
1.2.1.1	La population « prématernelle »	41
1.2.1.2	La population scolarisée en maternelle.....	41
1.2.2	Présentation de l'échantillon	42
1.2.3	Caractéristiques géographiques et sociales	43
1.3	Procédure de passation du protocole	43
1.4	Recueil et construction des données	44
1.5	Méthodes d'analyse des données	46
2.	Analyse quantitative des résultats	47
2.1	Approche transversale	47
2.1.1	Analyses descriptives	47
2.1.1.1	Résultats à l'épreuve de pré-requis langagiers	48
2.1.1.2	Résultats à l'épreuve d'empan de chiffres	49
2.1.1.3	Résultats à l'épreuve de répétition de mots	50
2.1.1.4	Résultats du sub-test d'empan visuo-spatial.....	51
2.1.1.5	Résultats aux épreuves d'ordre sériel	52
2.1.1.6	Résultats concernant la chaîne des noms des nombres.....	52
2.1.1.7	Résultats aux épreuves de discrimination de la numérosité.....	53
2.1.1.8	Résultats aux épreuves de dénombrement, « dire combien »	54
2.1.1.9	Résultats aux épreuves de cardinalisation, « donner x ».....	56
2.1.1.10	Résultats aux épreuves d'opérations simples	58
2.1.1.11	Présentation synthétique de l'évolution des résultats	59
2.1.1.12	Influence du sexe	59
2.1.1.13	Conclusions.....	61
2.1.2	Analyses par régression.....	61
2.1.2.1	Résultats en début de petite section (DPS)	61
2.1.2.2	Résultats en milieu de petite section (MPS)	62
2.1.2.3	Résultats en fin de petite section (FPS)	63
2.1.2.4	Résultats en début de moyenne section (DMS)	64
2.1.2.5	Concernant le stade prématernel (PRE)	65
2.1.2.6	Synthèse des analyses de régression	65

2.2	Approche longitudinale	66
2.2.1	Entre le début de petite section et le milieu de petite section.....	66
2.2.2	Entre la fin de petite section et le début de moyenne section.....	68
2.2.3	Synthèse des résultats longitudinaux.....	69
3.	Analyse qualitative des résultats	70
3.1	Description de profils cognitifs	70
3.1.1	Profils homogènes	70
3.1.1.1	Bonnes performances dans tous les domaines	70
3.1.1.2	L'association de performances inférieures à la moyenne à tous les items.....	72
3.1.1.2.1	Quatre exemples d'âge et niveau scolaire différents.....	72
3.1.1.2.2	Evolution de Jean	73
3.1.1.2.3	Cas de Luc.....	75
3.1.1.2.4	Cas de Mathieu.....	76
3.1.2	Profils hétérogènes	78
3.1.2.1	Double dissociation niveau lexical / mémoire phonologique	78
3.1.2.1.1	Bon niveau lexical, bonnes performances numériques et arithmétiques, mais niveau faible en mémoire à court terme phonologique	78
3.1.2.1.2	Cas de Laurent	79
3.1.2.1.3	Cas de Anaïs.....	80
3.1.2.1.4	Bonne mémoire verbale à court terme, bonne discrimination de la numérosité et réussite arithmétique, mais performance lexicale moyenne	81
3.1.2.2	Très bonne compétence verbale et très bonne compétence numérico-arithmétique, mais discrimination des magnitudes moyenne à faible.....	82
3.1.2.3	Dissociation chaîne numérique / cardinalité	84
3.1.2.3.1	Bonne chaîne numérique mais cardinalité moyenne à faible.....	85
3.1.2.3.2	Chaîne numérique moyenne à faible, mais bonne maîtrise de la cardinalité	86
3.2	Etudes de cas longitudinales.....	87
3.2.1	Présentation des résultats.....	87
3.2.2	Commentaire des résultats.....	90
3.2.3	Conclusion des études de cas longitudinales.....	91
	DISCUSSION	92
	CONCLUSION	94

Engagement de non-plagiat

Nous, soussignées, Bouvier, Florence et Catier, Marie-Aline, déclarons être pleinement conscientes que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publiés sur toutes formes de support, y compris l'Internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, nous nous engageons à citer toutes les sources que nous avons utilisées pour écrire ce mémoire.

INTRODUCTION

(Rédaction commune de Florence Bouvier et Marie-Aline Catier)

Les mathématiques appartiennent aux activités cognitives complexes. Elles constituent une partie importante des apprentissages scolaires, et peuvent susciter chez les enfants éprouvant des difficultés, une véritable angoisse, voire un rejet. Même si le rôle traditionnel de l'école est défini comme le lieu où l'on apprend à « lire, écrire et compter », les mathématiques possèdent de véritables spécificités, qui les placent à part des autres apprentissages.

Comme la lecture et l'écriture, les mathématiques font appel à d'autres ressources, comme l'attention, la mémoire, la mémoire de travail. Et comme la lecture et l'écriture, un trouble spécifique, la dyscalculie, est décrit, encore que la prévalence de ce trouble soit très discutée entre auteurs, en raison de son association fréquente à d'autres troubles, en particulier la dyslexie.

Comme la lecture et l'écriture, les mathématiques reposent sur un code. Mais à la différence de l'alphabet, les enfants, avant même de rentrer à l'école maternelle connaissent déjà ce code, et l'utilisent : *« Avant de franchir le seuil de l'école, l'enfant possède en fait, une notion de nombre qui lui a demandé déjà un travail cérébral d'une intensité telle qu'aucun exercice mathématique ultérieur n'en nécessitera jamais de pareil »*. Cette observation est formulée en 1911 au 1er congrès de pédologie [48] de Bruxelles. Les enfants sont en effet capables de compter, sans apprentissage formel. Et certains peuvent déjà effectuer des opérations arithmétiques simples. La lecture et l'écriture, en revanche nécessitent un apprentissage et plusieurs années sont nécessaires pour que l'enfant devienne lecteur et scripteur expert.

L'alphabet est le produit d'une culture, et toutes les civilisations n'ont pas inventé l'écriture. Mais tous les peuples possèdent la notion de quantité, qui sous-tend le nombre. On sait maintenant que les animaux partagent avec l'être humain la capacité de discriminer les magnitudes. Les systèmes numériques sont certes très variables et sont culturels, mais le nombre, (au moins les plus petits d'entre eux) est universel.

Cette universalité du nombre, comme les capacités précoces de l'être humain pour l'utiliser, ont conduit les chercheurs à étudier de façon très détaillée les aptitudes numériques, ou au moins quantitatives, des bébés. Le débat entre auteurs porte sur l'étendue réelle des compétences des bébés, mais l'existence de systèmes de représentation non symboliques de la quantité chez le tout jeune enfant n'est plus discutée. Puis l'enfant accède au langage, et très rapidement, il distingue

puis utilise les mots nombres, il s'en servira pour compter un peu plus tard. L'enfant produit encore des énoncés très rudimentaires, mais le nombre fait déjà partie de son vocabulaire. D'autres concepts complexes, comme le temps, par exemple, ne seront utilisés que bien plus tard.

L'existence d'aptitudes proto-numériques préverbaux, ainsi que la précocité de l'utilisation des numéraux verbaux, conduit à penser que des relations entre les représentations symboliques, et les représentations non symboliques pré-existantes, s'établissent. L'influence réciproque de ces deux sortes de représentation du nombre ont été prouvées mais la façon dont les liens se créent, à partir de quelles habiletés, n'est pas encore réellement connue, et a été peu étudiée (cf. Fayol, 2012 [23]).

L'objet de notre mémoire est de proposer à des enfants, tout juste rentrés à l'école maternelle, ou sur le point de l'intégrer, un protocole balayant rapidement diverses compétences langagières, cognitives, numériques et arithmétiques, afin d'identifier d'éventuelles corrélations entre ces aptitudes, qui pourraient expliquer, au moins en partie, la synthèse qui s'opère chez le jeune enfant. Ce test a été proposé sur cinq périodes différentes du début de la scolarité du jeune enfant, de la fin de la crèche jusqu'au début de la moyenne section de maternelle, pour une tranche d'âge comprise entre 3 et 4 ans environ, tranche d'âge peu étudiée jusqu'alors. Des re-tests ont été également effectués pour étudier l'évolution des habiletés numériques des enfants au cours de la tranche d'âge étudiée.

Le protocole ainsi présenté a permis de mettre en évidence des liens entre performance numérique et certaines habiletés verbales et non verbales.

PARTIE THEORIQUE

(Rédaction de Florence Bouvier)

Dans ce premier chapitre, nous présenterons d'abord une synthèse de l'état actuel des connaissances sur la cognition mathématique et sa modélisation. Nous aborderons ensuite les différentes hypothèses du développement du nombre chez l'enfant.

1. Synthèse des modèles actuels de la cognition mathématique

Différents modèles de la « fonction numérique » chez l'homme ont été proposés depuis 30 ans.

1.1 Le modèle modulaire de McCloskey

Selon le modèle de McCloskey (1985) [60], les capacités numériques de l'être humain sont organisées selon des modules : module d'entrée, module de sortie et module de calcul. Les modules d'entrée et de sortie comportent un sous-système traitant le code verbal et un autre le code arabe. Les traitements sont effectués par un système sémantique central, amodal, dans lequel les nombres sont représentés par des abstractions fondées sur les puissances de 10. Le module de calcul comporte 3 éléments, l'un traitant des faits arithmétiques, l'autre interprétant les symboles pour déterminer la nature du calcul à effectuer, le dernier contrôlant l'exécution du calcul.

On a reproché à ce modèle une conception abstraite du nombre reposant sur les puissances de 10, ce qui semble terriblement lourd à manipuler d'un point de vue cognitif.

Cependant l'avantage de ce modèle est de mettre en évidence les différentes natures des représentations numériques : code écrit arabe et faits langagiers. Les opérations de transcodage sont assurées par le système sémantique central.

1.2 Le modèle du transcodage asémantique de Deloche et Séron

Les auteurs, à partir de doubles dissociations observées chez des patients adultes cérébro-lésés (1987) [19], s'intéressent aux procédures de transcodage. A partir des erreurs commises par les patients, ils définissent le lexique et la syntaxe des nombres en français, et montrent que le respect du lexique et des erreurs de syntaxe sont possibles, comme la situation inverse. Ils relèvent en outre l'existence de 3 classes de nombres au niveau lexical :

- Les unités
- Les dizaines
- Les particuliers (de 11 à 16)

Chaque nombre est défini par la classe à laquelle il appartient, et la place qu'il occupe dans cette classe. Là encore, les auteurs observent deux types d'erreurs : la classe est correcte mais les patients se trompent de rang dans la classe. D'autres peuvent se tromper de classe. Cette dissociation permet d'envisager que lexique, syntaxe, classe et rang dans la classe ressortent de mécanismes différents pouvant être altérés en cas de pathologie.

1.3 Le modèle en réseau de Campbell et Clark

Défini à la même période, ce modèle (Campbell et Clark, 1988 [8]) propose, en opposition avec celui de McCloskey, un système numérique conçu comme un vaste réseau de relations entre des représentations numériques différentes (verbales, arabes) qui s'activent ou s'inhibent selon les moments. Contrairement au modèle précédent pour lequel le nombre est une abstraction unique au sein d'un système sémantique distinct des systèmes de représentation numérique, ce modèle postule qu'il n'y a pas un nombre unique mais plusieurs représentations possibles qui communiquent entre elles.

Il a été reproché à ce modèle d'être incomplet car il n'explique pas comment les représentations s'organisent et communiquent entre elles pour effectuer un calcul par exemple.

1.4 Le modèle du triple code de Dehaene et Cohen

Ce modèle (Dehaene et Cohen, 1991 [16]) reprend la conception modulaire de la théorie de McCloskey, mais également celle de la coexistence de plusieurs représentations numériques. Défini à partir de dissociations observées chez des patients cérébro-lésés, c'est un modèle localisationniste, ce qui en fait sa spécificité. Ce modèle distingue trois fonctions qui seraient localisées dans des zones cérébrales distinctes.

1.4.1 Une représentation de la quantité

Selon ce modèle, l'être humain, comme les animaux, possède un sens des magnitudes qui lui permet de comparer des collections. Cette capacité serait située dans le segment horizontal du sillon intrapariétal. Elle ne permet pas de représentation précise du nombre et fonctionnerait selon le principe d'un accumulateur. On parle donc de « code analogique », c'est-à-dire que la numérosité n'est pas représentée par un symbole, mais directement accessible.

1.4.2 Une représentation verbale du nombre

La deuxième représentation du nombre est verbale, et active une région du gyrus angulaire gauche, elle est donc reliée aux circuits neuronaux du langage. Cette représentation met en œuvre les numéraux verbaux ainsi qu'un certain nombre de tâches arithmétiques.

1.4.3 Une représentation spatiale du nombre

La troisième zone impliquée dans la représentation du nombre se situerait dans le lobe pariétal postérieur supérieur et serait liée à la représentation de l'espace. Proche des zones de la vision, ces circuits permettent l'utilisation du code arabe écrit. On rappelle ici que le code arabe permet le jugement de parité ainsi que les calculs complexes. Il repose sur la base 10, selon un système de position du chiffre dans le nombre écrit.

Les trois modules fonctionnent en réseau afin de pouvoir traiter l'ensemble de la cognition numérique, avec des opérations de transcodage si nécessaire.

Le modèle de Dehaene et Cohen est largement admis aujourd'hui, et nous le décrirons plus en détail ultérieurement.

Ces modèles permettent de mieux comprendre le fonctionnement de la cognition numérique et mathématique, mais ils n'offrent pas d'explication quant au développement du concept de nombre chez l'enfant.

2. Les fondements du nombre chez l'enfant

Plusieurs modèles du développement du nombre chez l'enfant ont été élaborés depuis plusieurs décennies. Ces modèles proposent des explications très différentes les unes des autres.

2.1 Le développement du nombre grâce à la logique : théorie de Piaget

Le plus ancien modèle présenté ici est celui de Piaget, psychologue suisse, présenté dans la première moitié du XXème siècle, qui a dominé pendant plusieurs décennies la psychologie développementale de l'enfant et la pédagogie.

Le développement intellectuel de l'enfant suivrait une succession de quatre stades, permettant au jeune enfant de passer de l'empirisme au raisonnement abstrait à l'adolescence. Le sujet lui-même construit ses connaissances, d'où le nom de constructivisme appliqué à ces théories, la progression étant liée à l'environnement qui pousse l'enfant à percevoir les limites et dépasser ses connaissances.

La maîtrise du concept de nombre repose pour Piaget [72], sur la réussite de l'enfant aux épreuves de conservation : lorsqu'on change la forme ou la disposition d'une collection, en change-t-on pour autant le cardinal ? Tant que l'enfant hésite ou qu'il est sensible aux « leurres perceptifs », le concept de nombre n'est pas acquis : en effet l'enfant n'a pas mis en œuvre de raisonnement logique, dont il aurait conclu qu'il n'y a eu ni ajout ni retrait, et que le cardinal de la collection n'a donc pas été modifié. Piaget n'accorde pas au comptage de rôle dans le développement du concept de nombre : si l'enfant échoue aux tâches de conservation, c'est qu'il n'a pas pris conscience du contenu d'un nombre et n'est pas sorti du « stade de la pensée intuitive ».

Des critiques s'élèvent dès les années 60 (pour une revue, voir Fayol, 1990 [24]).

On reproche notamment à Piaget d'avoir sous-estimé l'impact du langage, de la pragmatique des tâches, ou encore d'avoir limité le concept du nombre aux seules opérations logiques.

En 1967, Mehler [61] démontre que des enfants de 2 ans peuvent réussir de telles épreuves si elles portent sur des bonbons et non des billes. Un peu auparavant Greco [37] (1962), avait montré que lorsqu'on demande aux enfants de dénombrer, dans une situation de conservation, les enfants réussissent cette tâche.

A l'opposé du constructivisme, les années 60 voient en outre émerger les théories innéistes, qui vont modifier radicalement la conception du nouveau-né, jusqu'alors considéré comme dénué de toute habileté cognitive.

2.2 Le développement du nombre grâce à d'autres facultés

2.2.1 Les origines langagières du nombre

2.2.1.1 Le langage, source innée du nombre

Dans les années 1960, les théories du linguiste Chomsky (*Structures syntaxiques*, 1957 [11]) sont très influentes. Selon lui, l'être humain est doté d'une aptitude pour le langage, le jeune enfant pouvant apprendre de façon innée une grammaire universelle. Tous les enfants, même s'ils ne parlent pas dans leurs premiers mois, naissent avec cette capacité d'acquérir le langage.

Cette théorie a été étendue à d'autres aptitudes cognitives, et notamment aux mathématiques : Hurford [45], linguiste (1987), repère d'abord la spécificité des mots « un, deux, trois » dans toutes les langues du monde, qui sont les seuls à être soumis à des variations morphologiques et des irrégularités (cf. « premier », « second », puis « troisième », « quatrième » etc.). De même, un certain nombre de langues possèdent le genre duel (« une paire de » en français, « both of » en anglais, « beide » en allemand, etc.), voire triel, genre qui indique le nombre en lui-même, à la différence du pluriel qui ne le précise pas. Ces mots seraient les plus anciens du lexique numérique humain, de façon universelle. Pour l'auteur, l'émergence du concept de nombre chez le tout jeune enfant repose sur la récursivité qui opère pour l'acquisition du langage et de la syntaxe. Selon Hurford, « la faculté du nombre émerge par l'interaction des caractéristiques centrales du langage avec d'autres aptitudes cognitives liées à la reconnaissance et à la manipulation d'objets et de collections. Les traits caractéristiques de la faculté de langage incluent l'association des mots aux

concepts grâce au signe linguistique et à la syntaxe hautement récursive. Il n'est donc pas nécessaire de postuler l'existence d'une « faculté du nombre », en tant que module distinct de l'esprit ».

Cette conception de l'émergence du nombre chez l'enfant postule que le nombre comme d'autres concepts, repose exclusivement sur le langage.

Wynn [91], tout en déniait une origine purement linguistique aux nombres, observe (1992) que les jeunes enfants, s'ils distinguent tôt les numéraux verbaux des autres mots, ont besoin d'une année supplémentaire pour opérer un lien entre le mot et la cardinalité. Le repérage précoce de la spécificité de ces mots pourrait être retiré d'indices syntaxiques.

D'après les résultats de Wynn, l'enfant commence à compter vers 3 ans et demi : le jeune enfant distingue d'abord « un » des autres numéraux verbaux, sans les associer à une quantité précise. Cette distinction pourrait être tirée de la syntaxe, de l'opposition singulier-pluriel. Puis, de « un », l'enfant passe à la compréhension de « deux », puis « trois ». Lorsqu'il accède à la compréhension de « quatre », il acquiert en même temps la compréhension des autres nombres, et commence à compter. Wynn remarque qu'à l'âge de 2 ans et demi, l'enfant est sensible aux déterminants et à leurs implications sémantiques. Valian montre (1986) [86], que les enfants de 24 mois respectent l'ordre des mots déterminant-adjectif-nom. Soja montre également (1990) [83] que les enfants du même âge comprennent la différence entre « un » et « du », et qu'ils sont également sensibles au singulier ou au pluriel contenu dans les déterminants. Grâce à la capacité innée d'extraire des informations sémantiques des énoncés entendus et d'opérer des classements des types de mots, le jeune enfant serait capable de repérer les mots nombres et de les distinguer des autres mots, puis de leur attribuer une cardinalité.

2.2.1.2 Le développement du nombre par la manipulation des mots

Pour d'autres auteurs, la manipulation de la chaîne numérique (ou « liste des mots-nombres ») permet à l'enfant de développer la cognition numérique et mathématique.

Ces théories prennent pour source l'observation que les jeunes enfants utilisent les nombres et comptent, bien avant tout apprentissage académique.

2.2.1.2.1 La manipulation de la chaîne numérique

Pour Fuson (1982) [27], le dénombrement n'est pas inné, mais il résulte d'un processus d'imitation : le dénombrement est une activité si fréquente que l'enfant y est très fréquemment confronté et qu'il reproduit.

Fuson décrit les différentes utilisations du nombre auxquelles les enfants sont très tôt confrontés. En effet, le nombre n'est pas seulement utilisé pour « dénombrer » et indiquer une valeur cardinale. Le nombre a également une valeur d' « étiquette » (lignes de bus, numéros de trains) ou de « numéro », qui sert à distinguer plusieurs items d'une même sorte. Pour Fuson, on peut observer différentes étapes dans la construction d'une chaîne numérique : la chaîne est d'abord un « chapelet », une comptine dénuée de sens numérique, dans laquelle les mots ne se distinguent pas. Puis, la chaîne devient « insécable », c'est-à-dire que les mots s'individualisent, elle peut être arrêtée à une borne mais elle démarre obligatoirement à « 1 ». Lorsque la chaîne devient sécable, elle peut démarrer au-delà de « 1 », et s'interrompre à une borne, le comptage à rebours devient possible. Ces possibilités permettent la résolution de petits calculs.

Dans la chaîne terminale, le comptage à rebours est maîtrisé, et l'enfant peut compter le nombre d'éléments entre deux limites. Il peut donc résoudre des problèmes plus complexes grâce à la maîtrise de la chaîne numérique.

Pour être fonctionnelle, la chaîne numérique doit également devenir stable (les nombres sont toujours récités dans le même ordre), et conventionnelle (les mots récités respectent l'ordre de la liste des mots numériques).

La chaîne numérique, ou comptine numérique est le premier énoncé produit par le jeune enfant, porteur d'un contenu exclusivement numérique et spécifié. Le niveau de maîtrise de la chaîne numérique par un enfant permet de connaître l'état d'évolution de la dimension langagière des mathématiques.

2.2.1.2.2 Le dénombrement à l'origine du nombre ?

Gelman et Gallistel expliquent (1978) [34] que l'enfant naît avec la faculté innée de compter, qu'il n'est donc pas nécessaire de la lui enseigner. Pour pouvoir compter avec exactitude, l'enfant devra respecter 5 principes :

- 1) La chaîne numérique doit être stable (être récitée toujours dans le même ordre) et conventionnelle (respecter l'ordre des nombres) ;
- 2) Lorsqu'il dénombre, l'enfant doit respecter la correspondance terme à terme mot-objet ;
- 3) Le dernier mot prononcé indique la cardinalité de l'ensemble ;
- 4) Les objets à compter peuvent être d'une nature différente, sans que cela n'influe sur le cardinal ;
- 5) On peut compter une collection dans n'importe quel ordre, le cardinal sera toujours le même. Il y a « non-pertinence de l'ordre ».

Pour ces auteurs, l'émergence du concept de nombre repose donc d'abord sur la capacité innée à utiliser les numéraux verbaux.

2.2.1.3 L'organisation des numéraux verbaux

Wynn montre (1990) [90] que l'enfant dès 2 ans et demi distingue les mots-nombres des autres types de déterminants accolés au nom et ne se trompe pas sur la place du déterminant numérique dans le groupe nominal.

Contrairement aux représentations non verbales du nombre, sur lesquelles nous reviendrons, le système numérique verbal est culturel, et varie fortement d'une langue à un autre. Il est organisé selon un système de bases : la base « 10 » qui rappelle la référence aux deux mains, est maintenant dominante. On peut également rencontrer (y compris en français) la base « 20 » qui fait référence aux deux mains et aux deux pieds, le code verbal ayant, là encore, repris des systèmes anciens de numération fondés sur la désignation des parties du corps, en l'occurrence les doigts. Mais d'autres populations, comme les Babyloniens, ont utilisé la base « 60 », que l'on a partiellement conservée en français.

Le système verbal est précis, que le nombre soit petit ou grand. En effet, « 3000 » est distinct de « 3001 » ou de « 2999 », alors que nous ne pouvons percevoir la différence entre une collection de 3000 objets et une autre de 3001 objets.

McCloskey [60], puis Dehaene [16] montrent que le code verbal sert non seulement à l'attribution d'une cardinalité exacte aux collections, donc au dénombrement, mais également au calcul mental

et à la résolution de calculs simples, car les faits mathématiques tels que les tables d'addition ou de multiplication seraient stockés en mémoire verbale à long terme.

Par ailleurs, Deloche et Séron (1987) [19] attribuent un « lexique » et une « syntaxe » aux numéraux verbaux, reprenant ainsi des termes spécifiques au langage.

2.2.1.4 Les effets du langage sur la cognition mathématique

2.2.1.4.1 Les effets du code verbal

La simplicité du vocabulaire numérique ou à l'inverse sa complexité a un effet sur la vitesse d'apprentissage de la chaîne numérique : les enfants chinois la maîtrisent plus rapidement que les enfants américains, du fait que leur système traduit clairement la base 10 (Miller, Smith et coll., 1995 [63]). De même, l'empan de chiffres de peuples utilisant des langues qui ont des mots-nombres courts est supérieur à celui de gens utilisant des mots-nombres plus longs, le coût cognitif étant supérieur chez ces derniers.

Séron et Fayol (1994) [80] avaient comparé des Belges francophones à des Français, le lexique numérique utilisé en Belgique ou en Suisse étant plus transparent (« septante » etc.). L'influence de la transparence de la langue avait été constatée dans cette étude, y compris sur les opérations accomplies en chiffres arabes.

De même, Brysbaert, Fias et coll. (1998) [5] comparent les performances obtenues par des francophones et des néerlandophones à des épreuves arithmétiques et constatent l'influence de la langue maternelle : le lexique flamand dit « quatre et vingt », tandis que le français « vingt-quatre ». Les opérations arithmétiques $4+20$ et $20+4$ par exemple sont proposées à des natifs des deux langues. Les auteurs montrent que la vitesse de réalisation de la tâche dépend du lexique : les Français réussissent plus vite « vingt + quatre » en calcul mental, que les Néerlandais, cette addition suit l'ordre des mots de leur lexique numérique. Néanmoins, cet effet s'estompe lorsque les calculs sont présentés en code arabe.

2.2.1.4.2 La compréhension des épreuves

Kilpatrick (1987) [50], démontrait que le choix des items lexicaux joue un rôle dans la compréhension des énoncés en vue de la résolution des problèmes. Et nous avons pu constater lors

de l'élaboration du protocole, que l'énoncé de certaines épreuves, imaginées pour des enfants plus grands, était trop compliqué pour des enfants de notre échantillon ([56] : Majerus, Poncelet et coll. 2006, cf. infra). Ces épreuves ont donc été supprimées dans la version finale du protocole.

2.2.1.4.3 Aptitudes mathématiques et troubles du langage

Zesiger (2005) [94] cite deux études longitudinales ayant porté sur des groupes d'enfants atteints d'un trouble spécifique de développement du langage (TDSL) : le premier auteur conclut à une mémoire de travail plus faible, et surtout un temps de traitement plus long, avec un recours plus fréquent au comptage, faute de pouvoir récupérer directement en mémoire à long terme des faits mathématiques déjà mémorisés. Les enfants, pénalisés par une mémoire verbale à long terme déficitaire sont plus lents. Les enfants de cette étude sont meilleurs que ceux de leur « âge langagier », mais leurs performances sont inférieures à celles du groupe d'enfants de même âge mental, non TDSL. Un déficit phonologique, une difficulté de rétention des informations auditives expliqueraient ces difficultés.

Une étude [82] montre (Snowling, Adams, et coll., 2001) qu'à l'âge de 15 ans, les enfants TDSL ont toujours des performances mathématiques inférieures au groupe contrôle, y compris les enfants qui entre l'âge 4 ans et 5 ans et demi semblaient avoir rattrapé leur retard de langage. De plus, ces auteurs identifient deux variables corrélées avec les performances mathématiques : le quotient intellectuel verbal et les habiletés en langage écrit, soit deux variables purement langagières.

L'observation d'enfants TDSL permet de conclure à l'influence d'un trouble du langage sur les performances mathématiques. Ces deux domaines de compétences ne peuvent donc être séparés.

Notre protocole devra donc comporter des items relatifs au code verbal numérique, en testant aussi bien la chaîne numérique que le dénombrement. L'aspect sémantique numérique propre aux déterminants devra également être testé sur notre échantillon composé de très jeunes enfants.

L'importance du langage dans le système numérique vient d'être soulignée, il nous faut maintenant décrire les représentations de la quantité, non symboliques et pré-verbales.

2.2.2 Un sens inné du nombre ?

Bien avant Dehaene, Dantzig (*Number : The Language of Science*, 1940 [14]), postulait que l'être humain naissait avec la capacité de représenter la quantité par un certain nombre de supports préverbaux. Il distingue le « sens du nombre », du dénombrement, qui est spécifiquement humain.

Les théories actuelles s'accordent sur l'existence de deux systèmes d'appréhension de la quantité possédant chacun leurs spécificités.

2.2.2.1 L'estimation des grands nombres

Selon le modèle de Dehaene (1991) [16] - mais cette habileté avait été décrite avant (cf. infra) - nous disposons de la capacité de comparer des quantités et de les estimer. Cette compétence n'est pas propre à l'être humain, elle est partagée par les animaux, des primates bien sûr, mais également des rats ou des pigeons. Ce type de connaissance de la quantité est non symbolique, c'est-à-dire qu'il ne nécessite pas d'utiliser un intermédiaire.

La représentation de la « numérosité » serait organisée selon une échelle logarithmique compressive plus précise quand les nombres sont petits, mais seulement approximative pour les grands nombres. Les nombres figureraient sur une ligne numérique, probablement influencée par le sens de la lecture (Dehaene, Bossini et coll., 1993 [17]), comme le confirme l'étude de Patro et Haman (2012) [71]. On observe un effet de distance ou de ratio : plus les nombres sont éloignés, plus rapide est la réponse à la tâche de comparaison de ces nombres.

Ce code analogique est universel, contrairement au code verbal : les performances d'Amazoniens possédant un lexique mathématique très rudimentaire comparé au nôtre, ne sont pas inférieures à des tâches de détection de la numérosité. En revanche, ces mêmes performances s'effondrent pour des tâches arithmétiques simples, qui font appel à du matériel verbal et exigent de la précision (Pica, Lemer et coll., 2004 [74]).

Pour Gallistel et Gelman (1992) [31], ce système fonctionnerait comme un accumulateur.

Quelle que soit la forme que prend ce procédé d'évaluation de la numérosité, qui fonctionne par discrimination (sur des ratios élevés pour le bébé), il a été constaté qu'il ne s'appliquait pas seulement à la modalité visuelle, mais également à la modalité auditive (Fernandes et Church, 1982 [26]). Certains auteurs trouvent même qu'il fonctionne de manière transmodale : ainsi des

bébés regardent 2 objets quand ils entendent 2 coups de tambour (Starkey, Spelke et coll., 1983 [84]).

Piazza, Facoetti et coll. (2010) [73] montrent que ce système d'estimation des magnitudes numériques s'affine avec le développement cognitif et langagier de l'enfant, et les apprentissages formels jusqu'à l'âge adulte. La même étude constate que les enfants atteints de dyscalculie ont un « sens du nombre » sévèrement altéré, et que le degré de cette altération prédit le degré d'échec à des tâches de manipulation des nombres symboliques. Cependant d'autres études arrivent aux conclusions inverses : Rousselle et Noël (2007) [77] ne constatent pas d'altération des performances sur des tâches de comparaison non symboliques. Ils en concluent que c'est plutôt le passage entre les deux formes de représentation, l'une symbolique, l'autre non symbolique, qui serait altérée chez ces enfants.

A l'inverse, d'autres études (Gilmore, Mac Carthy et coll., 2010 [36]) montrent que les performances numériques non symboliques des jeunes enfants d'environ 5-6 ans, quel que soit leur milieu social, sont un bon prédicteur de leur apprentissage académique des mathématiques, des « mots nombres » et des symboles, indépendamment de l'apprentissage de la lecture ou de leur intelligence générale.

Le résultat de ce type d'expériences suggérerait donc que quel que soit le type de stimulus, le bébé est capable de construire une représentation mentale numérique. A partir du moment où une telle représentation mentale est possible avant le langage, il ne sera guère difficile de la relier à un mot puisque le concept existe déjà.

Cependant, l'existence de telles représentations abstraites est contestée. D'autres expériences ne confirment pas les résultats précités, voire les contredisent (les bébés ne regardent pas préférentiellement la collection d'items dont le nombre correspond au nombre de stimuli sonores : Mix, Levine et coll., 1997 [65]).

Pour certains auteurs, une partie de ces capacités proviendraient de la réaction des bébés à des indices perceptifs. Et lorsque les conditions perceptives des expériences sont contrôlées, des études montrent que la discrimination des magnitudes disparaît (Clearfield et Mix, 1999 [12]), non seulement chez le bébé mais même chez l'enfant de 3 ans (Rousselle, Palmers et coll., 2004 [76]). Huntley-Fenner, Carey et coll. (2002, [44]) montrent que des bébés et même des enfants de 3 à 5 ans (Huntley-Fenner, 2001, [43]) échouent à ce type de tâches, lorsqu'on leur présente des tas de sable, donc des quantités continues, et non plus des objets discrets.

Néanmoins, d'autres études prouvent que la discrimination résiste à l'annulation des indices perceptifs : des bébés de six mois peuvent discriminer des collections sur la base d'un ratio de 1 vs 2, lorsqu'elles sont supérieures à 4 (Xu, Spelke, et Goddard 2005 [93]). L'échec sur des petites collections suggère que la capacité de discrimination, approximative, n'est pas destinée à l'évaluation des petites quantités, et qu'en parallèle existe un autre système qui maintiendrait en mémoire la représentation mentale de 3 ou 4 éléments (Feigenson et al. 2002 [25]). Cependant Izard, Dehaene et coll. (2008) [49], en observant les réponses cérébrales de bébés de 3 mois confrontés à différentes collections (petites ou grandes), obtiennent une réponse quelle que soit la taille du nombre. L'étude conclut à un système de représentation du nombre unique chez le bébé.

Notre protocole devra donc tester le mécanisme de détection des magnitudes.

2.2.2.2 L'accès précis aux petites quantités

En outre, et malgré les conclusions d'Izard et Dehaene, on décrit depuis longtemps (Cattell, 1886 [10]), un mécanisme d'accès immédiat aux petites quantités.

En effet, le « subitizing » ou « subitisation » consiste à la reconnaissance très rapide, sans compter, des petites quantités (de 1 à 4). Cette faculté a également été observée chez les animaux, notamment sur les singes (Matzuzawa, 1985 [59]).

Dehaene y voyait dans ses travaux initiaux la marque de l'accumulateur numérique approximatif, puis révisé sa position dans la dernière édition de *La Bosse des maths* (2010) [18] du fait de la convergence de nombreuses études montrant clairement le statut particulier des trois premiers nombres, qui sont évalués de manière précise, à la différence des quantités supérieures pour lesquelles notre système d'estimation est moins précis.

Le Corre et Carey (2007) [53], expliquent la forte spécificité linguistique des quatre premiers numéraux verbaux relevée par Hurford (1987) [45], par la particularité du système « d'individuation parallèle » (appellation conférée par les auteurs au subitizing), qui consiste en une connaissance exacte des petites quantités. Mais ce système devra nécessairement recourir aux mots pour conceptualiser la cardinalité.

On distingue le subitizing « conceptuel » par lequel on reconnaît des modèles déjà appris (par exemple collections organisées comme les points des faces des dés), du subitizing perceptif, dans lequel aucun apprentissage n'intervient.

Le mécanisme de subitizing implique des compétences de repérage spatial. Pour Trick et Pylyshyn (1994, [85]) le subitizing consiste en un mécanisme pré-attentif de reconnaissance visuelle : des index spatiaux dénommés « FINSTs » (pour Fingers of Instantiation) étant appliqués aux objets pris isolément. Les auteurs montrent que ce procédé devient inopérant lorsque les objets sont superposés et qu'on ne peut les distinguer clairement.

Par ailleurs, « subitiser » ce serait, pour d'autres auteurs, reconnaître des constellations reproduisant des formes géométriques élémentaires : 1 = un point, 2 items forment une ligne, 3 items un triangle, 4 un carré (Mandler et Shebo, 1982, [57]). Au-delà de 4 éléments, plusieurs configurations sont possibles, ce qui expliquerait les limites du subitizing.

Donc, le subitizing ferait appel à la mémoire de travail et aux compétences visuo-spatiales.

Condry et Spelke (2008) [13] concluent ainsi à la coexistence chez les bébés humains pré-linguaux, comme chez l'animal, de deux systèmes innés de représentation numérique : un premier système précis de représentation des quantités jusqu'à 3 ou 4, un autre système approximatif existant pour les plus grands nombres et s'appuyant sur la discrimination selon des ratios. Ce système serait efficace chez le bébé pour un ratio de 2 vs 1, pour s'affiner par la suite (chez les enfants de 3-4 ans : 5 vs 4).

Notre protocole testera indirectement le subitizing, dans les épreuves de cardinalité : la réponse à la question « combien ? » devrait nous permettre de déterminer si les numéraux verbaux sont associés au subitizing pré-verbal, ou non.

Nous venons de voir que le subitizing est en lien avec la représentation de l'espace, mais nous disposons d'autres éléments à l'appui du lien entre nombre et espace, que nous verrons plus loin.

2.2.2.3 Des performances numériques, voire même arithmétiques ?

En 1992 [92], Wynn montre que les bébés, en situation contrôlée, réagissent à des impossibilités mathématiques comme « $1+1=1$ ». Elle en déduit que les bébés possèdent des compétences non seulement numériques, mais également additives et soustractives élémentaires, et ceci avant l'apparition du langage. Ces résultats ont beaucoup été contestés, mais ils ont été reproduits à de nombreuses reprises, sur des bébés, mais également sur des singes (Hauser, MacNeilage et coll., 1996 [40]). Pour Wynn [92], ou encore Gallistel et Gelman (1992) [31], cette habilité arithmétique élémentaire résulte de la capacité à manipuler des symboles, pré-verbaux, mais numériques.

2.2.3 Nombre et espace

2.2.3.1 La représentation spatiale des nombres

Bien avant que l'imagerie médicale ne permette aux neuropsychologues d'établir ces liens, les calculateurs prodiges expliquaient qu'ils « voyaient » les nombres (par ex. Einstein, cité par Houdé dans *La psychologie de l'enfant*, 2004 [42]) et leur attribuaient des particularités spatiales.

Dehaene (1997) [18] trouve des éléments en faveur de l'organisation des nombres selon une ligne numérique. Et Séron, Pesanti et coll. (1992) [79] montrent même qu'une partie non négligeable des sujets de leur étude attribue une couleur aux nombres, donc une caractéristique visuo-spatiale.

Zorzi, Priftis et coll. (2002) [95] montrent que les patients hémi négligents répondent improprement à des questions portant sur des nombres, leur ligne numérique étant déformée du fait de leur négligence.

Par ailleurs le code arabe, système de position, repose lui-même sur une conception spatiale de la représentation écrite des nombres.

2.2.3.2 La mémoire à court terme visuo-spatiale

La mémoire à court terme intervient après le transfert d'informations en provenance de la mémoire sensorielle. Sa capacité est limitée (entre 5 et 9 items). Elle intervient dans les épreuves d'empan endroit ou de tâches de mémorisation n'excédant pas quelques secondes (noter un numéro de téléphone etc.).

Elle ne doit pas être confondue avec la mémoire de travail, qui implique un traitement de l'information stockée en mémoire à court terme (Gaona'ch et Larigauderie, 2000 [28]), en vue de la réalisation d'une opération cognitive plus ou moins complexe. Parmi les tâches sollicitant la mémoire de travail, on trouve les épreuves d'empan envers, ou encore les épreuves de mémoire visuo-spatiale séquentielles (du type « cubes de Corsi »).

Selon le modèle dominant aujourd'hui (Baddeley et Hitch, 1974 [1]), la mémoire de travail est représentée comme un système tripartite : un administrateur central, conçu comme une fonction exécutive, pilote et gère l'ensemble. Il contrôle également l'allocation des ressources nécessaires.

Il supervise deux systèmes esclaves, la boucle phonologique et le « calepin visuo-spatial », ou mémoire à court terme visuo-spatiale.

On a vu que le subitizing nécessite la maintien en mémoire d'une trace visuelle de la collection.

Simon (1997) [81] va plus loin : pour lui, le bébé ne possède pas de représentation du nombre. Il réagirait à la différence du stimulus visuel, d'avec la représentation mentale qu'il s'est créée, par un processus de comparaison terme à terme par rapport à un fichier d'objets gardé en mémoire. Simon conteste l'hypothèse de Wynn (1992, [92]), en déniait toute capacité numérique au bébé.

Enfin, plusieurs études prouvent que l'influence du calepin visuo-spatial dans la performance mathématique est plus importante que celle de la boucle phonologique chez les jeunes enfants (Krajewski et Schneider, 2009 [52]). Une étude de Bannoff, Lefèvre et coll. (2006, [2]) établit une corrélation entre aptitudes au Corsi et compétences numériques précoces (à 4 ans), corrélation qui s'affaiblit ensuite.

Ainsi, il nous semble important de tester, dans notre protocole, la mémoire à court terme visuo-spatiale par le biais d'une adaptation du test de Corsi (Milner, 1971 [64]).

2.2.4 Mémoire de travail et boucle phonologique

Nous avons brièvement décrit le modèle de la mémoire de travail de Baddeley en décrivant l'importance de la mémoire visuo-spatiale à court terme. Mais la mémoire à court terme phonologique et la mémoire de travail interviennent également dans la cognition numérique.

2.2.4.1 L'acquisition du lexique numérique

Des liens ont été montrés entre mémoire à court terme et mémoire de travail : l'exécution de tâches cognitives qui sollicitent la mémoire de travail, est perturbée lorsque l'on charge la mémoire à court terme pour atteindre sa limite. Pour les auteurs du modèle, cette perturbation est la preuve que le système pilote (l'administrateur central) est capable de répartir les ressources entre stockage et traitement, en fonction des besoins de la tâche.

On a vu précédemment toute l'importance du langage dans la cognition numérique. Or le rôle de la mémoire à court terme phonologique a été démontré dans l'apprentissage des mots nouveaux et

la capacité plus ou moins grande à acquérir des mots nouveaux, c'est-à-dire constituer un stock phonologique à long terme. Gathercole et Baddeley (1989, [32]) ont montré que des enfants souffrant d'un TDSL possédaient de faibles capacités d'apprentissage du lexique, ainsi qu'un stock phonologique à court terme déficitaire.

Dans notre étude, une faible capacité de la mémoire phonologique pourrait se répercuter à la fois sur le plan lexical général et sur celui de la taille de la chaîne numérique qui contient l'intégralité du lexique numérique. De fait, quelques études montrent (Imbert, 2002 [47], Noel, 2004 [68]) que les enfants de maternelle qui ont de moins bonnes compétences mnésiques produisent une chaîne numérique moins étendue et moins élaborée que leurs pairs. Cet impact sur la chaîne numérique produit alors en cascade une procédure de dénombrement moins fiable et moins mature.

2.2.4.2 La rétention de l'ordre sériel

Les épreuves de mémoire à court terme verbale impliquent que l'examineur énonce quelques mots que le sujet doit répéter, dans le même ordre. Répétition des items et « ordre sériel » de ces derniers, sont deux aspects de la mémoire phonologique habituellement regroupés. Mais pour Majerus, Poncelet et coll. (2006, [56]), il convient de les distinguer car si les deux ont un impact sur le développement du lexique, l'effet ne serait pas le même, notamment en fonction de l'âge : la corrélation est plus élevée entre l'ordre sériel et le niveau du lexique à 4 et 6 ans, mais pas à 5 ans, âge auquel la mémoire à court terme - restitution de l'item joue un rôle plus important.

Aussi, il nous a semblé utile d'élaborer des tâches de pure mémoire verbale à court terme, et d'autres tâches ciblées sur la rétention et la restitution de l'ordre sériel d'une collection.

2.2.4.3 Les effets de l'administrateur central

Les capacités tant de mémoire à court terme que de mémoire de travail croissent très fortement entre 2 et 6 ans, notamment l'empan endroit, plus faiblement ensuite (Dempster, 1985, [20]), alors que le développement intellectuel est encore très important pendant l'enfance et l'adolescence. En revanche, on observe une croissance régulière des performances aux tâches d'empan envers, jusqu'à l'adolescence : en effet, il s'agit d'une épreuve dépendant des fonctions exécutives associées neuro-anatomiquement aux lobes frontaux, dont la maturation se poursuit tardivement.

On a vu plus haut que pour certains auteurs (Simon, 1997, [81]), le subitizing reposerait sur la comparaison de stimuli visuels à des représentations mentales préexistantes, par un processus de terme à terme qui sollicite la mémoire de travail.

Pour Klein et Bisanz (2000, [51]), l'impact des performances en mémoire de travail serait faible en ce qui concerne la partie compréhension conceptuelle des mathématiques. En revanche son rôle serait important dans le calcul mental et la résolution de problèmes.

De plus, les études qui portent sur des enfants atteints de dyscalculie développementale montrent que, plus que la boucle phonologique ou le calepin visuo-spatial, ce sont surtout les performances de l'administrateur central (Geary, Hoard et coll., 1999 [33]) qui sont affectées dans un tel trouble. Les enfants ont donc moins la possibilité de chercher en mémoire à long terme des faits mathématiques mémorisés, et doivent recourir à des stratégies de dénombrement, qui sont justement moins efficaces que celles de leurs pairs.

La mémoire à court terme et la mémoire de travail jouent donc un rôle dans le développement des compétences mathématiques. Mais l'âge des enfants composant notre échantillon nous a conduites à surtout explorer la mémoire à court terme. Les tâches d'arithmétique élémentaire proposées en fin de protocole sollicitent néanmoins également la mémoire de travail.

Nous venons de décrire des habiletés verbales, et d'autres non verbales préexistant à l'apparition du langage. L'effet de toutes ces compétences a été démontré sur la construction du concept de nombre. Or, le jeune enfant, avec l'entrée dans le langage et l'acquisition du système numérique verbal, va devoir mettre en relation l'ensemble de ces compétences qui vont servir au développement d'un système numérique modulaire mais unique, dont le langage servira de représentation principale. Nous allons tenter de mettre en évidence ces liens.

3. La synthèse opérée par le jeune enfant

On a vu que les conceptions actuelles du nombre sont en faveur de la coexistence de plusieurs modules du nombre. Quelles sont les preuves de ces liens et comment expliquer leur émergence ?

3.1 Les preuves de ces liens

Dans l'examen des différents modèles de la cognition mathématique, nous avons évoqué le modèle de Dehaene et Cohen (1991, [16]) qui repose sur l'examen neuro-anatomique de patients auprès desquels des dissociations ont été constatées. Ce modèle, qui localise dans des zones cérébrales spécifiques différents traitements du nombre, implique nécessairement un fonctionnement en réseau, par exemple pour les tâches de transcodage.

D'autres auteurs ont prouvé l'existence de liens structurels entre la représentation non symbolique des nombres et le code verbal. Dans le système non verbal de discrimination des numérosités, on trouve un effet de taille (la tâche de discrimination est mieux réussie sur de petites quantités), et un effet de distance (il est plus simple de discriminer 60 de 80, que 60 de 65). Or ces deux effets ont été retrouvés dans des tâches de comparaison de paires de chiffres ou de paires de mots nombres (Buckley et Gilman, 1974, [6]). Seule l'influence du système de discrimination des magnitudes sur l'organisation du code verbal numérique - pourtant précis et fondé sur une représentation discrète des nombres - peut expliquer la présence de ces deux effets dans des tâches verbales.

Par ailleurs, de nombreuses études confirment ces liens notamment parce que la capacité de discrimination des numérosités s'améliore avec l'âge (Van Oeffelen & Vos, 1982, [88]).

Mundy et Gilmore (2009, [67]) démontrent des liens dans les deux sens entre capacités symboliques et non symboliques, ces liens étant non seulement prédicteurs de la performance numérique future, mais également de la capacité à apprendre de nouvelles procédures arithmétiques.

3.2 La construction de ces liens

Plusieurs hypothèses sont proposées actuellement pour expliquer comment l'enfant réussit à faire le lien entre toutes ces habiletés.

3.2.1 La synthèse par l'entraînement au dénombrement

Nous avons déjà évoqué le dénombrement, comme étant, inné ou non, à l'origine du concept de nombre. Pour les auteurs suivants, le dénombrement répété permet à l'enfant d'accéder à la compréhension de la cardinalité, faisant ainsi le lien entre des mots et des représentations non verbales du nombre.

Dès 1983, Resnick [75] intégrait toutes les connaissances réunies sur les aspects de la cognition numérique et mathématique, en proposant un modèle de développement du nombre chez l'enfant selon sept étapes :

- Le bébé possède d'abord des compétences quantitatives pré-verbales ;
- Puis le grand bébé, quand il commence à parler, utilise des termes quantitatifs non numériques (« un peu », « beaucoup »), qui permettent d'opérer des comparaisons : « plus que », « plus grand que » etc. ;
- Avec la troisième étape, l'enfant commence à utiliser les « mots-nombres », pour le dénombrement. Pour Resnick, c'est au cours de cette étape que l'enfant va intégrer la chaîne numérique à ses aptitudes quantitatives proto-numériques. C'est d'ailleurs cette étape qui est l'objet de notre étude, dont l'objectif est d'identifier quelles compétences non verbales soutiennent cette mise en correspondance chez l'enfant ;
- A force de dénombrer, l'enfant va pouvoir manipuler les nombres eux-mêmes. Les nombres abandonnent alors le statut de déterminants d'autres objets, pour devenir objets du raisonnement par eux-mêmes ;
- Avec la cinquième étape, l'enfant atteint les nombres supérieurs à 10, et maîtrise la base 10 ;

- A la fin de la sixième étape, l'enfant pourra opérer toutes sortes de décompositions possibles d'un même nombre ;
- Avec la septième étape, l'enfant dépasse l'application automatique des algorithmes de calcul, car il les a compris (ex : « je retiens 1 », signifie la somme des unités est supérieure à 10, donc j'ajoute une dizaine dans la colonne des dizaines), (modèle commenté dans Noël, 2005, [70]).

Carey (2001, [9]), propose l'idée que l'enfant, grâce à la pratique répétée du dénombrement se familiarise avec les numéraux verbaux. La manipulation répétée de la chaîne numérique permet de comprendre la façon dont cette suite est ordonnée, c'est-à-dire que le nombre suivant dans la liste signifie « un de plus ». Cette compréhension s'applique d'abord aux premiers nombres « 1, 2, 3, 4 », les nombres plus grands n'étant pas différenciés. Grâce au dénombrement, une « maturation » cognitive va s'opérer afin de parvenir à une généralisation sur les plus grands nombres.

Lipton et Spelke (2005, [55]) montrent que des liens précis et exacts sont établis entre le mot et la cardinalité correspondante, dès lors que ce mot est rentré dans la séquence de comptage que l'enfant maîtrise. Les auteurs montrent également que la capacité d'évaluation d'une collection, qui fait donc appel au sens de magnitude numérique, évolue parallèlement à l'entrée progressive des nombres dans la zone de comptage : la cardinalité d'une collection peut être estimée correctement seulement si l'enfant, maîtrise le dénombrement au moins jusqu'à cette cardinalité. Donc code analogique et code verbal interagissent pour un développement parallèle.

Par ailleurs, une forte spécificité des nombres 1, 2, 3 et parfois 4 est constatée. Certes ce sont les premiers mots de la chaîne numérique, donc ceux qui sont connus et maîtrisés le plus tôt. Même si certains auteurs voient dans le subitizing l'origine de cette spécificité, la représentation exacte des quantités 1, 2 et 3 ne permet pas pour autant d'en extraire la cardinalité : seul l'accès au « mot-nombre » le permettra car ce dernier donne une représentation explicite de la quantité.

Les auteurs soulignent que « l'invention » du dénombrement par chaque enfant constitue une forte avancée conceptuelle car les facultés innées ont des limites, alors que le dénombrement n'en a pas. En effet, le subitizing est limité à 4, et le sens de la numérosité ne fonctionne que par un effet de ratio. Il ne permet donc pas d'être précis.

Selon Le Corre et Carey (2007, [53]), la chaîne numérique est l'outil verbal dont l'enfant a besoin pour dépasser ses compétences innées et parvenir au dénombrement, qui permet la représentation symbolique exacte de n'importe quelle cardinalité.

Cette hypothèse est émise parallèlement au modèle théorique du triple code de Dehaene car pour Le Corre et Carey, le sens de la magnitude numérique n'intervient pas dans la construction conceptuelle des cardinaux. De plus, elle remet en cause le principe d'une ligne numérique unique sur laquelle tous les nombres seraient organisés. Les nombres ne seraient pas « égaux », car les nombres « 1, 2, 3, 4 » sont construits en combinant deux relations d'ordre :

- la compréhension de l'ordre séquentiel de la chaîne numérique : 2 vient après 1, 3 vient après 2 etc.
- et la cardinalité traduite par une addition d'unités : (i), puis (ii), puis (iii).

Chaque numéral serait relié à une quantité par un processus de terme à terme, qui trouve son origine dans le mécanisme d'individuation parallèle.

Ces théories expliquent que l'enfant, en s'entraînant à compter va comprendre les relations d'ordre entre les nombres. Pour d'autres auteurs, la représentation pré-linguistique du nombre va se greffer sur le système symbolique verbal, après être passé par un autre support symbolique, plus simple.

3.2.2 La synthèse par une représentation non verbale du nombre, précédant le langage

Chacun a pu constater que les enfants comptent naturellement sur les doigts... et les adultes également lorsqu'ils se retrouvent face à un dénombrement compliqué. Le recours aux doigts est une façon simple de soulager la mémoire de travail.

On remarque également que les systèmes verbaux des nombres ont la plupart pour base 10 ou 20, ce qui correspond soit seulement aux doigts des mains, soit aux doigts des mains et des pieds. Certains peuples ont des représentations corporelles du nombre très sophistiquées, allant au-delà de 20 (Ifrah, 1994, [46]).

Bien longtemps, avant le constructivisme, l'innéisme et les modèles neuropsychologiques des fonctions supérieures, Descoedres (1930, [21]), une pédagogue suisse du début du XXème siècle, observait le développement des enfants de 2 à 7 ans, en leur soumettant des tests de langage et de mathématiques, issus des travaux de Binet et Decroly. Elle rapporta le comportement d'un enfant

âgé de 4 ans 4 mois. Il ne connaissait que les noms des deux premiers nombres (ce qui nous étonne aujourd'hui, de la part d'un enfant de cet âge) mais en présence de 3 objets, il montra 3 doigts, en disant « ça c'est plus que deux, c'est comme ça ». Et il fit de même pour 4, 5, 6 et ainsi de suite jusqu'à 10. Cet enfant, avant de connaître les mots, avait conceptualisé les cardinaux jusqu'à 10 et avait trouvé un moyen de les évoquer.

Un auteur va même jusqu'à prôner la pédagogie du nombre par l'usage des « collections-témoins de doigt » (Brissiaud, 1989, [4]). En effet, selon lui, l'utilisation des collections-témoins de doigts évite à l'enfant de se retrouver piégé par le « comptage-numérotage ». Dans le comptage-numérotage, l'enfant en même temps qu'il compte, attribue une étiquette verbale à chaque objet compté : « un », « deux », « trois » etc. Ce n'est pas pour autant qu'il attribue une valeur cardinale à chacun des mots-nombres, cette étiquette peut être un simple numéro, sans valeur numérique. L'enfant peut même avoir remarqué que l'on répète le dernier mot s'agissant de l'ensemble, il n'a pas forcément compris la valeur cardinale particulière que porte le dernier mot prononcé. Ce « numérotage » explique l'observation faite par Wynn (1990 [90]) : on demande à des enfants de donner un certain nombre d'objets et de les compter ; certains se trompent sur la quantité à donner (car ils ne maîtrisent pas encore ce nombre) et en comptant produisent une chaîne numérique erronée pour finir leur décompte par le mot nombre qu'on leur a demandé (ex : on leur demande 5 objets, ils en donnent 3 mais comptent « 1, 2, 5 »), car ils ont bien observé qu'on dit toujours le dernier mot pour le tout, sans savoir pourquoi.

Cette position va à l'encontre des théories de Gelman (1978, [34]), pour laquelle, au contraire, l'aptitude à compter est innée. Pour Brissiaud, le recours à des « collections-témoins » de doigts permet donc de montrer à l'enfant en même temps que l'on prononce un nombre, la valeur cardinale portée par ce nombre. Et l'enfant doit nommer ces mêmes quantités, sans compter. Ce n'est que plus tard, pour dénombrer des collections plus importantes, que l'enfant commencera à compter.

L'auteur propose alors, comme méthode d'apprentissage des nombres, de passer par la reconnaissance, ou la subitisation (conceptuelle, puisqu'apprise), organisée à l'école, de modèles permettant « une représentation rapide de la quantité correspondante, grâce à la configuration spatiale qui leur est associée » (Brissiaud). La pédagogie se cale alors sur un mécanisme inné de reconnaissance visuelle, permettant ainsi une consolidation des connaissances, et l'élimination d'un comportement (le numérotage) qui ralentit la compréhension.

Noël (2005, [69]) rappelle que l'agnosie digitale ou absence de reconnaissance des doigts accompagne fréquemment l'acalculie. Ces deux troubles sont parfois accompagnés d'une

confusion gauche-droite et d'une dysgraphie dans une pathologie (dont la réalité syndromique est contestée maintenant) dénommée le syndrome de Gertsman (1940, [35]). Cette agnosie serait associée à un dysfonctionnement du gyrus angulaire de l'hémisphère dominant.

De plus, plusieurs études montrent qu'en fin de maternelle de bonnes aptitudes en gnosies digitales sont le meilleur prédicteur des capacités mathématiques, y compris plusieurs années plus tard (Marinthe, Fayol et coll., 2001, [58]). Les habiletés perceptivo-tactiles sont un meilleur prédicteur des compétences arithmétiques que le niveau de développement intellectuel, et les auteurs retrouvent cette même prééminence 3 ans plus tard avec des enfants de 8 ans. Néanmoins, le niveau de développement reste le meilleur prédicteur des aptitudes mathématiques s'agissant des épreuves numériques à dominante verbale (opérations, numération).

Noël (2005, [69]) montre en outre que cette habileté perceptivo-tactile est un indicateur spécifique des capacités mathématiques, car elle n'est pas corrélée aux performances en lecture.

Deux explications sont possibles. Soit comme Brissiaud (1989, [4]), on considère que les gnosies digitales et l'usage des collections témoins de doigts renforcent la compréhension des concepts mathématiques car ils permettent une meilleure représentation mentale des nombres. Soit comme Noël, on adhère à l'hypothèse localisationniste : les représentations numériques et digitales se situeraient dans des zones cérébrales très proches, ce qui expliquerait l'influence réciproque de ces deux aptitudes.

Les conclusions des deux études de Marinthe, Fayol et coll.[58] d'une part, et Noël d'autre part, démontrent l'indépendance des capacités tactilo-perceptives et du langage dans la construction du nombre, puisque les capacités tactilo-perceptives sont un prédicteur des performances mathématiques non verbales, et qu'elles ne sont pas corrélées aux performances en lecture.

Dans notre analyse de l'émergence des compétences numériques, nous devons donc prendre en compte l'étude des gnosies digitales chez les jeunes enfants. Puisque ces gnosies constituent un autre support symbolique du nombre, qui préexiste aux numéraux verbaux, et en fonction des deux études précitées, nous chercherons à quelles aptitudes quantitatives non symboliques elles peuvent être corrélées.

Toutes ces théories sont intéressantes en ce qu'elles tentent d'expliquer la façon dont les différentes représentations du nombre et de la quantité vont permettre à l'enfant de construire un système

complexe. Mais aucune n'explique réellement comment, et vers quel âge des habiletés aussi différentes que l'attention spatiale ou le langage entrent en connexion pour décrire la même réalité.

Le modèle récent des « chemins » (« pathways »), de Lefevre, Fast et coll. (2010, [54]), qui a confirmé chez des enfants âgés de 4 ans 6 mois à 7 ans 6 mois la contribution du langage, du sens du nombre (subitizing et magnitude) et de l'attention spatiale (en bref, les modules de Dehaene), dans les premières procédures numériques et arithmétiques, ne l'explique pas non plus. De plus, les enfants de la tranche d'âge étudiée ont déjà mis ces compétences en relation, car ils ont déjà une représentation numérique, et ont déjà reçu un enseignement, même limité, des mathématiques.

Nous tenterons de mesurer, chez des enfants plus jeunes encore, quelles habiletés contribuent à la performance mathématique, en testant toutes celles que nous venons de décrire.

PROBLEMATIQUE - HYPOTHESES

(Rédaction commune de Florence Bouvier et Marie-Aline Catier)

Le développement des compétences logico-mathématiques chez le jeune enfant est sous-tendu non seulement par le développement du langage mais aussi par le développement de compétences non-verbales.

Notre étude porte sur la façon dont le jeune enfant, aux alentours de 3 ans, réussit à mettre en relation ces deux sortes d'aptitudes (non symboliques et symboliques) pour mettre en place un système numérique et mathématique.

Notre échantillon se situe à un stade de développement où le langage est en pleine expansion, mais son émergence est encore récente. Donc si une ou plusieurs compétences non verbales contribuent à la construction de la représentation des nombres chez le jeune enfant, leur influence doit encore être décelable, même statistiquement par des analyses de régression. Etant donné leur âge, les enfants de notre échantillon possèdent un système numérique verbal peu élaboré. En conséquence, l'influence du langage doit être plus limitée que plusieurs années après lorsque les numéraux verbaux constituent l'essentiel de la représentation du nombre.

Nous allons tester plusieurs habiletés non symboliques ainsi que plusieurs habiletés mathématiques, qui vont nous permettre d'étudier le développement de la cognition mathématique. L'identification de ces compétences non-verbales contribuant au développement logico-mathématique doit nous permettre de modéliser ce développement sur la tranche d'âge étudiée.

Nous formulons donc une première hypothèse : certaines compétences non-verbales ont une influence significative sur les performances numériques et arithmétiques des enfants en début de scolarisation, ainsi que sur l'évolution de ces performances.

Enfin, si notre protocole est suffisamment sensible et pertinent, il pourra servir au dépistage du défaut ou du retard de la construction des compétences numériques et mathématiques chez le jeune enfant entre 3 et 4 ans, car les résultats obtenus sur notre échantillon seront conformes aux études et modèles actuels portant sur chacune des compétences étudiées.

Nous formulons donc une deuxième hypothèse de validité de notre protocole.

PARTIE PRATIQUE

1. Méthodologie

1.1 La construction du protocole

1.1.1 Les tests existants

(Rédaction de Marie-Aline Catier)

Il existe actuellement plusieurs tests qui permettent d'évaluer les performances logico-mathématiques chez l'enfant.

1.1.1.1 TEDI-MATH

TEDI-MATH est un test créé par Van Nieuwenhoven, Grégoire et Noël en 2001 [87]. Il est étalonné de la moyenne section de maternelle à la fin du CE2. Inspiré du modèle modulaire de McCloskey [60], il permet une investigation rapide des compétences de base en mathématiques. L'évaluation porte sur les domaines suivants : le comptage et le dénombrement, la représentation de la numérosité, les opérations logiques, les systèmes numériques (arabe, oral, en base dix), et les opérations arithmétiques.

Il est possible d'envisager une adaptation des items de comptage et de dénombrement pour des enfants plus jeunes, ainsi que de l'épreuve de comparaison de patterns de points dispersés.

En revanche, les opérations logiques telles que sériation (même avec support imagé), conservation et inclusion, ne sont pas encore accessibles aux enfants de petite section de maternelle. Les épreuves portant sur la connaissance du système numérique arabe, de la base 10, des transcodages et des opérations arithmétiques sont aussi à exclure pour de très jeunes enfants.

Les objectifs de TEDI-MATH sont de rechercher des compétences sous-jacentes à l'acquisition des mathématiques, ainsi que des signes d'appel et de dissociation. Nous pourrions nous inspirer de la construction de ce test, en conservant les mêmes objectifs pour une tranche d'âge d'enfants plus jeunes.

1.1.1.2 UDN II

UDN II (qui succède à l'UDN80), est une batterie de tests portant sur la construction et l'Utilisation Du Nombre à partir des épreuves piagésiennes, conçue par Meljac et Lemmel en 1999 [62]. Cette batterie est étalonnée pour des enfants de 4 à 11 ans et permet une exploration approfondie de leurs conduites numériques et logico-mathématiques. Elle comporte seize sub-tests regroupés en cinq domaines stratégiques :

- Cinq sub-tests étudient l'usage du nombre par l'enfant pour décrire des situations, les comparer et pour résoudre certains problèmes pratiques ;
- Cinq sub-tests évaluent le développement de la conservation numérique et non numérique au sens piagésien ;
- Trois sont dévolus à la maîtrise des opérations logiques sous-tendant la compréhension du concept de nombre : sériation, classification et inclusion ;
- Deux évaluent la référence au point d'origine pour résoudre divers problèmes de comparaison ;
- Un sub-test étudie les apprentissages plus scolaires avec le vocabulaire de comparaison, les symboles arithmétiques, les transcodages et l'usage des quatre opérations.

Ce test permet de repérer les convergences et les incohérences dans le raisonnement de l'enfant. Les résultats sont analysés de manière qualitative ; l'interprétation en est délicate et nécessite une connaissance approfondie de la batterie et des théories piagésiennes, ainsi qu'une solide expérience clinique.

Le principe de la catégorie de sub-tests étudiant l'usage du nombre en situation pour décrire-quantifier-comparer peut être repris pour la tranche d'âge d'enfants que nous étudions. Nous nous attacherons en effet à élaborer un protocole le plus écologique possible, proche de situations concrètes d'utilisation des quantités (jeu de marchande), et proposerons des épreuves de comparaison de deux boîtes contenant des fruits (« Laquelle préfères-tu ? ») et des épreuves de comparaison via les doigts de la main.

En revanche, la forme de l'UDN II s'éloigne du principe d'outil de screening que nous souhaitons donner à notre protocole.

1.1.1.3 ZAREKI-R

ZAREKI-R est une batterie créée en 2001 par Von Aster et Dellatolas [89], d'inspiration neuropsychologique, pour l'évaluation du traitement des nombres et du calcul. Elle est étalonnée pour des enfants âgés de 6 ans 6 mois à 11 ans 6 mois.

ZAREKI-R comprend douze épreuves :

- 1) Dénombrement de points
- 2) Comptage oral à rebours
- 3) Dictée de nombres
- 4) Calcul mental oral : additions, soustractions, multiplications
- 5) Lecture de nombres
- 6) Positionnement de nombres sur une échelle verticale
- 7) Répétition de chiffres
- 8) Comparaison de deux nombres présentés oralement
- 9) Estimation visuelle de quantités
- 10) Estimation qualitative de quantités en contexte
- 11) Problèmes arithmétiques présentés oralement
- 12) Comparaison de deux nombres écrits

La tranche d'âge évaluée par ZAREKI-R est au-dessus de celle que nous étudions pour que les items puissent être repris, excepté les épreuves de dénombrement de points et de problèmes arithmétiques présentés oralement qui peuvent être adaptées pour des enfants plus jeunes. L'estimation qualitative de quantités en contexte pourrait être intéressante pour juger si l'enfant comprend le sens et la valeur du nombre, mais ce type d'épreuve semble difficilement réalisable avec un niveau verbal de petite section de maternelle.

1.1.1.4 ECPN

ECPN ou Epreuves Conceptuelles de résolution des Problèmes Numériques, est un test conçu par un groupe d'experts, le groupe CIMETE, en 1995 [38] (et Duquesne, 2003 [22]). Ce test a pour but d'évaluer les démarches de l'enfant et exige peu de connaissances : pas de recours aux faits arithmétiques, utilisation de petites quantités, pas d'écrit. Il n'évalue pas le dénombrement ni le comptage ni le transcodage, ni les faits arithmétiques.

Il est composé de quatre épreuves :

1) Evaluer, avec deux items :

- Des animaux ont chacun des jetons. « Que peut-on en dire ? »

L'enfant peut comparer, compter ; on observe la stratégie qu'il met en œuvre face à cette situation numérique.

- « Parmi les animaux, qui a le plus de jetons et comment le sais-tu ? »

Avant 5 ans, l'enfant utilisera plutôt un scalaire subjectif du type « il y en a beaucoup ». Les vecteurs simples comme « davantage, plus, moins », même s'ils commencent à être compris à partir de 4 ans, ne sont utilisés qu'après 5 ans. Après 6 ans apparaissent enfin les scalaires objectifs « il y en a... ».

- 2) Egaliser des collections. Cette épreuve nécessite une observation qualitative de la stratégie mise en œuvre par l'enfant. Nous pourrions adapter cette épreuve pour notre protocole.
- 3) Quantifier des relations (il faut 1 de plus que...). Cette épreuve n'est pas réussie avant 5 ans, même avec des collections identiques au départ.
- 4) Transformer une relation, c'est-à-dire rechercher l'état initial d'une augmentation. La réussite à cette épreuve nécessite d'avoir acquis le principe de réversibilité opératoire, ce qui n'intervient pas chez l'enfant avant 6 ans.

1.1.1.5 NUMERICAL

NUMERICAL, mis au point en 2000 par Gaillard et son équipe [30], consiste en une batterie d'épreuves testant l'apprentissage du nombre et du calcul pour les enfants ayant déjà effectué une année de scolarisation complète (du CE1 au CM1), c'est-à-dire des enfants de 7 à 10 ans.

NUMERICAL a été créé pour détecter les difficultés dans l'utilisation des nombres chez un enfant en cours d'apprentissage, ainsi que pour étudier comment l'enfant construit les différentes représentations du nombre. Il s'agit d'une épreuve composite avec vingt-sept sub-tests, fondée sur le traitement par modalité. Elle privilégie les représentations orales, analogiques, spatiales et écrites du nombre, par rapport à une batterie comme l'UDN II (d'inspiration piagétienne) qui privilégie l'étude des notions logiques. Elle n'analyse pas les concepts de logique sous-jacents.

L'abord des différentes modalités, notamment des représentations orale et analogique du nombre, peut être gardée pour notre protocole, mais la tranche d'âge évaluée par NUMERICAL est trop haute pour que les épreuves soient adaptables à des enfants de petite section de maternelle.

1.1.1.6 BATELEM

BATELEM est un test à visée pédagogique. Il a été créé en 2001 par Savigny [78] et s'adresse aux enfants de la grande section de maternelle au CE2. Il teste l'acquisition de la chaîne numérique en grande section et en CP en demandant à l'enfant de dénombrer des collections de moins de 10 éléments et de compter de 20 à 38. D'autres épreuves demandent d'égaliser et de comparer des collections. Par exemple, l'enfant devra dire s'il y a plus de canards jaunes que de canards bleus. Ainsi, il étudie aussi l'usage du nombre dans les activités numériques.

BATELEM contient des épreuves intéressantes pour notre protocole, mais notre population d'étude est plus jeune, ses performances sont donc plus limitées (notamment pour la chaîne numérique). Par ailleurs nous souhaitons proposer des manipulations et consignes plus simples pour favoriser l'intérêt et la compréhension des jeunes enfants.

1.1.1.7 MATH EVAL

Le test MATH EVAL d'Heremans (2009) [41], est un test gratuit disponible en ligne sur internet et conçu par un psychologue scolaire. Ce test est plutôt destiné à l'usage des enseignants, enseignants spécialisés, voire même des parents. Il a pour but de déceler les troubles des apprentissages en mathématiques à partir de la deuxième année de maternelle jusqu'à la fin du CE2. Il inclut, outre les activités classiques de dénombrement ou de « récitation de la chaîne numérique », le test du « sens des nombres » selon le modèle de Dehaene, le test des gnosies digitales et du subitizing, c'est-à-dire des activités non verbales. Cependant ces sub-tests sont trop compliqués pour des enfants de 3 ou 4 ans : on ne peut demander à un enfant de cet âge « lequel de ces nombres est le plus grand », car cette question fait appel à un vocabulaire et une sémantique trop abstraits. On ne peut pas non plus demander à de tout jeunes enfants de placer des nombres sur une ligne numérique pour les mêmes raisons. Enfin cette batterie ne teste pas la cardinalité en production que nous souhaitons étudier.

1.1.1.8 Conclusions par rapport aux tests existants

Le protocole que nous souhaitons administrer aux enfants dans le cadre de notre étude est à construire entièrement, car il s'adresse à des enfants plus jeunes que les tranches d'âge testées dans les tests existants. Mais nous pouvons adapter le principe de l'usage du nombre en contexte de l'UDN II. Nous pouvons aussi nous inspirer des épreuves de comptage et de comparaison du TEDI-MATH ou de la BATELEM, de l'épreuve d'égalisation de l'ECPN, ou encore des sub-tests « dénombrement de points » et « problèmes arithmétiques présentés oralement ».

D'autres épreuves, issues des batteries pré-citées testent une partie des compétences non symboliques (discrimination, gnosies digitales...) que voulons également examiner chez le jeune enfant.

Puisqu'en raison de l'âge des enfants de notre échantillon nous sommes amenées à construire intégralement notre protocole, nous allons maintenant présenter le test que nous avons élaboré, en détaillant la justification théorique des différents sub-tests.

1.1.2 Le matériel de test

(Rédaction commune de Florence Bouvier et Marie-Aline Catier)

1.1.2.1 Le thème retenu et les supports de tests

Nous souhaitons utiliser un matériel à manipuler attrayant pour les enfants, résistant, dénué de caractère affectif qui aurait perturbé le test, et facilement reconnaissable. Nous avons opté pour le thème de la marchande, avec des fruits en bois peint, de marque Goki, présentés dans des petites cagettes en bois (cf. photographie en Annexe 1). Les fruits utilisés étaient les bananes, les pommes et les fraises. Nous disposions de six fruits de chaque espèce chacune. Ces fruits ont été utilisés dans diverses épreuves (décrites plus loin) : la cardinalité en production, les épreuves de mémoire verbale, certaines épreuves lexicales (singulier-pluriel : « donne-moi une ... », « donne-moi des... »).

Nous avons, d'autre part, proposé des planches imprimées aux enfants : pour certaines épreuves lexicales, ainsi que les épreuves de numérosité, l'empan visuo-spatial et la cardinalité en dénomination. Les images présentées aux enfants représentaient également des pommes, des bananes et des fraises (cf. ensemble des planches en Annexe 3). L'empan visuo-spatial a été

présenté sur une planche de format A3 sur laquelle des fleurs avaient été imprimées suivant l'ordonnement du « Corsi » (cf. planche de Corsi réduite au format A4, en Annexe 4). L'enfant devait reproduire les trajectoires effectuées par l'expérimentateur sur cette planche en utilisant un oiseau en peluche qui se promenait à travers les fleurs.

A la suite de cette épreuve visuo-spatiale de type « Corsi », l'oiseau, qui venait de se promener « avait faim et devait manger », ce qui nous conduisait aux épreuves de mémoire verbale. En effet, dans les épreuves de mémoire verbale (autres que celle de l'empan de chiffres), nous avons nommé des noms d'aliments, manipulés devant l'enfant, que l'enfant devait ensuite répéter. Nous sommes restées dans le thème des fruits en retenant la pomme et la fraise, et avons ajouté des pâtes, du riz et du pain, aliments reconnus par tous les enfants, et possédant un nom monosyllabique, comme la fraise et la pomme. Les pâtes, le riz et le pain ont été présentés dans des boîtes transparentes de ménage. Nous avons donc utilisé de vrais aliments pour cette épreuve, et non plus seulement des reproductions en bois, ce qui représente une différence avec les autres épreuves.

Une feuille de passation (cf. Annexe 2) a été conçue, tout d'abord comme support de recueil des résultats et des données utiles concernant chaque enfant (nom, prénom, date de naissance, date de passation), mais aussi comme support de déroulement du protocole puisque toutes les consignes y sont indiquées, dans l'ordre à respecter.

1.1.2.2 Les évolutions du protocole

L'objectif du protocole était de réaliser un « screening » suffisamment rapide pour conserver l'attention de jeunes enfants, et suffisamment large pour balayer toutes les compétences mises en jeu (cf. partie théorique) requises dans les habiletés mathématiques. Le protocole a été élaboré au mois de juin 2012, testé à partir du 18 juin 2012 sur des enfants de fin de petite section, et a ensuite un peu évolué, pour diverses raisons.

Pour l'épreuve de lexique, nous avons rajouté trois questions destinées à mieux cerner la compréhension par les enfants du vocabulaire utilisé dans le protocole.

En ce qui concerne l'épreuve de mémoire verbale, nous voulions tester la capacité à repérer le caractère ordinal du nombre et avons commencé à proposer aux enfants l'épreuve de « course des animaux » conçue par Majerus (Majerus, Poncelet et coll. 2006 [56]), consistant à restituer l'ordre d'arrivée à une course de divers animaux. La consigne était trop complexe pour des enfants de cette tranche d'âge. Nous avons alors proposé une variante, correspondant au thème du protocole

(les fruits), d'une sorcière qui faisait de la compote et mettait dans son chaudron des ingrédients dans un certain ordre à restituer. L'épreuve n'a pas été concluante non plus et a été retirée du protocole pour les passations de septembre-octobre 2012 et janvier-février 2013.

Nous avons également proposé en juin-juillet 2012, une épreuve destinée à déterminer si les enfants étaient capables de détecter les erreurs commises par l'adulte dans l'énonciation de la chaîne numérique. Nous avons également éliminé ce sub-test, toujours échoué par les enfants, soit en raison de l'incompréhension de la consigne par l'enfant, soit du fait de l'excès d'adhésion à la question de l'adulte (« Est-ce que je me suis trompée ? – Oui ! Tu t'es trompée !! ») : les enfants n'interrompent pas (ou n'osent pas interrompre) l'adulte en cas d'erreur.

En ce qui concerne les épreuves de numérosité (« Montre-moi où il y a le plus de... »), nous avons réduit le nombre de planches proposées aux enfants pour éviter toute baisse d'attention.

1.1.2.3 Les sub-tests

1.1.2.3.1 Le langage

Le test débute par dix-huit questions lexicales (quinze pour les prématernelles et fin de petite section). Ces questions ont pour but de s'assurer que l'enfant maîtrise en désignation et en production les objets utilisés par la suite, soit manipulés (« Montre-moi la pomme », « Qu'est-ce que c'est ? »), soit imprimés sur les planches (« Montre-moi la balance », « Qu'est-ce que c'est ? »). Nous avons testé également la connaissance des prépositions spatiales (sur, sous, dans, dehors), la compréhension d'adjectifs contraires (petit / grand), la compréhension de la question « montre-moi où il y a le plus de ... » que nous utiliserons par la suite dans les épreuves de discrimination visuelle. Nous terminons la rubrique lexicale par un test de la compréhension de la distinction du singulier et du pluriel (mets « une » pomme, mets « des » bananes).

Cette épreuve est notée sur 15 pour les fins de petite section et prématernelles et sur 18 pour les autres tranches d'âge.

1.1.2.3.2 Les épreuves de mémoire à court terme

Nous nous sommes inspirées des travaux de De Agostini, Kremin et coll. (1996, [15]), ayant exploré, sur la mémoire immédiate phonologique, visuelle et visuo-spatiale d'échantillons importants d'enfants. Nous avons ainsi proposé des épreuves d'empan endroit, de répétition de mots familiers, et de mémoire visuo-spatiale.

1.1.2.3.2.1 L'empan de chiffres

Afin de tester la mémoire à court terme des enfants, nous leur avons proposé une épreuve classique d'empan endroit de chiffres. Nous avons proposé trois empan à 2 chiffres, trois empan à 3 chiffres, trois empan à 4 chiffres et une série de 5 chiffres.

Cette épreuve est cotée de deux façons différentes : un score sur 10 et l'empan maximum réussi par l'enfant.

1.1.2.3.2.2 L'épreuve de répétition de mots

Après la répétition de chiffres, nous proposons aux enfants une épreuve de répétition de 2 mots (2 mots monosyllabiques, 2 mots bi-syllabiques, puis 3 mots bi-syllabiques, ce qui fait 2 puis 4 puis 6 syllabes).

Cette épreuve est cotée sur 3.

1.1.2.3.2.3 L'empan visuo-spatial

Les recherches récentes (par ex. Bull, Espy et coll. 2008 [7]) ont confirmé l'utilité du « Corsi » ou Block Tapping test (Milner, 1971 [63]), pour tester la mémoire de travail visuo-spatiale.

L'enfant était donc confronté à une épreuve de mémoire visuo-spatiale de type Corsi (un oiseau voletant au-dessus de fleurs imprimées dans le même ordre que les cubes du Corsi). Nous avons proposé deux séries à 2 items, deux séries à 3 items, deux séries à 4 items et deux à 5 items.

Cette épreuve est cotée de deux façons différentes : un score sur 8 et l'empan maximum réussi par l'enfant.

1.1.2.3.2.4 L'ordre sériel

Nous avons proposé ensuite trois épreuves destinées à tester tant la mémoire phonologique qu'à examiner la rétention de l'ordre sériel d'une collection (cf. Majerus, Poncelet et coll. 2006, précité). Nous utilisons un oiseau en peluche volant dans des fleurs pour l'épreuve visuo-spatiale précédente. Ensuite, nous proposons cette série d'épreuves en énonçant un certain nombre d'aliments que l'oiseau a mangé, la course dans les fleurs lui ayant donné faim.

Première épreuve : au cours de cette première épreuve nous présentons à l'enfant une série d'aliments que l'oiseau a mangés, en prononçant le nom de ces aliments. L'enfant doit répéter le nom de ces aliments, et les pointe dans le même ordre. Les noms des aliments sont monosyllabiques (fraise pâte pain riz pomme). La fraise et la pomme sont les jouets en bois que nous avons déjà manipulés, les pâtes, le riz et le pain sont de vrais aliments (secs) dont nous nous assurons que l'enfant connaît bien le nom. Il y a deux items à 2 aliments (soit 2 syllabes), un item à 3 aliments et un item à 4.

Deuxième variante : elle consiste à dénommer les aliments en les mettant dans un panier fermé au fur et à mesure. Puis l'expérimentateur vide le panier et demande à l'enfant de redire dans le même ordre ce que l'oiseau a mangé. Cette épreuve comporte deux items à 2 mots, et un item avec 3 mots.

Troisième épreuve : elle est purement visuelle. Nous attirons l'attention de l'enfant sur le fait que nous ne prononcerons pas un mot. Nous mettons les aliments dans le panier sans les dénommer, à l'enfant de dire ensuite, et dans le même ordre, ce que nous avons mis dans le panier. Cette épreuve comporte également deux items à 2 mots, et un item à 3 mots.

L'ensemble de cette épreuve est cotée sur 10.

1.1.2.3.3 La chaîne numérique

Vient ensuite un sub-test concernant la connaissance de la chaîne numérique. L'enfant doit d'abord compter le plus loin possible, avec si nécessaire amorçage de l'adulte (« 1, 2... ? »). Pour vérifier si la chaîne est sécable, nous demandons ensuite à l'enfant de commencer à compter à partir de 3 (avec amorçage en cas de besoin, si la consigne n'a pas été comprise). Enfin nous demandons à l'enfant s'il est capable de compter à l'envers, à partir de 5.

Nous cotons la chaîne numérique en notant jusqu'où la comptine égrenée par l'enfant est conventionnelle. Nous notons si l'enfant peut commencer à 3 et s'il est capable de compter à l'envers. L'épreuve est cotée en deux temps : la première note concerne le plus haut nombre produit par l'enfant, et le comptage à partir de 3 et le comptage à l'envers sont réunis dans une note sur 2. L'enfant obtient donc deux notes, la première représentant le maximum conventionnel de sa chaîne numérique, et la deuxième note sur 2 représente la maturité de sa chaîne numérique.

1.1.2.3.4 Les épreuves de discrimination

Les habiletés quantitatives des enfants s'évaluent de manière classique par des tâches du type « Dis-moi où il y en a le plus ? » (par ex. Halberda, Mazocco et coll. 2008, [39]).

Les enfants sont donc confrontés à une série de planches imprimées destinées à tester leur capacité à discriminer des collections en désignant l'image où il y en a « le plus ». Les images représentent des collections de pommes, de fraises et de bananes et testent différents ratios : 2, 1.66, 1.5, 1.25, 1.11, 1.09.

L'épreuve comportant onze planches est cotée sur 11.

1.1.2.3.5 Les épreuves de cardinalité

Il y a deux types d'épreuves :

1.1.2.3.5.1 La cardinalité en désignation

Le premier type d'épreuve consiste à dire « combien » il y a de fruits ; c'est une épreuve de dénombrement. Nous présentons d'abord cinq planches à l'enfant comportant de 1 à 5 fruits, et l'enfant doit dire combien de fraises, pommes ou bananes sont représentées sur la planche. Nous présentons également une cagette comportant 1 fraise, 1 pomme et 1 banane en demandant à l'enfant combien il y a de fruits, pour tester l'un des critères de la maturité du dénombrement selon Gelman et Gallistel [34], à savoir la possibilité de dénombrer une collection hétérogène.

Cette épreuve servira également à tester le subitizing, en permettant de savoir si un mot est attaché à un modèle non-verbal de représentation des petites quantités, au sens de Le Corre et Carey (2007, [9]).

Après d'autres épreuves que nous détaillerons ci-après, nous montrons 2 bananes puis 3 fraises puis 4 pommes à l'enfant, en lui demandant de nous faire pareil avec ses doigts, c'est-à-dire que nous changeons de support symbolique pour tester la représentation d'une cardinalité.

L'épreuve comporte neuf items et est cotée sur 9.

1.1.2.3.5.2 La cardinalité en production

L'enfant doit produire une cardinalité en répondant par le geste à des consignes du type « donne-moi 5 pommes », « mets 3 bananes » etc. pour les cinq premiers nombres ; on peut parler également d'épreuve de « cardinalisation ».

Il est à noter que l'épreuve n'a été proposée pour les fins de petite section et prématernelles que pour les cardinalités 1, 3 et 4. L'épreuve est cotée sur 3 pour ces enfants interrogés seulement sur les cardinalités 1, 3 et 4. Elle est cotée sur 5 pour l'ensemble des enfants testés en début de petite et moyenne section et en milieu de petite section, chez qui nous avons testé les cinq premiers nombres.

1.1.2.3.6 Les épreuves d'arithmétique

A partir de l'item de production « mets 3 bananes » dans le panier, l'enfant est confronté à une situation soustractive : nous fermons ensuite le couvercle du panier et lui demandons combien il en reste si on mange une banane.

Puis l'enfant doit résoudre une situation additive (« J'ai une pomme dans mon panier, je vais au marché pour en acheter une autre. La marchande me donne une pomme. »). L'expérimentateur rajoute une pomme dans le panier, et demande à l'enfant combien de pommes sont maintenant dans le panier.

Enfin l'enfant doit résoudre une égalisation de collection : nous mettons 3 pommes dans une cagette, et 1 seule dans une autre, et lui demandons que ce soit pareil des deux côtés. Nous acceptons toutes les solutions (3 et 3 pommes ou 1 et 1 ou retirer une pomme d'un côté et la rajouter de l'autre pour avoir 2 et 2...).

L'épreuve arithmétique est cotée sur 3.

1.2 La population étudiée

Notre étude a porté sur la tranche d'âge des 3-4 ans, ce qui correspond au début de la scolarisation à l'école maternelle.

1.2.1 La scolarisation des enfants testés

Nous avons testé deux types de populations :

1.2.1.1 La population « prématernelle »

Nous avons proposé notre protocole aux mois de juin-juillet 2012, à 25 enfants rentrant en petite section de maternelle au mois de septembre suivant. L'âge de ces enfants s'échelonnait entre 30 et 42 mois et était de 38 mois en moyenne. L'écart-type constaté sur cette population est de 3,21.

Les modes de garde des enfants étaient divers, crèche collective, crèche parentale et nourrice, mais majoritairement la crèche collective.

1.2.1.2 La population scolarisée en maternelle

Notre travail porte sur le développement des compétences numériques au début de la scolarisation à l'école maternelle, avec des « re-tests » réguliers permettant d'évaluer l'évolution des enfants, sur un échantillon suffisamment important.

A la toute fin de l'année scolaire 2011-2012, nous avons testé 42 enfants scolarisés en fin de petite section (PS) de maternelle. Au début de l'année scolaire 2012-2013, nous avons testé 41 enfants scolarisés en début de moyenne section (MS) ainsi que 40 enfants scolarisés en début de PS.

Au mois de février 2013, nous avons testé 43 enfants de milieu de PS.

L'ensemble de ces données nous permet donc de suivre le développement des performances du début de la PS jusqu'au milieu de la MS, avec de plus des informations sur la période préscolaire, soit un suivi d'environ 18 mois, portant sur des populations différentes. Nous précisons que 18 enfants interviewés en fin de PS ont pu être re-testés au début de la MS. Par ailleurs, 2 enfants

testés en fin de crèche ont pu être re-testés en début de PS, puis en milieu de PS, soit un suivi longitudinal de 8 mois.

On notera bien que, même si certains enfants ont été testés plusieurs fois, la forme du protocole et son mode d'administration, sans jamais donner les réponses et toujours en restant dans le jeu, permettent d'éviter un « effet re-test ».

1.2.2 Présentation de l'échantillon

Le tableau ci-dessous permet de récapituler les aspects calendaires des passations effectuées, et de présenter les caractéristiques de l'échantillon.

	Stade prématernel	Début PS	Milieu PS	Fin PS	Début MS
Mois de passation	Juin-juillet 2012	Sept-octobre 2012	Février 2013	Juin-juillet 2012	Sept-octobre 2012
Echantillon	25	40	43	42	41
Plus jeune	30 mois	33 mois	37 mois	42 mois	45 mois
Plus âgé	42 mois	44 mois	49 mois	53 mois	56 mois
Age moyen en mois	38 mois	40 mois	44 mois	47 mois	51 mois
Age moyen en années-mois	3 ans 2 mois	3 ans 4 mois	3 ans 8 mois	3 ans 11 mois	4 ans 3 mois
Répartition filles-garçons	50% 50%	50% 50%	46% 54%	52% 48%	49% 51%
Ecart-type sur l'âge en mois	3,21	4,08	3,56	3,63	3,60

La répartition en « tranches d'âge » correspondant à l'avancement scolaire ou « niveau scolaire » des enfants, est un choix d'échantillonnage. En effet, il nous a semblé pertinent d'orienter notre étude selon l'avancement scolaire plutôt que selon l'âge chronologique des enfants, dans la mesure où les premiers apprentissages influencent fortement les performances dans cette période, plus que l'âge chronologique (l'analyse statistique a d'ailleurs montré que les variations d'âge, faibles, au sein d'une même tranche d'âge avaient peu d'influence sur le modèle global). Dans la suite, on parlera de ces niveaux d'avancement scolaire comme les « tranches d'âge » de notre échantillon.

Parmi les enfants « tout-venants » des classes de maternelle, nous avons sélectionné les enfants testés de manière aléatoire, en écartant seulement ceux pour lesquels des difficultés lourdes, voire un handicap, étaient déjà diagnostiqués. La répartition filles-garçons s'est faite également au hasard.

1.2.3 Caractéristiques géographiques et sociales

Pour les enfants de la tranche « prématernelle », les établissements d'accueil « crèche collective du Parc » et « multi-accueil » sont des structures publiques localisées dans la commune de Sainte-Geneviève-des-Bois (91). Les enfants sont issus des classes moyennes de la grande couronne d'Ile-de-France.

La crèche JMMV est une crèche parentale située dans la commune de Cachan (94). Elle accueille un petit nombre d'enfants issus de familles ayant fait le choix d'un mode de garde semi-privé associatif.

En ce qui concerne la population scolarisée, l'ensemble des enfants testés en fin de PS résident en Ile-de-France. Les écoles maternelles de l'Etang, Marcel Cachin, et Jean Macé sont situées dans la commune de Sainte-Geneviève-des-Bois, et représentent la majorité des effectifs testés. Les autres enfants testés en fin de PS ont été vus dans un cadre privé, et non dans leur école. Pour les tranches du début de PS, début de MS et milieu de PS, les écoles de Sainte-Geneviève-des-Bois représentent la moitié des effectifs. L'autre moitié est scolarisée à l'école Notre-Dame située à Saint-Grégoire, en Ille-et-Vilaine (35), au nord de Rennes.

Les écoles de l'Etang et Marcel Cachin sont situées dans des quartiers pavillonnaires de classe moyenne. L'école Jean Macé est classée en ZEP et concentre une population populaire d'origine géographique variée. L'école Notre-Dame de Saint-Grégoire est dans une zone économiquement et socialement favorisée.

Les origines géographiques et sociales des enfants testés sont donc variées.

1.3 Procédure de passation du protocole

Seuls les enfants dont la famille avait signé la demande d'autorisation (cf. Annexe 5) ont été testés, tant en crèche qu'en école maternelle.

En crèche collective, à la demande du personnel, l'adulte-testeur est venu se présenter aux enfants deux fois au préalable et sans apporter son matériel.

En école maternelle, il n'y a pas eu de présentation préalable, mais présentation et participation de l'adulte-testeur à la routine d'accueil du matin.

Les passations en crèche collective se sont déroulées dans une salle fermée mais vitrée avec la présence d'une puéricultrice ou d'une éducatrice, chaque enfant étant testé isolément du reste du groupe. Le fait que la salle soit vitrée a facilité les passations car les enfants les plus réticents ont pu constater le caractère ludique de la passation et se sont finalement prêtés bien volontiers au test. En crèche parentale, les enfants testés étaient isolés du reste du groupe par une paroi et une porte à mi-hauteur, sans être toutefois complètement coupés de la salle principale et des éducatrices qui s'y trouvaient. A l'école maternelle, les passations se sont déroulées dans une salle attenante à la salle de classe, hors de la présence d'un autre adulte que celle de l'examineur.

La durée du test définitif est comprise entre 10 et 15 minutes. Les premières versions du protocole ont dû évoluer notamment pour répondre à cette contrainte de durée : 15 minutes est un maximum à respecter afin de conserver l'attention d'un enfant de 3-4 ans sur l'ensemble du test.

Nous prenons malgré tout le temps de donner les consignes doucement, en les répétant si nécessaire une fois, mais pas plus. Seule la consigne « Peux-tu me dire où il y a le plus de ...? » pouvait être transformée en « Dis-moi où il y a beaucoup de ... » dans le cas où la notion de « le plus » n'était manifestement pas comprise. Pour les autres consignes, aucune reformulation n'est proposée.

Si l'enfant ne répond pas, le score est 0, comme en cas de réponse fausse.

En aucun cas la réponse correcte n'est indiquée à l'enfant, afin d'éviter toute mémorisation, même partielle, des réponses, et de garder ainsi la possibilité de re-tester les enfants quelques mois plus tard.

Les enfants les plus inhibés ou manifestement très en difficulté pour quelque raison que ce soit, ont pu jouer avec le matériel sans que le protocole ne soit déroulé ni que les résultats ne soient pris en compte afin de ne pas fausser le score des enfants « tout-venants ».

1.4 Recueil et construction des données

Les cotations ont été données dans la partie 1.1.2.3 décrivant chaque épreuve du protocole. Nous récapitulons ici sous forme de tableau synthétique les différents sub-tests avec leur mode de cotation et leur note maximale.

Mode de cotation des épreuves

Sub-test	Cotation	Note maximale
Pré-requis langagiers	0/1	18 (15 en prématernelle et fin de petite section)
Empan de chiffres	0/1 empan maximum réussi	10 5
Répétition de mots	0/1	3
Empan visuo-spatial	0/1 empan maximum réussi	8
Ordre sériel	0/1	10
Chaîne numérique	dernier mot-nombre	non limité
Maturité de la chaîne	0/1	2
Discrimination de la numérosité	0/1	11
Dénombrement	0/1	5
Dénombrement avec hétérogénéité	0/1	1
Gnosies digitales	0/1	3
Total Cardinalité – Dénombrement		9
Cardinalité en production	0/1	5
Arithmétique	0/1	3

Pour chaque enfant testé, une fiche de passation (jointe en Annexe 2) est remplie au fur et à mesure des épreuves du test avec tous les scores obtenus par les enfants, ainsi que quelques remarques qualitatives.

Quelques enregistrements audio sont également effectués, mais ne seront pas exploités car ils n'apportent pas d'éléments pertinents pour l'analyse des résultats. Ils ont pu seulement constituer une aide ponctuelle pour affiner certaines réponses des enfants.

Les données brutes sont saisies sous Excel, chaque ligne du fichier correspondant à une passation du test. Pour les enfants vus plusieurs fois dans l'étude longitudinale, il y a donc deux lignes, voire trois lignes. En colonne sont indiquées toutes les variables, d'abord les variables descriptives telles que le nom, la date de naissance et la date de passation permettant de calculer l'âge en mois, la classe, l'établissement scolaire, ensuite tous les scores aux différentes épreuves. Des colonnes sont ensuite créées afin de totaliser les scores pour chacun des sub-tests.

1.5 Méthodes d'analyse des données

Le fichier Excel ainsi constitué nous permet de réaliser différentes analyses statistiques des résultats obtenus.

Nous utilisons Excel et les logiciels JMP de l'éditeur SAS et STATISTICA de l'éditeur Statsoft afin d'effectuer nos analyses et la présentation graphique de certains résultats.

Pour chaque tranche d'âge, nous présenterons :

- une analyse descriptive ;
- une analyse de régression permettant d'évaluer les contributions respectives de variables indépendantes sur les variables dépendantes successivement examinées.

Cette analyse transversale de chaque tranche d'âge sera complétée par une analyse longitudinale permettant d'évaluer les variables influençant le développement des compétences numériques au cours du temps sur un échantillon d'enfants.

L'objectif du travail d'analyse quantitative est d'identifier les variables intervenants dans certaines performances arithmétiques élémentaires que sont :

- dénombrer (c'est-à-dire « dire combien ») COMBIEN
- cardinaliser (c'est-à-dire « donner x éléments ») DONNE
- opérer (ajouter ou enlever des petites quantités) ARITH

chez de très jeunes enfants en tout début de scolarisation.

Les variables retenues sont les suivantes :

les capacités verbales évaluées par une épreuves de sélection lexicale :	LEX
les capacités verbales intervenant en mémoire à court terme,	empan de chiffres : EMP
	répétition de mots : MOT
la capacité de mémoire à court terme visuo-spatiale :	VSP
la connaissance de la chaîne des noms de nombre :	CHN
la capacité des discrimination de quantités :	DIS
en fonction de l'âge de l'enfant :	AGE

Des analyses qualitatives seront aussi menées, notamment sur des profils plutôt atypiques de certains enfants.

2. Analyse quantitative des résultats

(Rédaction de Marie-Aline Catier)

Notre travail combine deux approches, l'une transversale qui porte sur cinq tranches d'âge d'enfants de prématernelle à début de moyenne section de maternelle, l'autre longitudinale qui suit l'évolution des performances d'un groupe limité d'enfants au cours du temps.

2.1 Approche transversale

L'étude porte sur un échantillon de 191 tests effectués auprès d'enfants en fin de crèche c'est-à-dire en âge pré-maternel (PRE), ou début de petite section (DPS), milieu de petite section (MPS), fin de petite section (FPS) ou enfin début de moyenne section (DMS). Des analyses ont été conduites pour chacun des niveaux scolaires.

2.1.1 Analyses descriptives

Dans cette première phase d'analyse, nous présentons l'étendue des scores, les moyennes et les écarts-types pour chaque sub-test, par tranche d'âge d'enfants.

Dans certains cas, nous avons aussi calculé des scores de réussite, en rapportant la performance de l'enfant au score maximum afin de pouvoir comparer plus facilement les résultats.

Pour certains sub-tests, il nous a semblé pertinent également de présenter les pourcentages de l'échantillon atteignant un score donné, notamment pour les épreuves d'empan.

2.1.1.1 Résultats à l'épreuve de pré-requis langagiers

	Prématernel PRE	Début de petite section DPS	Milieu de petite section MPS	Fin de petite section FPS	Début de moyenne section DMS
Note plafond	15	18	18	15	18
Score minimum	5	9	11	1	15
Score maximum	15	17	18	15	18
Moyenne	10,64	14,47	16,11	12,02	16,63
Moyenne corrigée *	12,77	14,47	16,11	14,42	16,63
Score de réussite	70,93%	80,41%	89,53%	81,15%	92,41%
Ecart-type	2,25	2,12	1,97	3,37	1,68
Note z la plus basse	-2,5	-2,57	-2,59	-3,26	-3,93
Note z la plus élevée	1,93	1,18	0,95	0,88	0,81

* proratisation de la moyenne sur 18

Les enfants en début de moyenne section réussissent très bien le sub-test lexical, la plupart d'entre eux saturant l'épreuve.

On note aussi dans le détail des résultats que c'est la compréhension de la notion de « plusieurs » versus « un » qui est la moins bien comprise, même en début de moyenne section, avec un score de réussite à 75% seulement dans cette population (et 40% en PRE, 55% en DPS, 60% en MPS).

En revanche, la notion de « le plus » est plutôt bien comprise dès l'âge prématernel, puisque déjà 84% des enfants de cette tranche d'âge réussissent l'item (et 95% en MPS et FPS).

2.1.1.2 Résultats à l'épreuve d'empan de chiffres

	PRE	DPS	MPS	FPS	DMS
Par rapport à l'ensemble des items proposés :					
Note plafond	10	10	10	10	10
Score minimum	0	0	0	0	0
Score maximum	6	8	10	8	9
Moyenne	2,52	3,2	4,65	4,07	4,95
Ecart-type	1,96	2,44	2,52	2,05	1,97
Note z la plus basse	-1,28	-1,31	-1,84	-1,98	-2,51
Note z la plus élevée	1,77	1,96	2,12	1,91	2,05
Selon l'empan maximum réussi par l'enfant :					
Note plafond	5	5	5	5	5
Moyenne	2,04	2,37	2,86	2,67	3,07
Ecart-type	0,84	0,95	0,94	0,81	0,72
Pas d'empan *	28,00%	20,00%	7,00%	5,00%	2,50%
Empan de 2 *	44,00%	35,00%	28,00%	40,50%	14,50%
Empan de 3 *	24,00%	32,50%	39,50%	38,00%	56,00%
Empan de 4 *	4,00%	12,50%	23,00%	16,50%	27,00%
Empan de 5 *	0,00%	0,00%	2,50%	0,00%	0,00%

* pourcentage de l'échantillon ayant atteint ce niveau maximum d'empan

On constate qu'entre 3 et 4 ans, la plupart des enfants commencent à avoir la capacité de répéter une série de chiffres. Un empan de 3 est atteint par plus de la moitié des enfants en début de moyenne section, à la borne supérieure de la tranche d'âge étudiée.

Les résultats que nous obtenons sont conformes à ceux présentés dans l'étude de De Agostini, Kremin et coll. (1996, [15]) qui montre une évolution sur la tranche d'âge comprise entre 3 et 4 ans, d'un empan de 2 en moyenne entre 3 ans et 3 ans et demi, à un empan de 3 en moyenne entre 3 ans et demi et 4 ans.

2.1.1.3 Résultats à l'épreuve de répétition de mots

	PRE	DPS	MPS	FPS	DMS
Note plafond	3	3	3	3	3
Moyenne	1,12	2,07	2,44	1,61	2,59
Ecart-type	1,17	0,76	0,8	1,13	0,74
Note z la plus basse	-0,96	-2,71	-3,05	-1,43	-3,49
Note z la plus élevée	1,61	1,21	0,7	1,23	0,56
En pourcentage de l'échantillon ayant réussi l'épreuve :					
Répétition de deux mots monosyllabiques	56,00%	87,50%	93,00%	63,00%	95,00%
Répétition de deux mots dissyllabiques	40,00%	92,50%	93,00%	68,50%	90,00%
Répétition de trois mots dissyllabiques	16,00%	27,50%	58,00%	43,00%	73,00%

Les résultats obtenus en fin de crèche et en fin de petite section sont écartés ; le protocole n'étant pas finalisé sur ce sub-test au moment des passations par ces tranches d'âge, les résultats ne sont en effet pas exploitables.

On constate une très nette amélioration des capacités de répétition verbale sur la tranche d'âge étudiée, notamment dans l'épreuve de répétition de trois mots dissyllabiques.

2.1.1.4 Résultats du sub-test d'empan visuo-spatial

	PRE	DPS	MPS	FPS	DMS
Par rapport à l'ensemble des items proposés :					
Note plafond	8	8	8	8	8
Score minimum	0	0	0	0	0
Score maximum	4	3	4	5	6
Moyenne	1,28	0,73	1,72	1,62	2,27
Ecart-type	1,4	1,06	1,45	1,34	1,5
Selon l'empan maximum réussi par l'enfant :					
Note plafond	5	5	5	5	5
Moyenne	1,88	1,62	2,25	2,26	2,51
Ecart-type	0,88	0,87	0,95	0,91	0,9
Pas d'empan *	44,00%	60,00%	30,00%	26,00%	17,00%
Empan de 2 *	24,00%	20,00%	18,50%	26,00%	22,00%
Empan de 3 *	32,00%	17,50%	46,50%	43,00%	56,00%
Empan de 4 *	0,00%	2,50%	5,00%	5,00%	2,50%
Empan de 5 *	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	2,50%

* pourcentage de l'échantillon ayant atteint ce niveau maximum d'empan

On constate que l'empan visuo-spatial augmente très fortement au cours de la première année d'école : alors que 44% des enfants ne réussissent pas du tout cette épreuve avant la petite section, ils ne sont plus que 17% dans ce cas après une année de petite section.

Nos résultats en début de moyenne section tendent vers les conclusions de De Agostini, Kremin et coll. (1996, [15]) pour la première tranche d'âge évaluée dans son étude (4 ans).

2.1.1.5 Résultats aux épreuves d'ordre sériel

	PRE	DPS	MPS	FPS	DMS
Note plafond		10	10		10
Score minimum	épreuve non stabilisée au moment des passations ; résultats non pertinents	0	0	épreuve non stabilisée au moment des passations ; résultats non pertinents	0
Score maximum		7	9		10
Moyenne		3,6	5,11		5,56
Ecart-type		2,05	2,28		2,02
Note z la plus basse		-1,75	-2,24		-2,74
Note z la plus élevée		1,66	1,7		2,19

Le caractère ordinal du nombre est une notion qui semble commencer à émerger pendant le début de la scolarisation, mais elle n'est pas acquise au cours de la petite section et la dispersion des résultats des enfants est encore très grande dans les tranches d'âge étudiées.

2.1.1.6 Résultats concernant la chaîne des noms des nombres

	PRE	DPS	MPS	FPS	DMS
Borne maximale	20	29	49	29	43
Borne minimale	0	1	1	1	3
Moyenne	4,92	5,6	9,5	9,45	18,59
Ecart-type	4,96	5,39	9,29	7,22	12,27
Réussite borne inférieure	16,00%	17,50%	22,00%	43,00%	46,50%
Réussite réversibilité	0,00%	2,50%	2,50%	19,00%	22,00%

Nos résultats montrent bien que la connaissance et la maturité de la chaîne des mots-nombres explosent au cours de la petite section de maternelle :

- la chaîne moyenne passe de 4 à 18 entre le début de la petite section et le début de la moyenne section ;
- en fin de petite section, 43% des enfants parviennent déjà à compter à partir d'une borne inférieure donnée : la sécabilité de la chaîne commence donc à se mettre en place ;
- alors que la réversibilité de la chaîne n'est pas du tout présente avant la petite section, elle est réussie par 19% des enfants en fin de petite section.

2.1.1.7 Résultats aux épreuves de discrimination de la numérosité

	PRE	DPS	MPS	FPS	DMS
Note plafond	11	11	11	11	11
Score minimum	1	0	4	1	4
Score maximum	11	11	11	11	11
Moyenne	6,12	6,57	7,72	5,76	8,51
Ecart-type	2,86	2,25	1,87	2,94	1,63
Note z la plus basse	-1,79	-2,92	-2	-1,61	-2,76
Note z la plus élevée	1,7	1,96	1,76	1,78	1,52
Ratio minimum discriminé (avec un taux de réussite supérieur à 50%)	1,5 (6:9)	1,33 (6:8)	1,25 (8:10)	1,25 (8:10)	1,11 (9:10)

Ce qui est intéressant, c'est de voir que le ratio minimum discriminé augmente très nettement au cours de la tranche d'âge globale des 3-4 ans.

2.1.1.8 Résultats aux épreuves de dénombrement, « dire combien »

	PRE	DPS	MPS	FPS	DMS
Note plafond	9	9	9	9	9
Score minimum	0	0	1	0	1
Score maximum	6	9	9	9	9
Moyenne	2	3,32	5,48	6,4	7
Ecart-type	1,66	2,97	2,39	2,31	2,3
Note z la plus basse	-1,21	-1,11	-1,87	-2,76	-2,6
Note z la plus élevée	2,42	1,9	1,47	1,12	0,86
Détail sur le dénombrement uniquement :					
Dénombrement jusqu'à, en moyenne	1,4	1,82	2,9	3,29	3,88
Pourcentages de réussite sur les cardinalités					
Nombre 1	76,00 %	62,50 %	95,30 %	92,80 %	97,50 %
Nombre 2	ns	52,50 %	72,00 %	83,30 %	85,30 %
Nombre 3	32,00 %	40,00 %	60,40 %	82,90 %	82,90 %
Nombre 4	8,00 %	12,50 %	32,50 %	35,60 %	65,80 %

Les principes de cardinalité et de dénombrement progressent significativement au cours de la première année de maternelle.

Ces résultats incluent également la relation qui s'établit entre le subitizing et les numéraux verbaux des premiers nombres. D'après les données recueillies, le subitizing sur les nombres 1, 2 et 3 s'établirait avant le début de la PS, c'est-à-dire dès le stade prématernel.

Nous constatons qu'entre le début et la fin de la PS, la réponse à la question « combien ? » croît très sensiblement sur les nombres 1, 2 et 3. En fin de PS, la réponse à 3 a rattrapé la réponse à 2. Parallèlement, la réponse sur le nombre 4 augmente, mais reste très inférieure aux performances des enfants sur les trois premiers nombres. Ces résultats sont similaires à ceux relevés par certaines études (par ex. LeFevre, Fast et coll. 2010, [54]).

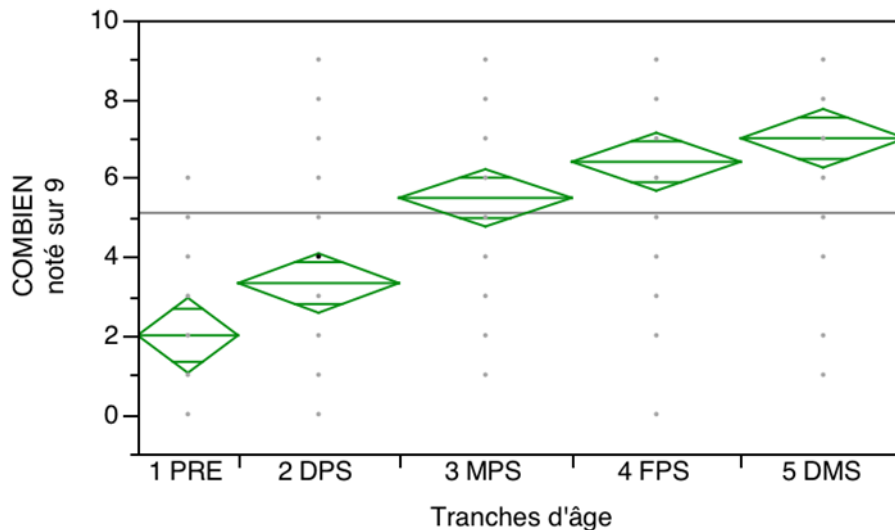
Cette augmentation de la performance est à mettre en relation avec la progression qui a lieu sur la même période au sub-test lexical, puisque ce n'est pas la capacité de subitizing qui s'améliore, mais plutôt la relation entre subitizing et numéraux verbaux.

Pour comparer les résultats des groupes d'enfants constitués selon leur niveau scolaire, nous utilisons un test t de Student entre les groupes deux à deux, et acceptons une probabilité de différence nulle $p < .05$.

Ce test est effectué avec le logiciel JMP ; il nous donne le rapport des différences ordonnées suivants :

Niveau	- Niveau	Différence	P-value
5 DMS	1 PRE	5	<,0001*
4 FPS	1 PRE	4,404762	<,0001*
5 DMS	2 DPS	3,675	<,0001*
3 MPS	1 PRE	3,488372	<,0001*
4 FPS	2 DPS	3,079762	<,0001*
3 MPS	2 DPS	2,163372	<,0001*
5 DMS	3 MPS	1,511628	0,0046*
2 DPS	1 PRE	1,325	0,0326*
4 FPS	3 MPS	0,91639	0,0818
5 DMS	4 FPS	0,595238	0,2628

Graphique d'analyse des variances :



Les résultats obtenus par deux tranches d'âge distinctes sont donc significativement différents, excepté entre les groupes milieu de petite section et fin de petite section, et fin de petite section-début de moyenne section. La différence reste toutefois significative entre milieu de petite section et début de moyenne section (groupes 3 et 5).

Le principe d'hétérogénéité et l'utilisation des gnoses digitales seront abordés davantage dans la partie qualitative.

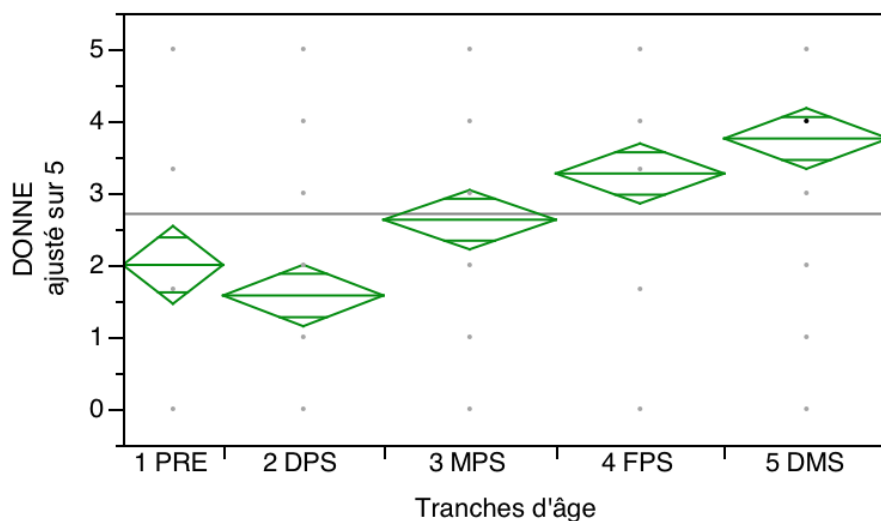
2.1.1.9 Résultats aux épreuves de cardinalisation, « donner x »

	PRE	DPS	MPS	FPS	DMS
Note plafond	5	5	5	5	5
Moyenne	1,28	1,57	2,63	2	3,75
Ecart-type	1,02	1,22	1,45	0,88	1,46
Note z la plus basse	-1,25	-1,29	-1,13	-2,26	-2,56
Note z la plus élevée	3,64	2,81	1,65	2,26	0,85

On constate que la dispersion des scores à ce sub-test est très élevée, mais les résultats obtenus par deux tranches d'âge distinctes sont significativement différents. Le test t de Student effectué avec JMP pour les groupes « tranche d'âge » deux à deux, nous donne le rapport des différences ordonnées suivant :

Niveau	- Niveau	Différence	P-value
5 DMS	2 DPS	2,181098	<,0001*
5 DMS	1 PRE	1,756098	<,0001*
4 FPS	2 DPS	1,694841	<,0001*
4 FPS	1 PRE	1,269841	0,0003*
5 DMS	3 MPS	1,128191	0,0002*
3 MPS	2 DPS	1,052907	0,0006*
4 FPS	3 MPS	0,641934	0,0319*
3 MPS	1 PRE	0,627907	0,0697
5 DMS	4 FPS	0,486256	0,1073
1 PRE	2 DPS	0,425	0,2247

Graphique d'analyse des variances :



L'évolution entre les tranches d'âge début de moyenne section et milieu de petite section, ainsi que milieu de petite section et fin de petite section, puis fin de petite section-début de moyenne section, est significative d'un point de vue statistique.

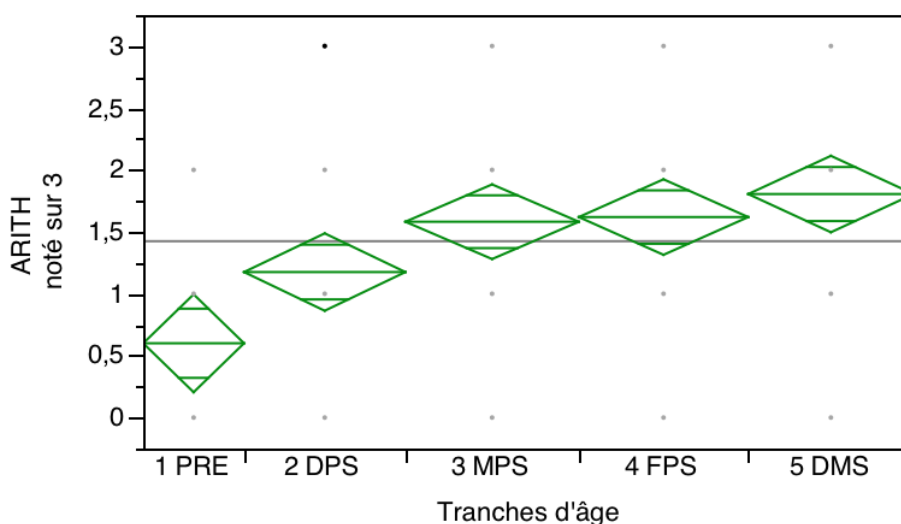
2.1.1.10 Résultats aux épreuves d'opérations simples

	PRE	DPS	MPS	FPS	DMS
Note plafond	3	3	3	3	3
Moyenne	0,6	1,17	1,58	1,62	1,8
Ecart-type	0,76	1,13	0,98	0,99	1,03
Note z la plus basse	-0,85	-1,04	-1,61	-1,64	-1,74
Note z la plus élevée	2	1,61	1,44	1,4	1,16

Les résultats obtenus dans chaque tranche d'âge ne sont pas significativement différents, hormis entre prématornelle et début de petite section, (t de Student, $p = 0,0255$). Cela est probablement dû au peu d'items proposés dans ce sub-test et donc à une très faible sensibilité de l'épreuve.

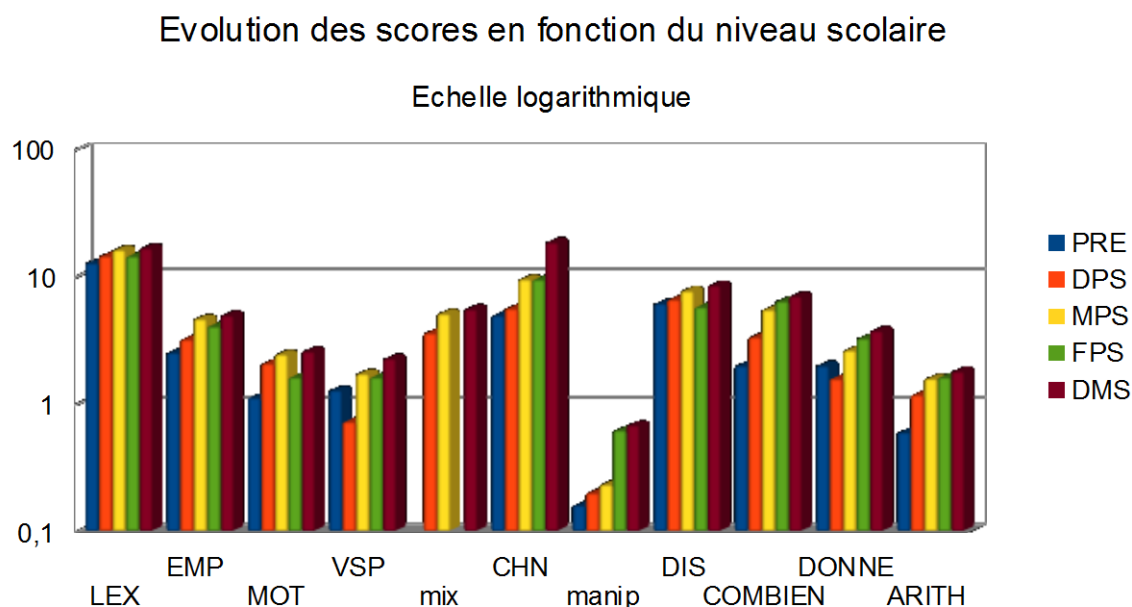
Niveau	- Niveau	Différence	P-value
5 DMS	1 PRE	1,204878	<,0001*
4 FPS	1 PRE	1,019048	<,0001*
3 MPS	1 PRE	0,981395	0,0001*
5 DMS	2 DPS	0,629878	0,0052*
2 DPS	1 PRE	0,575	0,0255*
4 FPS	2 DPS	0,444048	0,0462*
3 MPS	2 DPS	0,406395	0,0663
5 DMS	3 MPS	0,223483	0,308
5 DMS	4 FPS	0,18583	0,3991
4 FPS	3 MPS	0,037652	0,8626

Graphique d'analyse des variances :



2.1.1.11 Présentation synthétique de l'évolution des résultats

Les résultats obtenus aux différentes épreuves par les enfants progressent avec le niveau scolaire de ces derniers. Le graphique ci-dessous, construit avec une échelle logarithmique, montre bien la progression des performances des enfants avec leur avancement scolaire.



2.1.1.12 Influence du sexe

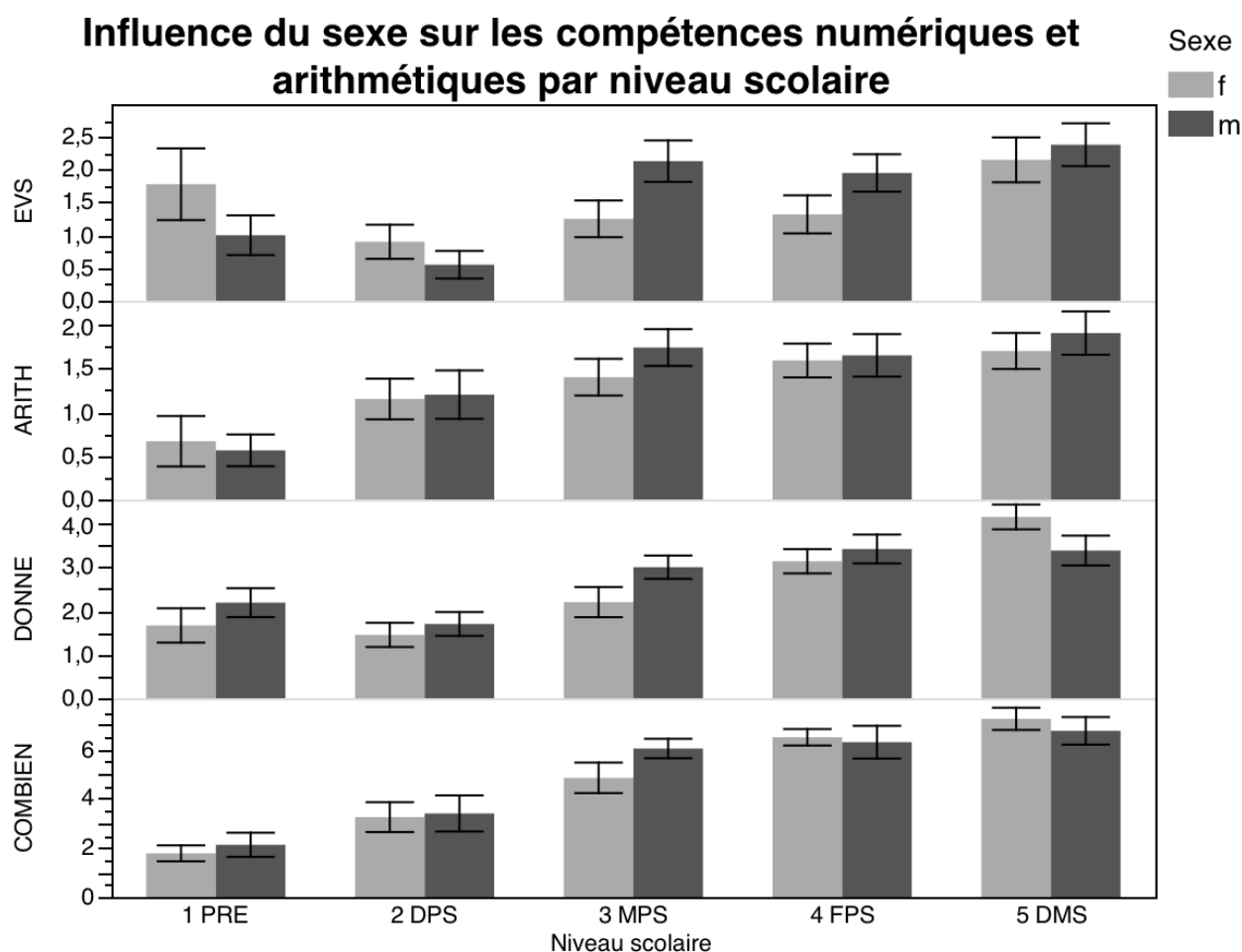
Le protocole a été passé 91 fois auprès de filles et 100 fois auprès de garçons (certains enfants ont pu être testés plusieurs fois).

Pour toutes les comparaisons des scores des filles avec ceux des garçons, nous utilisons un test t de Student de comparaison des deux groupes non appariés (garçons/filles) par niveau scolaire, avec une probabilité d'hypothèse nulle acceptée à $p < .05$.

Aucune épreuve ne révèle de résultats significativement différents entre garçons et filles, sauf :

- l'empan visuo-spatial (VSP) avec des résultats pour les garçons significativement supérieurs à ceux des filles pour la tranche d'âge milieu de petite section ($t = 2,085$ avec $p = 0,0433$) ;
- produire le nombre (DONNE) avec des résultats pour les garçons significativement supérieurs à ceux des filles pour la tranche d'âge milieu de petite section ($t = 1,835$ et $p = 0,0373$) ;

- produire le nombre (DONNE) avec des résultats pour les filles significativement supérieurs à ceux des garçons pour les tranches d'âge début de moyenne section ($t = 1,733$ et $p = 0,0456$).



Ainsi, il apparaît que les filles ont des performances en mémoire visuo-spatiale et aux épreuves de cardinalité légèrement inférieures à celles des garçons en milieu de PS, mais qu'elles rattrapent les garçons voire même les dépassent en début de MS.

Nous avons vérifié que l'âge n'était pas à l'origine de cette différence : au contraire, en milieu de PS, l'âge moyen des filles de notre échantillon est plus élevé que l'âge moyen des garçons sur la même tranche d'âge (20 filles, âge moyen = 44,4 mois, 23 garçons, âge moyen = 43,4 mois).

Nous verrons par la suite que les différences relevées entre garçons et filles au niveau de l'empan visuo-spatial ont leur importance, car la dimension spatiale apparaîtra dans les analyses de régression comme fortement contributive des performances mathématiques et arithmétiques.

2.1.1.13 Conclusions

L'analyse descriptive des données recueillies montre bien que les compétences testées chez les enfants évoluent conjointement. Une analyse par régression est nécessaire afin de déterminer quelles sont les compétences, notamment non verbales, qui influencent de manière significative les performances logico-mathématiques de l'enfant entre 3 et 4 ans.

2.1.2 Analyses par régression

Cette partie de l'analyse a été effectuée avec le logiciel STATISTICA.

Il s'agit de prédire pour chaque tranche d'âge étudiée, les performances aux trois épreuves arithmétiques élémentaires COMBIEN, DONNE, ARITH.

Pour cela, nous avons conduit pour chacune des tranches d'âge deux analyses de régression : l'une standard en entrant une seule fois tous les prédicteurs de manière à déterminer la significativité du modèle global, l'autre ascendante (forward) pour évaluer le poids des variables les plus influentes.

L'objectif est ainsi de déterminer si les compétences verbales et non-verbales testées (lexique LEX, empan de chiffres EMP, empan de mots MOT, empan visuo-spatial VSP, mémoire mixte MIX, maturité de la comptine numérique CHN, discrimination de la numérosité DIS) ont un poids, et si oui, lequel, sur l'accès au dénombrement (COMBIEN), sur la production d'un cardinal ou cardinalisation (DONNE) et sur la résolution de petits problèmes arithmétiques (ARITH).

2.1.2.1 Résultats en début de petite section (DPS)

Pour l'épreuve de dénombrement COMBIEN, le modèle global explique 50% de la variance (ajusté 39%), $F(7, 32) = 4.63, p < .002$.

L'analyse ascendante fait apparaître deux contributions propres : celle du lexique LEX (37% de la variance ; $p < .00005$) et celle de l'empan visuo-spatial VSP, qui ajoute 8% de variance avec $p < .05$.

Pour l'épreuve de cardinalisation DONNE, le modèle global explique 60% de la variance (ajusté 51%), $F(7, 32) = 6.83, p < .0001$.

L'analyse ascendante fait apparaître deux contributions propres : celle du lexique LEX (47% de la variance ; $p < .00001$) et celle de l'empan de chiffres EMP qui ajoute 7% de variance avec $p < .05$. La répétition de mots MOT (autre épreuve de mémoire à court terme) ajoute 4% de variance mais sa contribution n'est que tendancielle ($p = .08$).

En ce qui concerne les épreuves d'opérations ARITH, le modèle global explique 40% de la variance (ajusté 27%), $F(7, 32) = 3.07$, $p < .02$.

L'analyse ascendante fait apparaître deux contributions propres : celle du lexique LEX (30% de la variance ; $p < .0002$) et celle de l'empan de chiffres EMP (qui ajoute 8% de variance ; $p < .05$).

Donc en début de petite section de maternelle (DPS), les performances numériques et arithmétiques sont toutes dépendantes des connaissances lexicales (non liées au numérique). Le dénombrement est corrélé à l'empan visuo-spatial ; ces deux épreuves sollicitent en effet le même type de comportement. Pour la cardinalisation et les opérations arithmétiques, c'est la mémoire à court terme, à la fois empan et dimension numérique verbale, qui intervient davantage.

2.1.2.2 Résultats en milieu de petite section (MPS)

La même démarche qu'en début de petite section est suivie ; seule la variable indépendante correspondant à la performance mnésique mixte (MIX) est retirée du modèle global, dans la mesure où cette épreuve a suscité des difficultés de recueil et que ses résultats sont peu exploitables.

Pour l'épreuve de dénombrement COMBIEN, le modèle global explique 44% de la variance (ajusté 34%), $F(6, 36) = 4.63$, $p < .002$.

L'analyse ascendante fait apparaître la contribution spécifique de deux variables : l'empan visuo-spatial VSP qui explique 28% de la variance ($p < .001$) et celle de la maîtrise de la chaîne de mots-nombres CHN qui ajoute 10% de variance ($p < .02$) ; le lexique LEX ajoute seulement 5% de variance et son impact n'est que tendanciel ($p = .08$).

En ce qui concerne l'épreuve de cardinalisation DONNE, le modèle global explique 48% de la variance (ajusté 40%), $F(6, 36) = 5.61$, $p < .0005$.

L'analyse ascendante fait apparaître la contribution spécifique de deux variables : l'empan visuo-spatial VSP qui explique 24% de la variance ($p < .001$) et celle du lexique LEX qui ajoute 15% de variance ($p < .005$).

Pour l'épreuve d'opérations élémentaires ARITH, le modèle global explique 31% de la variance (ajusté 20%), $F(6, 36) = 2.75$, $p < .03$.

L'analyse ascendante ne fait ressortir que l'impact d'une seule variable, l'empan visuo-spatial VSP qui explique 20% de la variance (avec $p < .003$) ; le lexique LEX ajoute seulement 2% de variance et n'est pas significatif ($p = .25$).

En milieu de petite section, on constate que l'empan visuo-spatial est toujours significativement impliqué dans les performances numériques et arithmétiques. Pour le dénombrement, la maturité de la chaîne des mots-nombre est également contributive de la performance. Pour la cardinalisation, les compétences lexicales interviennent également. Mais le lexique, sur cette tranche d'âge, n'est pas la variable qui intervient le plus fortement dans la prédiction des performances.

2.1.2.3 Résultats en fin de petite section (FPS)

C'est la même démarche qu'en début de petite section qui est suivie.

Pour l'épreuve de dénombrement COMBIEN, le modèle global explique 55% de la variance (ajusté 46%), $F(7, 34) = 6.06$, $p < .0002$.

L'analyse ascendante fait apparaître deux contributions propres : celle du lexique LEX (43% de la variance ; $p < .00001$) et celle de la discrimination des quantités DIS (qui ajoute 5% de variance avec $p = .054$).

En ce qui concerne la cardinalisation DONNE, le modèle standard explique 34% de la variance (ajusté 20%), $F(7, 34) = 2.5$, $p < .05$.

L'analyse ascendante fait apparaître deux contributions propres : celle du lexique LEX (21% de la variance ; $p < .05$) et celle de la discrimination des quantités DIS (qui ajoute 8% de variance ; $p < .05$).

Pour l'épreuve d'opérations élémentaires ARITH, le modèle standard explique 58% de la variance (ajusté 50%), $F(7, 34) = 6.79$, $p < .00005$.

L'analyse ascendante fait apparaître deux contributions propres : celle du lexique LEX (39% de la variance ; $p < .001$) et celle de la connaissance de la chaîne verbale des noms de nombres CHN (qui ajoute 15% de variance ; $p < .002$).

Donc en fin de petite section (vers l'âge de 4 ans), les performances des enfants dépendent du lexique (non numérique) et de la capacité de discrimination des quantités ainsi que de la connaissance de la chaîne numérique pour les calculs.

2.1.2.4 Résultats en début de moyenne section (DMS)

La même démarche qu'en début de petite section est encore utilisée.

Pour l'épreuve de dénombrement COMBIEN, le modèle standard explique 42% de la variance (ajusté 30%), $F(7, 33) = 3.43$, $p < .01$.

L'analyse ascendante ne fait apparaître qu'une seule contribution propre : celle de la mémoire à court terme évaluée par la répétition de mots MOT, qui explique 33% de la variance.

Pour l'épreuve de cardinalisation DONNE, le modèle standard explique 47% de la variance (ajusté 36%), $F(7, 33) = 4.2$, $p < .002$.

L'analyse ascendante fait apparaître deux contributions propres : celle de la mémoire à court terme évaluée par la répétition de mots MOT (30% de la variance ; $p < .0002$) et celle de la connaissance de la chaîne verbale CHN (qui ajoute 7% de variance ; $p < .05$).

Pour l'épreuve d'opérations élémentaires ARITH, le modèle standard explique 26% de la variance (ajusté 10%), $F(7, 34) = 1.62$, ce qui n'est pas significatif.

L'analyse ascendante ne fait apparaître qu'une seule contribution propre : celle de la connaissance lexicale LEX, qui explique 18% de la variance ($p < .01$).

En résumé, en début de moyenne section (vers l'âge de 4 ans et demi), les variations de performances s'expliquent par la connaissance de la chaîne verbale et par la capacité de mémoire verbale à court terme (rappel de mots).

2.1.2.5 Concernant le stade prématernel (PRE)

L'échantillon de 18 enfants testés en fin de crèche n'est pas suffisamment important pour envisager une analyse de régression sur les données recueillies. L'analyse qualitative, plus loin, complètera l'analyse descriptive qui a été faite des résultats sur cette tranche d'âge.

2.1.2.6 Synthèse des analyses de régression

Les analyses de régression ont montré que les modèles globaux étaient tous significatifs, c'est-à-dire que les variables indépendantes influent significativement sur les variables dépendantes. Il y a donc bien un lien significatif entre les capacités numériques en dénombrement, cardinalisation, arithmétique (variables dépendantes étudiées) et les compétences verbales et non-verbales qui les sous-tendent (variables indépendantes).

Le tableau ci-dessous récapitule, pour chaque tranche d'âge, les compétences qui ont le plus d'influence sur le modèle et qui sont donc les plus prédictives des performances mathématiques et arithmétiques.

Facteurs prédictifs des compétences par niveau scolaire	DPS	MPS	FPS	DMS
COMBIEN, dénombrement	1 Lexique	1 Empan visuo-spatial	1 Lexique	Répétition de mots
	2 Empan visuo-spatial	2 Maturité de la chaîne	2 Discrimination	
DONNE, cardinalisation	1 Lexique	1 Empan visuo-spatial	1 Lexique	1 Répétition de mots
	2 Empan de chiffres	2 Lexique	2 Discrimination	2 Maturité de la chaîne
ARITH, opérations	1 Lexique	Empan visuo-spatial	1 Lexique	Lexique
	2 Empan de chiffres		2 Maturité de la chaîne	

L'influence du lexique ne nous surprend pas ; elle est décrite largement dans la littérature. Ce qui interpelle en revanche, c'est l'influence des performances visuo-spatiales, notamment sur le dénombrement, peut-être en partie parce qu'empan visuo-spatial et dénombrement font appel aux mêmes procédures, mais peut-être également parce que la dimension spatiale joue un rôle important.

Toutefois, ces résultats obtenus sur quatre niveaux de la scolarité constituent des sortes d'instantanés. Ils ne nous informent pas sur les éventuelles influences à moyen terme. C'est pourquoi nous avons conduit aussi des analyses longitudinales.

2.2 Approche longitudinale

Afin de déterminer ensuite les variables qui influent sur l'évolution des performances, quand il y en a une, nous avons conduit également des analyses longitudinales, l'une portant sur un groupe de 39 enfants suivis entre le début de la petite section et le milieu de la petite section, une deuxième sur un groupe plus restreint de 18 enfants suivis de la fin de petite section au début de la moyenne section.

2.2.1 Entre le début de petite section et le milieu de petite section

Une partie des enfants testés en début de PS, ont pu être re-testés en milieu de PS.

Le tableau ci-dessous rappelle les moyennes aux différentes épreuves aux deux niveaux, avec des données recueillies à 4 mois d'intervalle (40 mois en début de PS et 44 mois en milieu de PS). Nous détaillons également les résultats des tests t de Student par lesquels nous cherchons à déterminer si les différences ont significativement évolué entre le début et le milieu de la PS. Les valeurs indiquées le confirment pour toutes les variables considérées.

	LEX	EMP	VSP	CHN	DIS	COMBIEN	DONNE	ARITH
DPS	14,47	3,2	0,73	5,6	6,57	3,32	1,57	1,17
MPS	16,11	4,65	1,72	9,5	7,72	5,48	2,63	1,58
t-test	***	***	***	.002	.005	***	***	.013

La question que nous nous posons maintenant est celle de déterminer si les performances en milieu de PS aux trois variables d'intérêt dépendent, d'une part des performances antérieures à ces mêmes épreuves et, d'autre part, de l'impact d'une ou plusieurs variables générales intervenant soit en début de PS soit en milieu de PS. Pour répondre, nous avons donc effectué des analyses de régression en entrant : en premier lieu, la totalité des variables de début de PS en cherchant à déterminer celles qui expliquent la performance en milieu de PS ; puis, en deuxième lieu, l'intégralité des variables de début et de milieu de PS.

Concernant le dénombrement (COMBIEN) en milieu de PS, le modèle global prenant seulement en compte les performances du début PS est significatif et explique 37% de la variance (ajusté 28%) ; $F = 3.19$, $p < .02$. L'analyse ascendante montre que seules les performances en dénombrement du début de PS contribuent significativement pour 32% de variance. Cela signifie que les performances en dénombrement en milieu de PS ne dépendent que de celles relevées en début de PS sans que les autres variables retenues en début de PS influent significativement.

La prise en compte des performances aux variables évaluées en milieu de PS met en évidence que le modèle général est significatif et explique 57% de variance (ajusté 38%). L'analyse ascendante montre que les performances en dénombrement du début de PS contribuent majoritairement et significativement pour 32% de variance. Les performances en empan visuo-spatial (Corsi) contribuent également pour 14% de variance.

En ce qui concerne la cardinalisation (DONNE) en milieu de PS, le modèle global prenant seulement en compte les performances du début PS est significatif et explique 53% de la variance (ajusté 44%) ; $F = 3.19$, $p < .0005$. L'analyse ascendante montre que la performance en début de PS apporte une contribution significative et majeure de 47% de variance, suivie d'une contribution marginalement significative ($p = .09$) de 4% pour l'empan visuo-spatial (Corsi) évalué en début de PS.

La prise en compte des performances aux variables évaluées en milieu de PS met en évidence que le modèle général est significatif et explique désormais 76% de variance (ajusté 64%). L'analyse ascendante montre que les performances en cardinal du début de PS contribuent majoritairement et significativement pour 47% de variance. Interviennent ensuite significativement les performances en empan visuo-spatial (Corsi) évaluées en milieu de PS pour 12% de variance et les performances lexicales du milieu de PS pour 9% de variance.

Concernant enfin les performances arithmétiques (ARITH) en milieu de PS, le modèle global prenant seulement en compte les performances du début PS est significatif et explique 40% de la variance (ajusté 29%) ; $F = 3.62$, $p < .01$. L'analyse ascendante montre que la performance en début de PS apporte une contribution significative et majeure de 28% de variance, suivie d'une contribution marginalement significative ($p = .08$) de 6% pour l'empan de chiffres évalué en début de PS.

La prise en compte des performances aux variables évaluées en milieu de PS met en évidence que le modèle général est significatif et explique désormais 65% de variance (ajusté 51%). L'analyse ascendante montre que les performances en arithmétique du début de PS contribuent majoritairement et significativement pour 28% de variance. Interviennent ensuite significativement plusieurs variables : les performances en empan visuo-spatial (Corsi) évaluées en milieu de PS pour 14% de variance, les performances en empan de chiffres de début de PS pour 11% de variance et enfin deux performances associées au langage : la connaissance de la chaîne verbale en milieu de PS pour 7% de variance, et les connaissances lexicales en milieu de PS pour 4% de variance.

Conclusion :

Les performances en milieu de PS sont toujours majoritairement expliquées par les performances initiales en début de PS, cela est vrai pour les trois variables d'intérêt, le dénombrement, la cardinalisation, les opérations arithmétiques.

S'y ajoutent presque toujours des performances à au moins une épreuve générale, l'empan visuo-spatial notamment, peut-être en partie parce qu'il fait appel aux mêmes procédures, mais peut-être aussi parce que la dimension spatiale joue un rôle important.

Pour l'arithmétique, les influences sont plus complexes et incluent les dimensions verbales, ce qui se justifie du fait de la nature de l'épreuve.

2.2.2 Entre la fin de petite section et le début de moyenne section

Une partie des enfants de l'échantillon de fin de PS ont pu être re-testés en début de MS.

Le tableau ci-dessous fournit les moyennes aux différentes épreuves aux deux niveaux, avec des données recueillies à 3 mois d'intervalle (48 mois en fin de PS et 51 mois en début de MS) ainsi que la significativité des différences (t-tests de Student) entre les deux groupes appariés.

	LEX	EMP	MOT	VSP	CHN	DIS	COMBIEN	DONNE	ARITH
FPS	12.5	4.28	1.89	1.72	9.5	6.33	6.44	1.94	1.78
DMS	16.3	5.44	2.61	2.5	12.44	8.28	7	3.5	1.67
t-test	***	**	**	Ns	.07	*	ns	***	ns

La question principale est de déterminer les variables qui influent sur l'évolution des performances lorsqu'il en existe une. Pour cela, nous avons d'abord conduit une série d'analyses portant sur la

seule petite section (48 mois) afin de dresser un bilan des variables ayant un impact sur les performances aux épreuves de dénombrement (COMBIEN), de cardinalité (DONNE) et d'opérations (ARITH). Dans un deuxième temps, nous avons analysé les performances de début de MS (51 mois) aux mêmes trois épreuves en introduisant en premier les performances en fin de PS (qui sont traitées comme un autorégresseur) et en cherchant quelles variables sont susceptibles d'expliquer les augmentations de performances, lorsqu'elles existent.

En début de MS, lorsqu'on introduit en premier les performances en fin de PS pour chacune des trois épreuves, on observe que :

- 1) concernant le dénombrement COMBIEN, l'amélioration n'est pas significative et donc les performances en début de MS s'expliquent quasi exclusivement par celles de fin de PS (44% de variance ; $p < .005$) ; la mémoire des mots MOT ajoute 11% de variance mais son impact est seulement tendanciel ($p = .07$) ;
- 2) concernant la cardinalité DONNE, la performance en fin de PS explique 32% de la variance ($p < .02$), mais la mémoire temporaire des mots MOT ajoute 20% de variance ($p < .05$) ;
- 3) concernant les opérations ARITH, aucune variable n'intervient, hormis la performance en fin de PS.

2.2.3 Synthèse des résultats longitudinaux

Dans l'approche longitudinale, l'analyse quantitative des données recueillies met en avant que les performances à un instant t sont essentiellement expliquées par les performances à $t - 4$ mois.

Mais cette analyse permet de conclure également, notamment entre le début de PS et le milieu de PS, à l'influence de certaines compétences non verbales sur le développement des compétences numériques et arithmétiques, avec au premier plan les capacités visuo-spatiales.

3. Analyse qualitative des résultats

(Rédaction de Florence Bouvier)

3.1 Description de profils cognitifs

NB : pour respecter l'anonymat des enfants, tous les prénoms ont été modifiés.

L'analyse des résultats quantitatifs des enfants permet de définir certains profils, que l'on peut retrouver parmi les cinq cohortes testées, à des âges différents. Chaque profil sera illustré de quelques exemples.

3.1.1 Profils homogènes

3.1.1.1 Bonnes performances dans tous les domaines

Score Note Z	Lexique	Empan de chiffres	Répétition de mots	Empan visuo- spatial	MCT mixte
Paul, milieu PS 49 mois	17/18 + 0,45 et	8/10 + 1,62 et	3/3 + 0,7 et	3/8 + 0,88 et	8/10 + 1,26 et
Jacques, début MS 54 mois	18/18 + 0,81 et	7/10 + 1,04 et	3/3 + 0,56 et	3/8 + 0,48 et	8/10 + 1,20 et

Score Note Z	Chaîne numérique	Manipulation de la chaîne	Discrimination numérosité	Combien ?	Donne-moi	Arithmétique
Paul, milieu PS 49 mois	18 + 0,91 et	½ + 1,63 et	10/11 + 1,22 et	7/9 + 0,63 et	5/5 + 1,65 et	2/3 + 1,44 et
Jacques, début MS 54 mois	27 + 0,68 et	2/2 + 1,92 et	9/11 + 0,30 et	8/9 + 0,43 et	5/5 + 0,85 et	3/3 + 1,13

Les enfants évoqués ci-dessus n'ont pas toujours les meilleures performances de leur échantillon sur chaque item, mais leurs résultats sont bons de manière homogène. On note toutefois que l'âge chronologique de ces enfants est supérieur à la moyenne de leur tranche d'âge scolaire.

Leur chaîne numérique est élevée et la manipulation de la chaîne numérique devient possible. Leur performance à l’empan visuo-spatial est plus élevée que la moyenne. On rejoint ainsi notre analyse de régression, qui a montré que l’empan visuo-spatial est particulièrement contributif de la variance du modèle en milieu de petite section. Il est à noter que les enfants qui obtiennent les scores les plus élevés à l’épreuve de type Corsi ont en général de bons résultats aux autres questions. Nous n’observons pas d’enfant ayant un bon résultat à notre Corsi, qui ait de mauvais résultat aux autres items. Cette conclusion tant qualitative que quantitative, est également conforme au modèle de Dehaene (1991, [16]), selon lequel les nombres sont organisés selon une « ligne numérique », et que les mathématiques sont fréquemment associés aux performances visuo-spatiales.

En revanche, on peut constater la situation inverse, c’est-à-dire des enfants qui ont une bonne performance générale mais une performance inférieure à la moyenne à l’empan visuo-spatial (cf. enfant Pierre, infra). Certains auteurs soulignent que dans le fonctionnement de la mémoire de travail, il est difficile de distinguer empiriquement les ressources allouées au calepin visuo-spatial, de celles utilisées par le fonctionnement exécutif (Miyake, Friedman et coll, 2001, [66]).

D’autres auteurs (par ex. Gaonac’h et Proch 2005, [29]) concluent que l’empan visuo-spatial se développe plus tard, vers 5-6 ans. Mais on peut également penser qu’une population plus jeune peut être gênée par la composante motrice de la tâche, et par sa composante attentionnelle (Bisanz, Sherman et coll, 2005, [3]). Il nous a semblé également que la compréhension de la consigne pouvait constituer un obstacle à la réussite de l’épreuve.

Score Note Z	Lexique	Empan de chiffres	Répétition de mots	Empan visuo- spatial	MCT mixte
Pierre, début PS 40 mois	17/18 + 1,18 et	4/10 + 0,32 et	2/3 - 0,09 et	1/8 + 0,26 et	3/10 - 0,29 et

Score Note Z	Chaîne numérique	Manipulation de la chaîne	Discrimination numérosité	Combien ?	Donne-moi	Arithmétique
Pierre, début PS 40 mois	29 + 4,34 et	1/2 + 1,72 et	8/11 + 0,63 et	6/9 + 0,89 et	3/5 + 1,17 et	2/3 + 0,73 et

Il est à noter que l'enfant Pierre lorsque nous lui demandons de compter, récite les nombres jusqu'à 29 puis passe à 20-10, 20-11 et commet une erreur de séquentialité entre « 20-16 » « 20-18 ». On peut donc dire qu'il sait compter jusqu'à 36, mais n'utilise pas un lexique conventionnel à partir de 30.

3.1.1.2 L'association de performances inférieures à la moyenne à tous les items

3.1.1.2.1 Quatre exemples d'âge et niveau scolaire différents

(Les résultats sont commentés après)

Score	Lexique	Empan de chiffres	Répétition de mots	Empan visuo-spatial	MCT mixte
Jean, début PS 37 mois	9/15	0/10	0/3	0/8	0/10
Leila, milieu PS 40 mois	12/18	5/10	1/3	0/8	3/10
Mathieu, milieu PS 41 mois	11/18	0/10	0/3	0/8	0/10
Luc, début MS 44 mois	10/18	3/10	2/3	2/8	4/10

Score	Chaîne numérique	Manipulation de la chaîne	Discrimination numérosité	Combien ?	Donne-moi	Arithmétique
Jean, début PS 37 mois	1	0/2	1/11	0/9	0/5	0/3
Leila, milieu PS 40 mois	1	0/2	4/11	4/9	1/5	0/3
Mathieu, milieu PS 41 mois	3	0/2	4/11	5/9	2/5	2/3
Luc, début MS 44 mois	4	0/2	7/11	4/9	1/5	0/3

On constate que l'âge chronologique des enfants dont les résultats sont bas, est inférieur à la moyenne de leur tranche d'âge scolaire.

On relève que la mémoire à court terme phonologique est très faible et que la chaîne numérique est quasiment inexistante, malgré un entraînement quotidien à l'école. La discrimination des magnitudes émerge après une année de scolarité. Or cette compétence est normalement présente avant le développement du langage, donc le jeune âge des enfants ne devrait pas intervenir. L'association de mauvais résultats à tous les items, y compris celui de discrimination de la quantité pourrait alors signifier que de mauvaises habiletés numériques non symboliques préverbaux entraînent, lorsque l'enfant entre dans le langage, un développement des compétences numériques verbales inférieur à celui de ses pairs.

3.1.1.2.2 Evolution de Jean

Le premier enfant cité en exemple, Jean a été revu quatre mois plus tard, en milieu de PS.

Ses résultats ont progressé de la façon suivante :

Score Note Z	Lexique	Empan de chiffres	Répétition de mots	Empan visuo- spatial	MCT mixte
Jean, début PS 37 mois	9/15 - 2,57 et	0/10 - 1,31 et	0/3 - 2,71 et	0/8 - 0,68 et	0/10 - 1,75 et
Jean, milieu PS 41 mois	16/18 - 0,05 et	2/10 - 1,05 et	2/3 - 0,55 et	0/8 - 1,18 et	2/10 - 1,36 et

Score Note Z	Chaîne numérique	Manipulation de la chaîne	Discrimination numérosité	Combien ?	Donne-moi	Arithmétique
Jean, début PS 37 mois	1 - 0,85 et	0/2 - 0,43 et	1/11 - 2,47 et	0/9 - 1,11 et	0/5 - 1,29 et	0/3 - 1,04 et
Jean, milieu PS 41 mois	4 - 0,59 et	0/2 - 0,48 et	8/11 + 0,15 et	4/9 - 0,61 et	2/5 - 0,43 et	0/3 - 1,61 et

Cette comparaison montre que les performances qui croissent le plus sont le lexique, la répétition de mots et la discrimination de numérosité, sub-tests pour lesquels, initialement positionnés à 2.5 écarts-types de la moyenne, les résultats de l'enfant se normalisent. Cette progression est très rapide puisqu'elle s'effectue en quatre mois. Si la scolarisation peut expliquer la progression de Jean dans les épreuves de lexique et de mémoire à court terme verbale, elle ne le peut pas s'agissant

de la discrimination des magnitudes. Cette progression sur ces deux items peut expliquer que conceptuellement, même si l'enfant échoue à distinguer le singulier du pluriel verbal, sa compréhension de la cardinalité devienne satisfaisante (moyenne faible) en milieu de PS, y compris en production (peut donner jusqu'à « deux »). Contrairement aux deux autres enfants cités dans le premier tableau, sa maîtrise des gnosies digitales ne précède pas la connaissance verbale de la cardinalité : ainsi, Jean commence à maîtriser le « trois » dans les tâches « de « dire combien », et peut représenter une collection avec ses doigts jusqu'à trois.

Pour cet enfant, le développement du langage semble avoir accompagné, voire soutenu, tous les autres apprentissages. On note que s'agissant du span visuo-spatial, épreuve non verbale, Jean n'a pas progressé du tout. Néanmoins, on a déjà souligné que l'enfant est sensiblement plus jeune que la moyenne d'âge de son échantillon. Lorsqu'on compare son score avec le score des enfants de débuts de PS, dont l'âge moyen est de 39.95 mois (donc d'âge chronologique plus proche), on constate que 10 enfants de 41 mois et plus, obtiennent le même score de 0, ce qui les place à -0.68 écart type de la moyenne. S'agissant d'une compétence non verbale, a priori peu entraînée par l'école, nous pensons qu'il est possible de relativiser le score obtenu en milieu de PS, en le comparant avec celui des enfants de même âge chronologique. En revanche, nous ne pourrions pas faire cette même correction pour le lexique ou le span de chiffres, domaines où l'influence de la scolarisation intervient davantage.

Le faible niveau de langage de Jean lors de la première passation du test pose cependant la question de sa compréhension des consignes : ses résultats reflètent-ils son niveau réel de compétences, ou ont-ils été biaisés par une mauvaise compréhension des consignes ? Ce biais éventuel ne peut pourtant pas s'appliquer au sub-test de discrimination des magnitudes : en effet, dès le début de la PS, la question du sub-test lexique « montre-moi où il y a le plus » avait été réussie.

La seule épreuve en partie verbale pour laquelle l'enfant n'a pas progressé est celle d'arithmétique. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'arithmétique nécessite l'intégration de compétences verbales et de compétences numériques et logiques, domaines dans lesquels les résultats de Jean se sont normalisés depuis peu de temps seulement. Seul un re-test ultérieur permettrait de savoir si l'enfant est déjà en difficulté en arithmétique ou si, du fait de son jeune âge et de son faible niveau initial, il se trouve en décalage par rapport à ses pairs mais qu'il progresse régulièrement, conformément aux performances de ses pairs « chronologiques ».

3.1.1.2.3 Cas de Luc

Score Note Z	Lexique	Empan de chiffres	Répétition de mots	Empan visuo- spatial	MCT mixte
Luc, fin PS 42 mois	8/15 - 1,19 et	3/10 - 0,52 et	1/3 - 0,55 et	0/8 - 1,2 et	1/10 Non pertinent
Luc, début MS 44 mois	10/18 - 3,93 et	3/10 - 0,98 et	2/3 - 0,79 et	2/8 - 0,17 et	4/10 - 0,77 et

Score Note Z	Chaîne numérique	Manipulation de la chaîne	Discrimination numérosité	Combien ?	Donne-moi	Arithmétique
Luc, fin PS 42 mois	3 - 0,44 et	0/2 - 0,93 et	6/11 + 0,08 et	3/9 - 1,46 et	1/5 - 1,13 et	0/3 - 1,64 et
Luc, début MS 44 mois	4 - 0,44 et	0/2 - 0,99 et	7/11 - 0,92 et	4/9 - 1,30 et	1/5 - 1,88 et	0/3 - 1,74 et

Luc a été testé en fin de PS et re-testé presque trois mois plus tard en début de MS. Sa famille est en partie francophone, le français n'est pas la seule langue utilisée à la maison, sans qu'il soit possible de déterminer quelle langue est la plus employée par le milieu familial.

L'évolution de Luc est l'inverse de celle de Jean : alors que Luc se situait dans la moyenne – moyenne faible lors du premier test en fin de PS, on constate en début de MS que ses résultats qui ont légèrement progressé en note brute, n'ont pas suivi l'évolution des autres enfants. Lorsque l'on analyse les résultats de l'enfant, on s'aperçoit que ses performances se sont nettement dégradées dans tous les domaines, par rapport aux autres enfants de début de MS.

Le recul le plus sensible se situe dans les épreuves de langage, puisque le score de Luc se situe en début de MS à près de 4 écarts type de la moyenne. C'est probablement la question de la maîtrise de la langue française, qui est en cause : ainsi, l'enfant échoue à certains items en désignation ou en dénomination sur des mots simples (table, pomme). Aux épreuves de vocabulaire, on ne constate pas d'acquisition de mots nouveaux. Concernant les prépositions spatiales, la paire « sur / sous » n'est toujours pas connue, mais il a progressé sur « dedans / dehors ».

L'empan de chiffres ne s'améliore pas, alors que l'empan moyen de l'échantillon a progressé de 0.87.

Conformément à ce que l'on a vu dans l'analyse globale des résultats, on voit que sa performance à l'item de discrimination de la numérosité ne progresse pas, et même diminue sensiblement par rapport à son niveau scolaire, en parallèle avec les performances verbales.

Toutefois, on constate un progrès conceptuel dans la compréhension de la cardinalité : en fin de PS, Luc répondait à « combien ? » pour les cardinalités de 1, 2 et 3, et « donne » pour une cardinalité de 1. En début de MS, il répond à « combien » pour une cardinalité de 1, seulement. Mais il est capable de représenter une collection de 2, 3 et 4 avec ses doigts. Il répond à « donne » pour une cardinalité de 1 seulement, mais réussit à résoudre l'addition en montrant le résultat sur ses doigts. Ce résultat n'a pas été pris en compte d'un point de vue quantitatif car le mot « deux » était attendu. Néanmoins, il témoigne de la mise en place des premiers concepts numérico-arithmétiques, malgré un retard de développement du langage par rapport à ses pairs.

Chez l'enfant Leïla, berbèrophone, (cf. premier tableau), testée en début de PS, puis re-testée en milieu de PS, on observe le même schéma de développement de la cardinalité, qui passe par les doigts d'abord, avant les numéraux verbaux, ce qui n'est pas observé chez Jean (cf. supra), francophone, qui progresse au même rythme quel que soit le support symbolique.

Chez l'enfant Mathieu, testé en milieu de PS, nous constatons le même processus d'aide à la construction du concept de cardinalité.

3.1.1.2.4 Cas de Mathieu

Score Note Z	Lexique	Empan de chiffres	Répétition de mots	Empan visuo- spatial	MCT mixte
Mathieu, milieu PS 41 mois	11/18 - 2,59 et	0/10 - 1,84 et	0/3 - 3,08 et	0/8 - 1,18 et	0/10 - 2,24 et

Score Note Z	Chaîne numérique	Manipulation de la chaîne	Discrimination numérosité	Combien ?	Donne-moi	Arithmétique
Mathieu, milieu PS 41 mois	3 - 0,70 et	0/2 - 0,48 et	4/11 - 2 et	5/9 - 0,2 et	2/5 - 0,43 et	2/3 + 0,42 et

L'enfant Mathieu a des scores très déficitaires dans les épreuves de langage et de mémoire à court terme, verbale ou visuelle. Sa capacité de discrimination numérique se situe à la note la plus basse relevée (sur 43 enfants testés, 39 obtiennent un meilleur score, 3 enfants obtiennent le même score que Mathieu). Ce dernier peut répondre à la question « combien » jusqu'à 3, c'est-à-dire le maximum de sa chaîne numérique. Il peut également représenter une collection avec ses doigts jusqu'à 3. Il répond à la question « donne » jusqu'à 2.

Il semble donc que les enfants les plus en difficultés avec le langage, progressent tout de même sur le plan de la compréhension conceptuelle de la cardinalité, en s'aidant des doigts, ce qu'observait déjà Descoedres (1930, [21]). En effet, dans le cas de Mathieu, la représentation des nombres grâce aux doigts est la seule habileté testée par notre protocole, permettant d'expliquer l'émergence du concept de cardinalité, grâce à une représentation non verbale du nombre.

3.1.2 Profils hétérogènes

3.1.2.1 Double dissociation niveau lexical / mémoire phonologique

3.1.2.1.1 Bon niveau lexical, bonnes performances numériques et arithmétiques, mais niveau faible en mémoire à court terme phonologique

Score	Lexique	Empan de chiffres	Répétition de mots	Empan visuo-spatial	MCT mixte
Laurent, prématernelle 41 mois	15/15	2/10	0/3	0/8	1/10
Clémentine, fin PS 44 mois	15/15	1/10	0/3	0/8	3/10
Alexandre, début MS 50 mois	18/18	3/10	3/3	4/8	4/10

Score	Chaîne numérique	Manipulation de la chaîne	Discrimination numérosité	Combien ?	Donne-moi	Arithmétique
Laurent, prématernelle 41 mois	13	0/2	11/11	6/9	5/5	2/3
Clémentine, fin PS 44 mois	3	0/2	8/11	8/9	4/5	2/3
Alexandre, début MS 50 mois	24	1/2	7/11	9/9	4/5	3/3

On constate dans ce type de profil que les enfants ont des scores élevés aux épreuves lexicales, ici score maximum. En revanche les épreuves de mémoire phonologique, en particulier l'empan de chiffres sont moins bien réussies que la moyenne des enfants. Ce résultat est surprenant, puisque les auteurs s'accordent (cf. Majerus, Poncelet et coll. 2006, [56]) sur le fait que la mémoire verbale à court terme est associée au développement du lexique.

Ce profil ne produit pas de chaîne numérique « type » : elle peut être élevée, ou faible, comme le montrent les résultats de Clémentine (cf. tableau supra). Néanmoins l'exemple de Clémentine est sans doute à prendre avec précaution. En effet, l'enfant réussit les épreuves de cardinalité, aux tâches de « dire combien » et aux tâches de « donne-moi » jusqu'au nombre 4. Elle réussit

également les épreuves de gnosies digitales jusqu'à 4. Il est donc étonnant que sa chaîne numérique ne soit stable et conventionnelle que jusqu'à 3.

Les performances plus faibles en mémoire à court terme verbale peuvent-elles s'expliquer par un retard de développement de cette mémoire, qui se rattrape avec le temps ? Même si la population étudiée est trop réduite pour conclure par l'affirmative, c'est ce schéma que nous constatons pour Laurent, re-testé au milieu de la petite section de maternelle (cf. tableau ci-dessous).

3.1.2.1.2 Cas de Laurent

Score Note Z	Lexique	Empan de chiffres	Répétition de mots	Empan visuo- spatial	MCT mixte
Laurent, prématernelle 41 mois	15/15 + 1,93 et	2/10 - 0,26 et	0/3 - 0,96 et	0/8 - 0,91 et	1/10 Non pertinent
Laurent, milieu PS 49 mois	17/18 + 0,45 et	8/10 + 1,32 et	3/3 + 0,7 et	3/8 + 0,88 et	8/10 + 1,26 et

Score Note Z	Chaîne numérique	Manipulation de la chaîne	Discrimination numérosité	Combien ?	Donne-moi	Arithmétique
Laurent, prématernelle 41 mois	13 + 1,63 et	0/2 - 0,42 et	11/11 + 1,7 et	6/9 + 2,42 et	5/5 + 3,64 et	2/3 + 2 et
Laurent, milieu PS 49 mois	18 + 0,91 et	1 + 1,63 et	10/11 + 1,22 et	7/9 + 0,63 et	5/5 + 1,65 et	2/3 + 0,42 et

On voit qu'en l'espace de 8 mois, l'amélioration des performances concerne surtout la mémoire à court terme verbale, ainsi que la mémoire visuo-spatiale. Les autres scores croissent moins vite que ceux de la moyenne des autres enfants. Ses performances langagières initiales étaient très bonnes, et ses scores dans les épreuves numériques verbales étaient très supérieurs à la moyenne.

En ce qui concerne l'arithmétique, l'épreuve d'égalisation de collection est échouée en février 2013, comme elle l'était en juin 2012, alors que les résultats de Laurent le placent parmi les enfants les plus performants. Cette épreuve d'égalisation est pourtant réussie par 41 % des enfants de milieu de PS.

Même si les résultats de Laurent semblent stagner, on constate une évolution de sa capacité à manipuler la chaîne numérique : sa chaîne devient sécable, ce qui va permettre la résolution de petits calculs. Seuls 8 enfants de ce niveau scolaire réussissent cet item.

3.1.2.1.3 Cas de Anaïs

Anaïs âgée de 37 mois en début de petite section présente un profil comparable, avec de meilleurs résultats aux épreuves de lexique et de discrimination de la numérosité. Les résultats obtenus aux épreuves numériques à contenu verbal sont très supérieurs à la moyenne, malgré son jeune âge.

Score Note Z	Lexique	Empan de chiffres	Répétition de mots	Empan visuo- spatial	MCT mixte
Anaïs, début PS 37 mois	16/18 + 0,71 et	5/10 + 0,73 et	2/3 - 0,09 et	2/8 + 1,2 et	3/10 - 0,29 et
Anaïs, milieu PS 41 mois	18/18 + 0,95 et	5/10 + 0,13 et	3/3 + 0,7 et	2/8 + 0,19 et	6/10 + 0,39 et

Score Note Z	Chaîne numérique	Manipulation de la chaîne	Discrimination numérosité	Combien ?	Donne-moi	Arithmétique
Anaïs, début PS 37 mois	10 + 0,81 et	0/2 - 0,43 et	11/11 + 1,96 et	7/9 + 1,23 et	3/5 + 1,17 et	2/3 + 0,73 et
Anaïs, milieu PS 41 mois	21 + 1,23 et	0/2 - 0,48 et	10/11 + 1,22 et	9/9 + 1,47 et	5/5 + 1,65 et	2/3 + 0,42 et

L'évolution des scores d'Anaïs est différente de celle de Laurent, leurs huit mois d'écart pouvant expliquer cette différence. Malgré une certaine stagnation dans les épreuves de mémoire à court terme, dont les scores restent dans la moyenne, la progression d'Anaïs s'observe surtout dans les épreuves de lexique, et les épreuves numériques à caractère verbal (chaîne numérique et de cardinalité), soutenue par une très bonne capacité de discrimination.

L'épreuve de mémoire à court terme sur laquelle Anaïs progresse le plus est l'épreuve « mixte », qui teste le caractère ordinal du nombre.

3.1.2.1.4 Bonne mémoire verbale à court terme, bonne discrimination de la numérosité et réussite arithmétique, mais performance lexicale moyenne

Score Note Z	Lexique	Empan de chiffres	Répétition de mots	Empan visuo- spatial	MCT mixte
Héloïse, prématernelle 39 mois	10/15 - 0,28 et	6/10 + 1,77 et	3/3 + 1,61 et	4/8 + 1,94 et	4/10 Non pertinent
Célia, fin PS 46 mois	13/15 + 0,29 et	6/10 + 0,94 et	2/3 + 0,33 et	0/8 - 1,2 et	6/10 Non pertinent
Nathan, début MS 46 mois	16/18 - 0,37 et	9/10 + 2,05 et	3/3 + 0,56 et	3/8 + 0,48 et	6/10 + 0,26

Score Note Z	Chaîne numérique	Manipulation de la chaîne	Discrimination numérosité	Combien ?	Donne-moi	Arithmétique
Héloïse, prématernelle 39 mois	8 + 0,62 et	1/2 + 2,24 et	8/11 + 0,65 et	3/9 + 0,6 et	2/5 + 0,7 et	2/3 + 2 et
Célia, fin PS 46 mois	29 + 2,7 et	2/2 + 2,09 et	10/11 + 1,44 et	6/9 - 0,17 et	2/5 0	3/3 + 1,4 et
Nathan, début MS 46 mois	28 + 0,76 et	1/2 + 0,46 et	11/11 + 1,52 et	9/9 + 0,86 et	5/5 + 0,85 et	3/3 + 1,16 et

Ces trois enfants ont en commun des scores meilleurs que la moyenne dans les épreuves de mémoire à court terme verbale malgré un résultat moyen, voire légèrement faibles à l'épreuve de lexique. Les compétences de discrimination numérique sont supérieures à très supérieures à la moyenne. Les épreuves de cardinalité sont réussies de façon moyenne, voire supérieure à la moyenne.

Les résultats obtenus dans le sub-test arithmétique traduisent une bonne synthèse d'habiletés verbales et numériques. Ils sont cohérents avec l'étendue des chaînes numériques, ainsi que la capacité à manipuler la chaîne numérique (Nathan, dont les résultats sont présentés ici en début de MS, réussissait dès la fin de PS les deux items de manipulation de la chaîne numérique).

Cette dissociation entre performances lexicales moyennes et bonne à très bonne mémoire phonologique à court terme est surprenante également. La performance obtenue à l'épreuve de mémoire visuo-spatiale n'apparaît pas liée à la mémoire verbale.

En conclusion, on observe une double dissociation entre les résultats obtenus à l'épreuve de lexique et la mémoire verbale à court terme, avec dans les deux cas, les épreuves numériques verbales ou préverbales qui sont réussies plus que la moyenne des enfants.

Cette dissociation peut s'expliquer par la forte diversité inter-individuelle que l'on peut trouver à cet âge, notamment dans le développement du langage. Une partie des enfants ne semblent pas développer le langage et la mémoire verbale à court terme au même rythme. L'échantillon est trop limité pour en tirer des conclusions, comme l'épreuve lexicale de notre protocole, volontairement ciblée sur quelques questions. Néanmoins nous trouvons plusieurs fois ce schéma de développement.

Sur le plan du développement du concept de nombre, cette dissociation n'a pas freiné les acquisitions, puisqu'au contraire, nous l'avons constatée chez des enfants très performants aux items numérique-arithmétiques, qui font appel à du matériel verbal. Tous ces enfants présentent également une bonne voire très bonne capacité à discriminer les numérosités.

3.1.2.2 Très bonne compétence verbale et très bonne compétence numérique-arithmétique, mais discrimination des magnitudes moyenne à faible

Nous avons pour l'instant commenté les résultats d'enfants dont les bonnes performances numériques pouvaient être expliquées en partie par leur bonne capacité de discrimination. Mais nous trouvons également des enfants où la performance numérique semble être surtout soutenue par le langage.

Score Note Z	Lexique	Empan de chiffres	Répétition de mots	Empan visuo- spatial	MCT mixte
Yassin, début PS 43 mois	17/18 + 1,18 et	7/10 + 1,55 et	3/3 + 1,21 et	0/8 - 0,68 et	3/10 - 0,29 et
Yassin, milieu PS 47 mois	12/18 - 2,08 et	7/10 + 0,93et	3/3 + 0,7et	1/8 - 0,49 et	5/10 - 0,04 et
Paul, milieu PS 45 mois	18/18 + 0,95 et	10/10 + 2,12 et	3/3 + 0,7 et	3/8 + 0,88 et	9/10 + 1,7 et
Alexandre, début MS 50 mois	18/18 + 0,81 et	3/10 - 0,98 et	3/3 + 0,56 et	4/8 + 1,15 et	4/10 - 0,77 et

Score Note Z	Chaîne numérique	Manipulation de la chaîne	Discrimination numérosité	Combien ?	Donne-moi	Arithmétique
Yassin, début PS 43 mois	3 - 0,48 et	0/2 - 0,43 et	0/11 - 2,92 et	7/9 + 1,23 et	4/5 + 1,99 et	1/3 - 0,15 et
Yassin, milieu PS 47 mois	3 - 0,7 et	0/2 - 0,48 et	7/11 - 0,38 et	6/9 + 0,21 et	3/5 + 0,26 et	2/3 + 0,42 et
Paul, milieu PS 45 mois	24 + 1,55 et	0/2 - 0,48 et	5/11 - 1,46 et	9/9 + 1,47 et	4/5 + 0,95 et	1/3 - 0,59 et
Alexandre, début MS 50 mois	24 + 0,44 et	1/2 + 0,46 et	7/11 - 0,92 et	9/9 + 0,86 et	4/5 + 0,16 et	3/3 + 1,16 et

Chez ces trois enfants de tranche d'âge scolaire différente, les performances verbales et mnésiques sont bonnes voire très bonnes. Ainsi Yassin, en début de PS, fait déjà la différence entre « une » pomme et « des » bananes (45% des enfants de début de PS échouent à cet item). Leur compréhension des nombres a commencé à se développer, tous sont capables de représenter une collection avec leurs doigts. Le cadre du protocole était trop limité pour tester l'étendue des cardinalités réellement maîtrisées par Alexandre, et ainsi affiner l'analyse de ses compétences arithmétiques.

Pourtant chez ces trois enfants, performants dans les questions numérico-arithmétiques dans lesquelles les nombres sont représentés symboliquement par les doigts ou les mots, nous constatons une capacité de discrimination numérique nettement inférieure à la moyenne. Re-testé quatre mois plus tard, à l'item de discrimination, Yassin passe d'une note de 0/11 à 7/11 (note Z de 0.18), soit une forte progression (sans progression par ailleurs de la chaîne numérique, ni des performances numériques, en revanche amélioration aux questions arithmétiques). La chaîne numérique n'est pas forcément très élevée, ni leur empan visuo-spatial. Dans ce contexte, le développement du concept de nombre pourrait être peu lié à des habiletés quantitatives préverbales, mais se construire surtout à partir de représentations symboliques, avec un bon niveau précoce de langage. L'étude de Lipton et Spelke (2005, [55]) montrait que la capacité de discrimination progressait avec la zone de comptage. Cependant la progression de Yassin dans l'estimation des magnitudes, n'est pas parallèle à la progression de sa chaîne numérique ou des cardinalités qu'il maîtrise.

En conclusion, nos quatre échantillons d'environ 40 enfants chacun ainsi que le cinquième de 25 enfants d'âge préscolaire, nous permettent de décrire des tendances dans le mode de développement des compétences numériques précoces. Des études portant sur des échantillons

plus importants pourraient permettre de confirmer l'existence de la typologie que nous avons commentée.

Néanmoins, nous pouvons affirmer qu'aucun enfant ayant des mauvaises performances numériques n'avait de bonnes compétences verbales, ni qu'aucun enfant ayant de bonnes performances verbales n'avait de mauvaises performances numériques. Donc la performance numérique ne peut véritablement exister sans support verbal, ce qui est conforme au modèle de Dehaene, pour lequel le code verbal est une partie importante du développement du nombre. Nous trouvons une double dissociation entre développement du langage et développement de la mémoire à court terme verbale, dissociation qui n'influe pas sur la construction du nombre, tant qu'une des deux aptitudes verbales est bonne.

Nous trouvons par ailleurs des enfants pour lesquels nous n'avons pas trouvé de preuve de soutien ou de construction parallèle du nombre par des habiletés préverbales telles que la discrimination des quantités. Dans ce cas, comme le décrit Wynn (1990, [90]), la conscience du nombre, voire même de la quantité, pourrait émerger grâce à des indices syntaxiques auxquels ces enfants sont particulièrement réceptifs. De fait, dans notre étude, nous ne trouvons pas d'enfant doté d'une bonne capacité d'estimation des numérosités sans bonne capacité langagière.

Enfin, les résultats de notre test montrent une dissociation, chez certains enfants entre développement de la chaîne numérique et compréhension conceptuelle des nombres.

3.1.2.3 Dissociation chaîne numérique / cardinalité

Nous rappelons que nous avons testé la compréhension et l'utilisation de la cardinalité des nombres jusqu'à 5, par des tâches de « dire combien » et des tâches de « donne-moi x éléments ».

Conformément aux théories de plusieurs auteurs, nous testons également la longueur de la chaîne numérique afin d'étudier les liens qui existeraient entre son développement et d'autres aptitudes, tant verbales que non verbales.

Parmi notre échantillon, nous trouvons des enfants qui ont une bonne voire très bonne chaîne numérique, beaucoup plus développée que la moyenne des enfants de leur niveau scolaire. De manière générale, les chaînes numériques les plus développées ont été par les enfants les plus performants. Mais chez certains enfants, nous observons une très bonne chaîne numérique, avec une compréhension de la cardinalité des nombres moyenne à faible.

Et, à l'inverse, nous observons des enfants qui possèdent une chaîne numérique moyenne, voire inférieure à la moyenne de la population, mais qui obtiennent la note maximum aux épreuves de cardinalité. Cette dissociation se retrouve dans les cinq niveaux que nous avons testés.

3.1.2.3.1 Bonne chaîne numérique mais cardinalité moyenne à faible

Score (note Z)	Empan de chiffres	Répétition de mots	Empan visuo-spatial	Chaîne numérique	Combien ?	Donne-moi
Maël, prématernelle	5/10 (+ 1.26 ET)	1/3 (- 0.1 ET)	3/8 (+ 1.22 ET)	12 (+ 1.43 ET)	1/9 (- 0.6 ET)	1/5 (- 0.27 ET)
Christine, début PS	5/10 (+ 0.73 ET)	3/3 (+ 1.21 ET)	0/8 (- 0.68 ET)	14 (+ 1.55 ET)	0/9 (- 1.11 ET)	0/5 (- 1.29 ET)
Léna, milieu PS	6/10 (+ 0.53 ET)	2/3 (- 0.55 ET)	0/8 (- 1.18 ET)	14 (+ 0.48 ET)	2/9 (- 1.45 ET)	1/5 (- 1.12 ET)
Jules, fin PS	4/10 (- 0.03 ET)	0/3 (- 1.43 ET)	1/8 (- 0.46 ET)	15 (+ 0.76 ET)	4/9 (- 1.03 ET)	2/5 (0 ET)
Auguste, début MS	4/10 (- 0.48 ET)	3/3 (+ 0.56 ET)	3/8 (+ 0.48 ET)	27 (+ 0.68 ET)	7/9 (0 ET)	2/5 (- 1.20 ET)

N.B. : la moyenne de la chaîne numérique diminue légèrement entre le milieu et la fin de PS, ce qui explique les notes Z calculées.

L'observation de l'évolution de Christine va dans ce sens : re-testée en milieu de PS, la chaîne numérique de l'enfant passe de 14 (début de PS) à 25 (milieu PS, + 1.66 ET). En revanche, sa compréhension des nombres n'évolue quasiment pas : elle passe de 0 à 1 à l'épreuve « combien ? », et en production son score reste à 0. Donc pour cette catégorie d'enfants, la chaîne numérique évolue rapidement, probablement du fait de sa répétition quotidienne à l'école ; ils ont souvent également de bonnes performances en mémoire à court terme phonologique. En revanche, cette chaîne reste au stade de la comptine, sans qu'un contenu cardinal ne soit accolé aux mots.

3.1.2.3.2 Chaîne numérique moyenne à faible, mais bonne maîtrise de la cardinalité

Score (note Z)	Empan de chiffres	Répétition de mots	Empan visuo-spatial	Chaîne numérique	Combien ?	Donne-moi
Mehmet, prématernelle	4/10 (+ 0.75 ET)	3/3 (+ 1.61 ET)	1/8 (- 0.2 ET)	6 (+ 0.28 ET)	5/9 (+ 1.81 ET)	1/5 (- 0.27 ET)
Bastien, début PS	4/10 (+ 0.32 ET)	2/3 (- 0.09 ET)	3/8 (+ 2.14 ET)	2 (- 0.66 ET)	9/9 (+ 1.90 ET)	2/5 (+ 0.34 ET)
Daria, milieu PS	3/10 (- 0.65 ET)	3/3 (+ 0.70 ET)	4/8 (+ 1.57 ET)	5 (- 0.48 ET)	8/9 (+ 1.05 ET)	5 (+ 1.65 ET)
Clémentine, fin PS	1/10 (- 1.49 ET)	0/3 (- 1.43 ET)	0/8 (- 1.20 ET)	3 (- 0.89 ET)	8/9 (+ 0.69 ET)	4 (+ 2.26 ET)
Axel, début MS	5/10 (+ 0.02 ET)	3/3 (+ 0.56 ET)	4/8 (+ 1.15 ET)	7 (- 0.94 ET)	9/9 (+ 0.86 ET)	5 (+ 0.85 ET)

N.B. : la note moyenne aux épreuves de cardinalité en production baisse sensiblement entre le milieu de PS et la fin de PS, ce qui explique les notes Z calculées.

L'évolution de Bastien est conforme à cette typologie : ainsi entre le début et le milieu de PS, sa chaîne numérique passe de 2 à 3. Elle n'est plus conventionnelle au-delà. Dans le même temps, ses capacités de produire une cardinalité sont passées de 2 à 5, soit plus que la comptine numérique qu'il est capable de produire. Il est toujours à 9 à la question « combien ? », qui est saturée. Pour ces enfants le concept de nombre semble se développer au même rythme, voire avant la chaîne numérique.

Notre échantillon est trop restreint pour pouvoir en tirer des corrélations, avec la mémoire à court terme verbale ou visuo-spatiale, ou d'autres capacités.

Seule une analyse à plus grande échelle permettrait de confirmer cette dissociation constatée pour certains enfants, entre le développement de la chaîne numérique et la compréhension du concept de nombre. Une telle étude serait intéressante car si cette typologie était confirmée, elle établirait qu'il n'existe pas un seul mode de développement de la maîtrise de la cardinalité, que la chaîne numérique pourrait précéder de plusieurs mois, voire années, la compréhension du nombre. Pour d'autres enfants, au contraire, comptine numérique et cardinalité de nombre se développeraient quasiment conjointement.

3.2 Etudes de cas longitudinales

Pierre est né le 02/06/2009. Il est vu la première fois alors qu'il est chez les grands de la crèche collective du Parc, à Sainte-Geneviève-des-Bois, il est âgé de 3 ans et 1 mois. Il sera re-testé le 18 octobre 2012, au début de sa première année de maternelle, il est âgé de 3 ans et 4 mois. Enfin il est testé une dernière fois le 4 février 2013, en milieu de petite section de maternelle à l'âge de 3 ans et 8 mois.

Théo est né le 02/02/2009, il a donc exactement quatre mois de plus que Pierre. Il a été testé pour la première fois le 06/07/2012 à la crèche collective du Parc, où il était gardé avec Pierre, à l'âge de 3 ans 5 mois. Il a été revu le 19 octobre 2012 à l'âge de 3 ans 8 mois puis le 8 février 2013 à 4 ans.

3.2.1 Présentation des résultats

Les performances des deux enfants sont assez différentes : le résultat de Théo à l'épreuve lexicale se situe dans la moyenne faible avant d'entrer en maternelle, alors que celui de Pierre est au-dessus de la moyenne. Les performances des deux enfants croissent très sensiblement entre la fin de la crèche et le début de la petite section, comme la moyenne de la cohorte. On note qu'en milieu de PS Pierre réussit l'intégralité de l'épreuve de lexique ; il a donc acquis la notion syntaxique du pluriel, à la différence de Théo.

Score (note Z)	Lexique	Empan de chiffres	Répétition de mots	Empan visuo- spatial	MCT mixte
Moyenne prématernelle	10,64/15	2,52/10	1,12/3	1,28/8	Non pertinent
Prématernelle Pierre 37 mois	11/15 + 0,16 et	3/10 + 0,24 et	0/3 - 0,96 et	2/8 + 0,51 et	0
Prématernelle Théo 41 mois	8/15 - 1,09 et	4/10 + 0,75 et	0/3 - 0,96 et	1/8 - 0,2 et	0
Moyenne début PS	14,47/18	3,2/10	2,07/3	0,72/8	3,6/10
Début PS Pierre 40 mois	17/18 + 1,18 et	4/10 + 0,32 et	2/3 - 0,09 et	1/8 + 0,26 et	3/10 - 0,29 et
Début PS Théo 44 mois	16/18 + 0,72 et	8/10 + 1,96 et	3/3 + 1,22 et	0 - 0,67 et	5/10 + 0,68 et
Moyenne milieu PS	16,11/18	4,65/10	2,44/3	1,72/8	5,11/10
Milieu PS Pierre 44 mois	18/18 + 0,95 et	8/10 + 1,32 et	3/3 + 0,7 et	1/8 - 0,49 et	7/10 + 0,82 et
Milieu PS Théo 48 mois	17/18 + 0,45 et	5/10 + 0,13 et	3/3 + 0,7 et	0/8 - 1,18 et	8/10 + 1,26 et

Score (note Z)	Chaîne numérique	Manipulation de la chaîne	Discrimination numérosité	Combien ?	Donne-moi	Arithmétique
Moyenne prématernelle	4,92	0,16/2	6,12/11	2/9	1,28/5	0,66/3
Prématernelle Pierre 37 mois	5 + 0,01 et	1/2 + 2,27 et	2/11 - 1,44 et	2/9 0 et	2/5 + 0,7 et	0 - 0,86 et
Prématernelle Théo 41 mois	0 - 0,99 et	0/2 - 0,43 et	7/11 + 0,31 et	2/9 0 et	1/5 - 0,27 et	2 + 1,76 et
Moyenne début PS	5,6	0,2/2	6,57/11	3,32/9	1,57/5	1,17/3
Début PS Pierre 40 mois	29 + 4,34 et	1/2 + 1,72 et	8/11 + 0,63 et	6/9 + 0,89 et	3/5 + 1,17 et	2/3 + 0,73 et
Début PS Théo 44 mois	3 - 0,48 et	0/2 - 0,43 et	7/11 + 0,19 et	1/9 - 0,78 et	2 + 0,38 et	3/3 + 1,63 et
Moyenne milieu PS	9,51	0,23/2	7,72/11	5,48/9	2,62/5	1,58/3
Milieu PS Pierre 44 mois	29 + 2,70 et	1/2 + 1,63 et	7/11 - 0,22 et	5/9 - 0,2 et	3/5 + 0,26 et	1/3 - 0,41 et
Milieu PS Théo 48 mois	5 - 0,61 et	0/2 - 0,48 et	7/11 - 0,22 et	4/9 - 0,61 et	3/5 + 0,26 et	3/3 + 1 et

Graphiques de synthèse : en bleu Théo, en rouge Pierre et en vert la moyenne

<p>Lexique</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Phase</th> <th>Théo (bleu)</th> <th>Pierre (rouge)</th> <th>Moyenne (vert)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>prémater</td> <td>8</td> <td>11</td> <td>10</td> </tr> <tr> <td>début PS</td> <td>15</td> <td>17</td> <td>14</td> </tr> <tr> <td>milieu PS</td> <td>16</td> <td>18</td> <td>16</td> </tr> </tbody> </table>	Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)	prémater	8	11	10	début PS	15	17	14	milieu PS	16	18	16	<p>Empan de chiffres</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Phase</th> <th>Théo (bleu)</th> <th>Pierre (rouge)</th> <th>Moyenne (vert)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>prémater...</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>empan...</td> <td>8</td> <td>4</td> <td>4</td> </tr> <tr> <td>empan...</td> <td>5</td> <td>8</td> <td>5</td> </tr> </tbody> </table>	Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)	prémater...	4	3	3	empan...	8	4	4	empan...	5	8	5
Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)																														
prémater	8	11	10																														
début PS	15	17	14																														
milieu PS	16	18	16																														
Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)																														
prémater...	4	3	3																														
empan...	8	4	4																														
empan...	5	8	5																														
<p>Répétition de mots</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Phase</th> <th>Théo (bleu)</th> <th>Pierre (rouge)</th> <th>Moyenne (vert)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>répétition prémater</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>répétition début PS</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>répétition milieu PS</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>2.5</td> </tr> </tbody> </table>	Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)	répétition prémater	0	0	1	répétition début PS	3	2	2	répétition milieu PS	3	3	2.5	<p>Empan visuo-spatial</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Phase</th> <th>Théo (bleu)</th> <th>Pierre (rouge)</th> <th>Moyenne (vert)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>prémater Corsi</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>1.5</td> </tr> <tr> <td>Corsi début PS</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0.8</td> </tr> <tr> <td>Corsi milieu PS</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1.8</td> </tr> </tbody> </table>	Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)	prémater Corsi	1	2	1.5	Corsi début PS	0	1	0.8	Corsi milieu PS	0	1	1.8
Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)																														
répétition prémater	0	0	1																														
répétition début PS	3	2	2																														
répétition milieu PS	3	3	2.5																														
Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)																														
prémater Corsi	1	2	1.5																														
Corsi début PS	0	1	0.8																														
Corsi milieu PS	0	1	1.8																														
<p>MCT mixte</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Phase</th> <th>Théo (bleu)</th> <th>Pierre (rouge)</th> <th>Moyenne (vert)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>prémater...</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>début ps</td> <td>4</td> <td>3</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>milieu ps</td> <td>5</td> <td>7</td> <td>8</td> </tr> </tbody> </table>	Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)	prémater...	0	0	0	début ps	4	3	5	milieu ps	5	7	8	<p>Discrimination Numérosité</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Phase</th> <th>Théo (bleu)</th> <th>Pierre (rouge)</th> <th>Moyenne (vert)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>prémater</td> <td>7</td> <td>2</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>début PS</td> <td>7</td> <td>8</td> <td>7</td> </tr> <tr> <td>milieu PS</td> <td>7</td> <td>7</td> <td>7.5</td> </tr> </tbody> </table>	Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)	prémater	7	2	6	début PS	7	8	7	milieu PS	7	7	7.5
Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)																														
prémater...	0	0	0																														
début ps	4	3	5																														
milieu ps	5	7	8																														
Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)																														
prémater	7	2	6																														
début PS	7	8	7																														
milieu PS	7	7	7.5																														
<p>Chaîne numérique</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Phase</th> <th>Théo (bleu)</th> <th>Pierre (rouge)</th> <th>Moyenne (vert)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>prémater</td> <td>0</td> <td>5</td> <td>5</td> </tr> <tr> <td>début PS</td> <td>5</td> <td>30</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>milieu PS</td> <td>5</td> <td>30</td> <td>10</td> </tr> </tbody> </table>	Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)	prémater	0	5	5	début PS	5	30	6	milieu PS	5	30	10	<p>Combien ?</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Phase</th> <th>Théo (bleu)</th> <th>Pierre (rouge)</th> <th>Moyenne (vert)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>prémater</td> <td>2</td> <td>2</td> <td>2</td> </tr> <tr> <td>début PS</td> <td>1</td> <td>6</td> <td>3</td> </tr> <tr> <td>Milieu PS</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>5.5</td> </tr> </tbody> </table>	Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)	prémater	2	2	2	début PS	1	6	3	Milieu PS	4	5	5.5
Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)																														
prémater	0	5	5																														
début PS	5	30	6																														
milieu PS	5	30	10																														
Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)																														
prémater	2	2	2																														
début PS	1	6	3																														
Milieu PS	4	5	5.5																														
<p>Arithmétique</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Phase</th> <th>Théo (bleu)</th> <th>Pierre (rouge)</th> <th>Moyenne (vert)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>prémater</td> <td>2</td> <td>0</td> <td>0.5</td> </tr> <tr> <td>début PS</td> <td>3</td> <td>2</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>milieu PS</td> <td>3</td> <td>1</td> <td>1.5</td> </tr> </tbody> </table>	Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)	prémater	2	0	0.5	début PS	3	2	1	milieu PS	3	1	1.5	<p>Donne</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Phase</th> <th>Théo (bleu)</th> <th>Pierre (rouge)</th> <th>Moyenne (vert)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>prémater</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>1.5</td> </tr> <tr> <td>début PS</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>1.5</td> </tr> <tr> <td>milieu PS</td> <td>3</td> <td>3</td> <td>2.5</td> </tr> </tbody> </table>	Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)	prémater	1	2	1.5	début PS	2	3	1.5	milieu PS	3	3	2.5
Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)																														
prémater	2	0	0.5																														
début PS	3	2	1																														
milieu PS	3	1	1.5																														
Phase	Théo (bleu)	Pierre (rouge)	Moyenne (vert)																														
prémater	1	2	1.5																														
début PS	2	3	1.5																														
milieu PS	3	3	2.5																														

3.2.2 Commentaire des résultats

Les résultats des enfants ont très sensiblement progressé en huit mois, mais à des rythmes différents. Ainsi Théo rattrape son retard initial aux questions de lexique mais n'a pas encore établi de différence entre la question montre-moi « un » et donne-moi « des », à la différence de Pierre qui réussit l'épreuve dès le début de la PS.

Théo présente une mémoire à court terme verbale meilleure que Pierre mais ne progresse pas sur celle-ci entre le début et le milieu de PS, contrairement à Pierre. En revanche le span visuo-spatial de Pierre est meilleur que celui de Théo.

La chaîne numérique de Pierre connaît une très forte progression entre la fin de crèche et le début de la PS (de 5 à 29) mais n'augmente pas en milieu de PS. Pierre dès la fin de crèche peut commencer à compter à partir d'une borne, Théo en milieu de PS ne réussit pas sur ce point. La chaîne numérique de Pierre est donc plus mature et plus développée que celle de Théo. Les capacités de discrimination de Pierre conformément à ce que l'on a déjà vu, augmentent à un rythme parallèle à celle de la comptine numérique. La chaîne numérique de Théo croît faiblement mais régulièrement. En revanche sa capacité de discrimination demeure inchangée en 8 mois : peut-être est-ce dû à sa « zone de comptage » (cf. Lipton et Spelke , 2005), qui varie peu ?

À la question « combien ? » la progression de Théo semble plus linéaire (2-1-4) que celle de Pierre (2-6-5). La progression de la maîtrise de la cardinalité pour Théo semble passer par le support digital, contrairement à Pierre, qui malgré de bonnes performances numériques, ne parvient pas à représenter une collection par une « collection témoin » de doigts. Donc Pierre pourrait présenter un profil de développement numérique basé essentiellement sur le langage.

Enfin, à l'épreuve arithmétique, on note une différence sensible entre les deux enfants : ainsi Théo, dont la chaîne numérique et les performances en cardinalité, tant en réception qu'en production sont inférieures à celles de Pierre, réussit deux questions sur trois dès la fin de crèche et trois questions à partir du début de PS. Pierre échoue à la crèche, réussit deux questions en début de PS et un seulement en milieu de PS, ce qui signifie soit qu'il était fatigué en fin de protocole, soit que les compétences logico-arithmétiques sont encore fragiles.

Théo semble appartenir à la catégorie d'enfant (sous réserve que l'on puisse valider cette hypothèse dans un échantillon plus grand) dont les performances numériques croissent au même rythme, sans discordance importante entre la chaîne numérique, la cardinalité en réception, ni en production, au contraire de Pierre, qui présente une forte dissociation entre l'étendue de sa chaîne numérique et ses performances mathématiques.

3.2.3 Conclusion des études de cas longitudinales

Pour ces deux enfants, comme pour l'ensemble de l'échantillon, on constate entre le stade de la fin de crèche et le début de petite section maternelle, une évolution très rapide des performances. Par ailleurs, les deux enfants testés en fin de crèche et re-testés deux fois en école maternelle présentent des profils différents quant à l'évolution des compétences numériques et arithmétiques. Sur 8 mois, en les testant environ tous les 3 mois, nous avons pu constater le développement rapide de l'ensemble de leurs résultats. Ces deux enfants sont performants, et obtiennent des résultats le plus souvent supérieurs à la moyenne. Mais ils ne semblent pas passer par le même « chemin cognitif » pour parvenir au même résultat. Cette hétérogénéité des profils est sans doute en partie explicable par le jeune âge de l'échantillon et les fortes disparités inter-individuelles que l'on peut relever. Mais de plus, comme notre étude le montre, on trouve même sur des échantillons suffisamment représentatifs, des profils différents, ce qui rend délicate et complexe l'étude du développement des compétences numériques et mathématiques.

DISCUSSION

(Rédaction commune de Florence Bouvier et Marie-Aline Catier)

Notre hypothèse de travail était qu'en se situant au tout début de la scolarité des enfants, avant tout apprentissage formel des mathématiques, et à un stade de développement du langage relativement limité, l'influence des habiletés numériques non symboliques pourrait être décelée dans les performances mathématiques des enfants, notamment dans les épreuves de cardinalité et d'arithmétique, par les analyses de régression.

Nous avons ainsi testé la mémoire à court terme (phonologique et visuo-spatiale) et la discrimination des quantités, le subitizing n'étant testé qu'indirectement dans les sub-tests de cardinalité.

Nos résultats confirment la forte influence du langage dans la performance arithmétique, dès la première année de maternelle, ce qui est normal puisqu'à cet âge les mathématiques utilisent déjà le code verbal, dans le dénombrement par exemple. Ce résultat est par ailleurs conforme aux études sur les liens entre le langage et les mathématiques chez l'enfant (cf. partie théorique) : dès le début de la petite section, les résultats au sub-test « lexique » expliquent 37 % de la variance pour le sub-test « combien ? » et 47% pour le sub-test « donne-moi ». L'analyse qualitative a révélé aussi l'effondrement des performances d'un enfant de milieu non francophone, lié à l'insuffisance de ses progrès langagiers. Une étude sur un échantillon plus vaste d'enfants d'un faible niveau linguistique pourrait permettre de confirmer ce résultat. Cependant cette conclusion doit être nuancée par le fait que notre test recourait essentiellement au matériel verbal : il est donc logique que le langage apparaisse dans les facteurs contributifs de la performance.

Nos résultats confirment également l'influence de la mémoire à court terme, phonologique et visuo-spatiale : ainsi dans notre modèle, en milieu de PS, le Corsi explique 24% de la variance à l'épreuve de cardinalité en production. L'empan de chiffres intervient à 7% de la variance pour la même épreuve mais 4 mois plus tôt.

En revanche, l'influence de la discrimination des quantités n'est décelable qu'une fois, en fin de PS (5% de variance au sub-test « combien ? » et 8% de variance à l'épreuve « donne-moi »). Ce résultat, inférieur à nos prévisions, signifie-t-il que l'influence de cette compétence, décelée dès les premiers mois du bébé, nécessite un niveau de développement du langage suffisant, ou un niveau d'accès suffisant à la cardinalité pour être significative ?

Par ailleurs, à la même période, nous avons la preuve que le subitizing non symbolique rentre dans le champ du code verbal : nous voyons ainsi qu'à l'épreuve « combien ? », la réponse correcte à 2 et 3 augmentent beaucoup plus rapidement qu'à 4, ce qui irait dans le sens de l'hypothèse de

LeCorre et Carey (2007, [53]), du développement du nombre à partir de la mise en lien subitizing - chaîne verbale.

Dans ce cas, nos résultats tendraient à montrer que d'abord le subitizing (ou accès immédiat aux petites quantités) « rencontre » le code verbal et conduit à la maîtrise des premières cardinalités. Puis, avec la compréhension conceptuelle que « un rang de plus dans la chaîne numérique c'est un de plus » et l'intervention du système de discrimination des numérosités, l'enfant parviendrait à la compréhension de 4 et tous les autres nombres. En tout état de cause, nos résultats ne sont pas contraires à l'hypothèse de LeCorre et Carey.

La contribution des mémoires à court terme est particulièrement nette, et confirme les liens entre nombre et langage d'une part, et nombre et espace d'autre part.

Enfin, notre étude longitudinale révèle que la performance en début de MS est très corrélée aux résultats de la PS. Nous pouvons constater que, même si 3 mois seulement séparaient les deux recueils de données, les résultats dès le début de la scolarité sont prédicteurs des performances futures, bien que nous ayons pu constater des rattrapages individuels.

L'ensemble de ces résultats valident nos deux hypothèses : d'une part un lien significatif est établi entre les mémoires à court-terme et les performances numériques, à un instant t et dans leur évolution au cours de la tranche d'âge étudiée, d'autre part le modèle global élaboré est statistiquement significatif.

De manière plus anecdotique, notre analyse quantitative révèle aussi quelques différences entre garçons et filles, notamment sur les compétences visuo-spatiales, en milieu de petite section. Ce point mérite probablement d'être approfondi, avec un échantillon plus large et d'autres épreuves. On pourrait se demander également si les profils sociaux économiques des enfants testés n'ont pas une influence sur les résultats obtenus : dans notre étude, ce critère est assez tranché, avec d'une part des enfants testés en ZEP, d'autre part des enfants testés dans une commune socialement et économiquement favorisée.

Notre analyse qualitative révèle également l'existence de profils différents dans l'accès à la cognition mathématique. L'échantillon de cette étude, bien que statistiquement significative, était limité. Seule une étude sur une population plus importante permettrait de confirmer l'existence de profils différents.

CONCLUSION

(Rédaction commune de Florence Bouvier et Marie-Aline Catier)

Notre étude conclut à l'influence, chez les enfants de 3 à 4 ans, du langage et de la mémoire à court terme visuo-spatiale dans la performance mathématique.

Ces résultats rejoignent ainsi la typologie classique de la dyscalculie, ne pouvant être diagnostiquée que plusieurs années après.

Les éléments théoriques que nous avons développés plus haut, décrivaient les liens multiples entre nombre et espace.

Nous trouvons l'incidence de la mémoire visuo-spatiale sur la performance à l'instant t mais également comme élément prédicteur des performances mathématiques futures.

Ce facteur révélé par l'analyse de régression, s'il était confirmé par une étude plus vaste, offrirait des perspectives de remédiation. Par ailleurs, ces résultats peuvent apporter des éléments pédagogiques pour l'enseignement des mathématiques, et c'est bien ce qui a motivé l'intérêt des enseignants pour notre étude. Ainsi, des compétences hors du champ de la pédagogie classique mériteraient d'être explorées, notamment les mémoires à court terme, qui influencent, de fait aussi bien l'acquisition du lexique pour la mémoire à court terme verbale (Majerus et Poncelet, 2006, [56]), que l'acquisition des mathématiques en ce qui concerne la mémoire visuo-spatiale.

Nous proposons par ailleurs une nouvelle hypothèse, à confirmer par une étude plus vaste, de l'existence de différents profils « d'apprentis mathématiciens ». Cette hypothèse pourrait justifier la combinaison dès le plus jeune âge de plusieurs méthodes d'apprentissage afin de conduire le plus grand nombre d'enfants au même niveau de connaissances.

Notre protocole, outre la recherche, avait également vocation à pouvoir constituer un outil de screening permettant d'objectiver les difficultés mathématiques précoces en une dizaine de minutes. Même si certaines épreuves sont perfectibles, l'outil a montré qu'il était fiable et permet de recueillir un grand nombre de données sur le développement cognitif de l'enfant.

BIBLIOGRAPHIE

1. Baddeley, A.D., Hitch, G.J. (1974). Working memory. In G.H Bower (Ed.), *The psychology of learning and motivation, Vol 8* (pp. ii-ix). London : Academic Press.
2. Bannoff, S., Lefevre, J., Bisanz, J., Fast, L., Kamawar, D., Smith-Chant, B. L., Skwarchuk, S.-L. (2006, June). *The Corsi block-tapping task in children : Exploring performance, stimulus variations, and relations to early mathematical ability*. Poster presented at the annual meeting of the Canadian Society for Brain, Behaviour, and Cognitive Science, Saskatoon, SK
3. Bisanz, J., Sherman, J.L., Rasmussen, C., Ho, E. (2005). Development of arithmetic skills and knowledge in preschool children. In J.I.D. Campbell (Ed.), *Handbook of mathematical cognition* (pp. 143-162). New-York : Psychology Press, 528 p.
4. Brissiaud, R. (1989). *Comment les enfants apprennent à calculer*. Paris : Ed. Retz, 287 p.
5. Brysbaert, M., Fias, W., Noël, M.P. (1998). The Whorfian hypothesis and numerical cognition : Is “twenty-four” processed in the same way as “four-and-twenty”?, *Cognition*, 66, 51-77
6. Buckley, P.B., Gilman, C.B. (1974). Comparison of digits and dots patterns, *Journal of Experimental Psychology*, 103, 1131-1136
7. Bull, R., Espy, K.A., Wiebe, S.A. (2008). Short-term memory, working memory, and executive functioning in preschoolers : longitudinal predictors of mathematical achievement at age 7 years, *Developmental Psychology*, 33, 205-228
8. Campbell, J.I.D., Clark, J.M. (1988). An encoding complex view of cognitive number processing : Comment on McCloskey, Sokol and Goodman (1986), *Journal of Experimental Psychology, General*, 117, 204-214
9. Carey, S. (2001). Cognitive foundation of arithmetic : Evolution and ontogenesis, *Mind and language*, 16 (1), 37-55
10. Cattell, J.M. (1886). Über die Trägheit der Netzhaut und des Sehcentrums, *Philosophische Studien*, 3, 94-127
11. Chomsky, N. (1969). *Structures syntaxiques*, trad. de l’américain. Paris : Le Seuil, 141 p.
12. Clearfield, M.W., Mix, K.S. (1999). Number vs contour length in infants discrimination of small visual sets, *Psychological Science*, 10, 408-411
13. Condry, K.F., Spelke, E.S. (2008). The development of language and general concepts : the case of natural numbers, *Journal of Experimental Psychology*, 2008, Vol. 137, No. 1, 22-38

14. Dantzig, T. (1940). *Number, the language of science*. London : George Allen and Unwin, 320 p.
15. De Agostini, M., Kremin, H., Curt, F., Dellatolas G. (1996). Immediate Memory in Children aged 3 to 8. Digits, Familiar Words, Unfamiliar Words, Pictures and Corsi, *ANAE*, 1996, 8, 4-10
16. Dehaene, S., Cohen, L. (1991). Two mental calculation systems : a case study of severe dyscalculia with preserved approximation, *Neuropsychologia* 1991, 29, 1045-1074
17. Dehaene, S., Bossini, S., Giraux, P. (1993). The mental of representation of parity and numerical magnitude, *Journal of Experimental Psychology, General*, 122, 371-396
18. Dehaene, S. (1997 et 2010). *La bosse des maths*. Paris : Editions Odile Jacob, 377 p.
19. Deloche, G., Séron, X. (1987). Numerical transcoding : A general production model. In G. Deloche Et X. Séron (Eds), *Mathematical disabilities : a cognitive neuropsychological perspective* (pp. 137-170). Hillsdale : Lawrence Erlbaum, 281 p.
20. Dempster, F.N. (1985). Short term memory development in childhood and adolescence. In C.J. Brainerd Et M. Pressley (Eds), *Basic processes in memory development*. New-York : Springer-Verlag, 345 p.
21. Descoedres, A., (1930). *Le développement de l'enfant de deux à sept ans* (pp. 252-254). Neuchâtel : Ed. Delachaux et Niestlé, 333 p.
22. Duquesne, F. (2003). L'ECPN : Des situations-problèmes pour évaluer les principales fonctions du nombre, *Glossa*, 83, 4-19
23. Fayol, M. (2012). *L'acquisition du nombre* (pp. 40-66). Paris : Presses Universitaires de France, Coll. Que-sais-je ?, 127 p.
24. Fayol, M. (1990). *L'Enfant et le nombre : du comptage à la résolution de problèmes*. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé, 233 p.
25. Feigenson, L., Carey, S., Hauser, M. (2002). The representation underlying infants' choice of more : files vs analog magnitudes, *Psychological Science*, 13 (2), 150-156
26. Fernandes, D.M., Church, R.H. (1982). Discrimination of the number of sequential events by rats, *Animal learning and Behavior*, 10(2), 171-176
27. Fuson, K., Richards, J., Briars, D.J. (1982). The acquisition and elaboration of the number word sequence. In CJ Brainerd (Ed.), *Children's logical and mathematical cognition : Progress in cognitive developmental research* (pp. 33-92). New York : Springer-Verlag, 216 p.
28. Gaonac'h, D., Larigauderie, P. (2000). *Mémoire et fonctionnement cognitif : La mémoire de travail*. Paris : Armand Colin (collection U), 284 p.

29. Gaonac'h, D., Pross, N. (2005). Le développement de la mémoire de travail. In *Neuropsychologie de l'enfant et troubles du développement* (pp. 185-203). Marseille : Solal, 416 p.
30. Gaillard, F., Séron, X., Christinat, C. (2000). Numerical, Test neurocognitif pour l'apprentissage du nombre et du calcul. Actualités Psychologiques, Université de Lausanne, édition spéciale.
31. Gallistel, C.R., Gelman, R. (1992). Preverbal and verbal counting and computation, *Cognition*, 44, 43-74
32. Gathercole, S.E., Baddeley, A.D. (1989). Evaluation of the role of phonological STM in the development of vocabulary in children : a longitudinal study, *Journal of Memory and Language*, 28, 200-213
33. Geary, D.C., Hoard, M.K., Hamson, C.-O. (1999). Numerical and arithmetical cognition : Pattern of functions and deficits in children at risk for a mathematical disability, *Journal of Experimental Child Psychology*, 74, 213-239
34. Gelman, R., Gallistel, C.R. (1978). *The Child's Understanding of Number*. Cambridge, MA : Harvard University Press, 260 p.
35. Gertsman, J. (1940). Syndrom of finger agnosia, disorientation for right and left, agraphia and acalculia, *Archives of Neurology and Psychiatry*, 1940, 44, 398-408
36. Gilmore, C.K., Mac Carthy, S.E., Spelke, E. (2010). Non-symbolic arithmetic abilities and mathematic achievement in the first year of formal schooling, *Cognition*, 115, 394-406
37. Greco P. (1962). Quantité et Quotité : nouvelles recherches sur la correspondance terme à terme et la conservation des ensembles. In P. Gréco et A. Morf (Eds.), *Structures numériques élémentaires* (pp. 1-70). Paris : Presses Universitaires de France, 232 p.
38. Groupe CIMETE (1995) (Compétences et incompétences en mathématiques chez les enfants présentant des troubles exceptionnels), Compétences et incompétences en arithmétique : une aide au diagnostic et à l'action pédagogique particulièrement destinée aux enfants affectés de difficultés sévères d'apprentissage. In ANAE, Hors série Dyscalculies, 1995, pp. 58-63
39. Halberda, J., Mazocco, M., Feigenson, I. (2008). Individual differences in non-verbal acuity correlate with maths achievement, *Nature*, 455, 665-668
40. Hauser, M., Mac Neilage, P., Ware, M. (1996). Numerical representations in primates. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 93, 1514-1517
41. Heremans, M. (2009). <http://matheval.new.fr/>
42. Houdé, O. (2009). *La psychologie de l'enfant*. Paris : Presses Universitaires de France, Coll. Que-sais-je ?, 128 p.

43. Huntley-Fenner, G. (2001). Why count stuff ? Young preschoolers do not use numbers for measurement in continuous dimensions, *Developmental Science*, 4:4, 456-462
44. Huntley-Fenner, G., Carey, S., Solimando, A. (2002). Objects are individuals but stuff doesn't count : Perceived rigidity and cohesiveness influence infants' representations of small groups of distinct entities, *Cognition*, 85, 203-221
45. Hurford, J. R. (1987). *Language and number : The emergence of a cognitive system*. New York : Blackwell. 322 p.
46. Ifrah, G. (1994). *Histoire universelle des chiffres*. Paris : Robert Laffont, Bouquins, 1042 p.
47. Imbert, D. (2002). *Premières aptitudes numériques : une étude longitudinale*, Poster présenté lors de la Troisième journée des troubles d'apprentissage du langage oral et écrit, Aix en Provence, France, 15 novembre 2002
48. Ioteyko, J. (1912). *1^{er} Congrès de Pédologie tenu à Bruxelles, Comptes-rendus des séances, communications, (rapports), Vol. 1 Observations relatives à l'évolution des notions de quantités continues et discontinues chez l'enfant*. Bruxelles : Misch et Thron. Cité par Descoedres, A., (1930), *Le développement de l'enfant de deux à sept ans* (p.241). Neuchâtel : Ed. Delachaux et Niestlé, 333 p.
49. Izard, V., Dehaene-Lambertz, G., Dehaene, S. (2008). *PLOS Biology*, 6(2), e11.
50. Kilpatrick, J. (1987). *What Constructivism Might Be in Mathematics Education*, Paper presented at the Eleventh International Conference of the Psychology of Mathematical Education, Montreal, Canada, 1987
51. Klein, J.S., Bisanz, J. (2000). Preschoolers doing arithmetics : the concepts are willing, but the working memory is weak, *Canadian Journal of Experimental Psychology*, 54:2, 105-115
52. Krajewski, K., Schneider, W. (2009). 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, 516-531
53. Le Corre, M., Carey, S., (2007). One, two, three, four, nothing more : An investigation of the conceptual sources of verbal counting principles, *Cognition*, 105, 395-438
54. Lefevre, J.A., Fast, L., Skarchuk, S.L., Smith-Chant, B.L., Bisanz, J., Kamawar, D., Penner-Wilger, M. (2010). Pathways to Mathematics : longitudinal Predictors Performance, *Child development*, vol.81, 6, 1753-1767
55. Lipton, J., Spelke, E. (2005). Preschool children master the logic of number word meanings, *Cognition*, 2005, 1-10
56. Majerus, S., Poncelet, M., Greffe, C., Van der Linden, M. (2006). Relations between vocabulary development and verbal short-term memory : The relative importance of short-

- term memory for serial order and item information, *Journal of Experimental Child Psychology*, 93, 95-119
57. Mandler, G., Shebo, B.J. (1982). Subitizing : an analysis of its component processes, *Journal of experimental Psychology, General*, 111, 1-22
58. Marinthe, C., Fayol, M., Barrouillet, P. (2005). Gnosies digitales et développement des performances arithmétiques. In Van Hout, A., Meljac, C., Fischer, J.P., *Troubles du calcul et dyscalculie chez l'enfant*. Paris : Masson, 2^e éd., 425 p.
59. Matsuzawa, T. (1985). Use of number by a chimpanzee, *Nature*, 315 (6014), 57-59
60. Mc Closkey, M., Caramazza, A., Basili, A. (1985). Cognitive mechanisms in number processing and calculation : Evidence from dyscalculia, *Brain Cogn.*, 1985, 4, 171-196
61. Mehler, J., Bever, T.G. (1967). Cognitive capacity of very young children, *Science*, 158, 141-142
62. Meljac, C., Lemmel, G. (1999). Batterie UDN II : Manuel d'utilisation et matériel. Paris : ECPA
63. Miller, K. F., Smith, C. M., Zhu, J., Zhang, H. (1995). Preschool origin of cross-national differences in mathematics competence, *Psychological Science*, 6(1), 56-60
64. Milner, B. (1971). Interhemispheric differences in the localization of psychological processes in man, *Br Med Bull.*, 1971, 27, 272-277
65. Mix, K.S., Levine, S.C., Huttenlocher, J. (1997). Numerical abstraction in infants : another look, *Developmental Psychology*, 33(3), 423-428
66. Miyake, A., Friedman, N.P., Rettinger, D.A., Shah, P., Hegarty, M. (2001). How are visuospatial working memory, executive functioning, and spatial abilities related ? A latent-variable analysis, *Journal of Experimental Psychology, General*, 130, 621-640
67. Mundy, E., Gilmore, C.K. (2009). Children's mapping between symbolic and nonsymbolic representations of number, *Journal of Experimental Child Psychology*, 103, 490-502
68. Noël, M.P. (2004). *Working memory and counting skills in preschoolers*, Poster présenté au "European working memory symposium EWOMS II", Beaune, France, 22-24 avril 2004
69. Noël, M.P. (2005). Déficits cognitifs de base dans la dyscalculie développementale, *ANAE*, 2005, 17, 299-304
70. Noël, M.P. (2005). *La dyscalculie, trouble du développement numérique chez l'enfant*. Marseille : Solal, 251 p.
71. Patro, K., Haman, M. (2012). The spatial-numerical congruity effect in preschoolers, *Journal of Experimental Child Psychology*, 111 (2012), 534-542
72. Piaget, J., Szeminska, A. (1941). *La genèse du nombre chez l'enfant*. Neuchâtel : Delachaux et Niestlé, 310 p.

73. Piazza, M., Facoetti, A., Trussardi, A.N., Berteletti, I., Conte, S., Lucangeli, D., Dehaene, S., Zorzi, M. (2010). Developmental trajectory of number acuity reveals a severe impairment in developmental dyscalculia, *Cognition*, 116, 33-41
74. Pica, P., Lemer, C., Izard, V., Dehaene, S. (2004). Exact and approximate arithmetic in an Amazonian Indigene Group, *Science*, 306, 499-503
75. Resnick, L.B. (1983). A developmental theory of number understanding. In HP Ginsburg (Ed.), *The development of mathematical thinking* (pp. 109-151). New-York : Academic Press, 388 p.
76. Rousselle, L., Palmers, E., Noël, M.P. (2004). Magnitude comparison in preschoolers : What counts ? Influence of perceptual variables, *Journal of Experimental Child Psychology*, 87, 57-84
77. Rousselle, L., Noël, M.P. (2007). Basic numerical skills in children with mathematical learning disabilities : a comparison of symbolic vs non symbolic number magnitude processing, *Cognition*, 102, 361-395
78. Savigny, M. (2001). *BATELEM-R*. Paris : ECPA.
79. Séron, X., Pesenti, M., Noël, M.P., Deloche, G., Cornet, J.A. (1992). Images of numbers, or When 98 is upper left and 6 sky blue, *Cognition*, 44, 159-196
80. Séron, X., Fayol, M. (1994). Number transcoding in children : a functional analysis, *British Journal of Developmental Psychology*, 12, 281-300.
81. Simon, T.J. (1997). Reconceptualizing the origins of number knowledge : a “non numerical” account, *Cognitive development*, 12, 349-372
82. Snowling, M., Adams, J.W., Bishop, D.V., Stothard, S.E. (2001). Educational attainments of school leavers with a preschool history of speech-language impairments, *International Journal of Language and Communication Disorders*, 36, 173-183
83. Soja, N. (1990). Semantic inferences : The role of count/mass syntax, *Papers and Reports on Child Language Development*, 29
84. Starkey, P., Spelke, E.S., Gelman, R. (1983). Detection of intermodal numerical correspondences by human infants, *Cognition*, 36, 97-127
85. Trick, L.M., Pylyshyn, Z.W. (1994). Why are small and large numbers enumerated differently ? A limited capacity preattentive stage in vision, *Psychological Review*, 100, 80-102
86. Valian, V. (1986). Syntactic categories in the speech of young children, *Developmental Psychology*, 22, 562-579
87. Van Nieuwenhoven, C., Noël, M.P., Grégoire J. (2001). TEDI-MATH, Test diagnostique des compétences de base en mathématiques. Paris : ECPA.

88. Van Oeffelen, M.P., Vos, P.G. (1982). A probabilistic model for the discrimination of visual number, *Perception and psychophysics*, 32, 163-170
89. Von Aster, M., Dellatolas, G. (2001). ZAREKI-R, Batterie pour l'évaluation du traitement des nombres et du calcul chez l'enfant. Paris : ECPA.
90. Wynn, K. (1990). Children's understanding of counting, *Cognition*, 36, 155-193
91. Wynn, K. (1992). Children's acquisition of the number words and the counting system, *Cognitive Psychology*, 24, 220-251
92. Wynn, K. (1992). Addition and subtraction by human infants, *Nature*, 358, 749-750
93. Xu, F., Spelke, E.S., Goddard, S. (2005). Number sense in human infants, *Developmental Science*, 8, 88-101
94. Zesiger, P. (2005). Les troubles du langage : quel impact sur l'apprentissage des mathématiques ?, *ANAE (Approche Neuropsychologique des Apprentissages chez l'Enfant)*, 2005, 17, 293-298
95. Zorzi, M., Priftis, K., Umiltà, C. (2002). Brain damage : neglect disrupts the mental line, *Nature*, 417 (6885), 138-139

ANNEXES

Annexe 1 : photographie du matériel de test	2
Annexe 2 : feuille de passation du protocole	3
Annexe 3 : planches du protocole	5
Annexe 4 : planche de l'épreuve type Corsi, au format A4	29
Annexe 5 : demandes d'autorisation parentale	30

Ensemble du matériel utilisé pour le protocole :



Feuille de passation du protocole		
Ecole :	Classe :	DATE :
Nom :	PRENOM :	Sexe :
DATE DE NAISSANCE :	Langue maternelle :	Fratrie :

Matériel : fruits en bois (5 pommes, 3 bananes, 2 fraises), un panier opaque, deux caisses/boîtes, un oiseau en peluche, du riz, des pâtes, du pain

En bleu les consignes pour l'examineur, en noir gras les questions à poser à l'enfant.

Consignes	Score	Commentaires							
Pré-requis linguistiques nécessaires à la passation du test									
Mettre en place devant l'enfant : le panier, la caisse, 1 pomme, 1 banane, 1 fraise.									
Montre-moi la banane									
Montre-moi la boîte									
Planche 1 avec les pictogrammes, pour la désignation sur images Montre-moi...	la balance	le panier	la table	la fraise					
En prenant le panier dans la main Qu'est-ce que c'est ?									
En prenant la pomme dans la main Qu'est-ce que c'est ?									
En prenant la fraise dans la main Qu'est-ce que c'est ?									
Planche 2 (<i>sur vs à côté</i>) Montre-moi : la pomme est sur la balance									
Planche 3 (<i>sous vs sur</i>) Montre-moi : la banane est sous la table									
Planche 4 (<i>dans vs dehors</i>) Montre-moi : la fraise est dans le panier									
Planche 5 (<i>dehors vs dedans</i>) Montre-moi : la banane est dehors									
Planche 6 (<i>1 vs 3 pommes, « le plus »</i>) Montre-moi où il y a le plus de pommes									
Planche 7 (<i>grand vs petit</i>) Montre-moi la grosse fraise									
Planche 8 (<i>petit vs gros</i>) Montre-moi la petite pomme									
On rajoute 2 pommes et 2 bananes sur la table (<i>un vs des</i>).									
En tendant le panier Maintenant, tu mets une pomme dans ce panier									
En tendant la boîte Maintenant tu mets des bananes dans cette boîte									
Empan mnésiques									
Empan de chiffres : Répète après moi ce que j'ai dit (ou tu redis la même chose après moi) <i>Si c'est échoué sur les 3 essais, ne pas passer à la longueur d'empan suivante. Lecture lente avec 1 nombre par seconde environ, sans fléchissement du ton à la fin</i>	1 5	8 2	6 9	5 2 9	3 8 1	4 7 2	7 2 9 3	2 6 1 4	5 3 2 6
Empan purement verbal : Répète après moi les mots que j'ai dit, dans le même ordre	pomme chat		bateau coucou		banane poupée ballon				
Epreuve visuo-spatiale (type Corsi) : <i>Avec l'oiseau en peluche sur la planche de fleurs numérotées</i> Je te montre le chemin que fait l'oiseau. Après moi tu devras lui faire refaire exactement le même chemin, en passant sur les mêmes fleurs	8 5	6 4	4 7 2	8 1 5	3 4 1 7	6 1 5 8			
Epreuve mixte 1 : empan verbal avec support concret <i>A faire avec l'oiseau et les ingrédients à poser dans l'ordre (ne pas les retirer pour que l'enfant fasse l'épreuve)</i> Après avoir voyagé, l'oiseau a faim. Je te dis ce qu'il mange, tu dois me redire les aliments dans le même ordre en me les montrant	pomme riz		fraise pain		pâte pomme fraise		riz fraise pâte pomme		

Epreuve mixte 2 : mémoire visuelle (notion d'ordre) et empan verbal <i>A faire avec l'oiseau et les ingrédients à mettre dans l'ordre dans la panier, en verbalisant. Vider le panier pour que l'enfant fasse l'épreuve.</i> Maintenant je mets la nourriture pour l'oiseau dans un panier, d'abord ..., ensuite ..., (enfin ...). A toi de me dire dans le même ordre ce que l'oiseau va manger.	pomme fraise	riz pain	pâte fraise pomme		
Epreuve mixte 3 : mémoire visuelle (notion d'ordre) et dénomination <i>A faire avec les 3 fruits et le panier, sans verbaliser</i> Sans parler, je vais mettre des fruits dans le panier. Après, tu me diras quels fruits j'ai mis dans le panier, dans le même ordre.	fraise pomme	pain fraise	pomme fraise pain		
Connaissance de la chaîne numérique					
Et toi, tu sais compter jusqu'à combien ? Montre-moi comment tu comptes, vas-y					
Tu peux compter à partir de 3 ? 3, 4...					
Est-ce que tu sais compter à l'envers, à partir de 5 par exemple					
Test de numérosité par discrimination					
Présentation des planches 9 à 13 Montre-moi où il y a le plus de pommes <i>Si consigne mal comprise, dire plutôt Montre-moi où il y en a beaucoup</i>	pl 9 5 / 10	pl 10 10 / 6	pl 11 6 / 9	pl 12 10 / 8	pl 13 9 / 10
Présentation des planches 14 à 17 Montre-moi où il y a le plus de fraises		pl 14 6 / 8	pl 15 8 / 10	pl 16 10 / 9	pl 17 12 / 11
Présentation des planches 18 et 19 Montre-moi où il y a le plus de bananes			pl 18 10 / 8		pl 19 18 / 20
Tests de la cardinalité					
Planche 20 (3 pommes) Dis-moi combien il y a de pommes					
Planche 21 (1 fraise) Et combien y a t'il de fraises ?					
Planche 22 (4 fraises) Combien y a t'il de fraises ?					
Planche 23 (2 bananes) Compte* les bananes					* NB la compréhension de « compter »
Planche 24 (5 pommes) Dis-moi combien il y a de pommes					
En tendant la boîte Maintenant mets 4 pommes dans la boîte					
En approchant le panier Tu peux mettre 2 fraises dans le panier					
En donnant la boîte (avec toutes les pommes) Donne-moi 5 pommes					
En donnant le panier (avec les fraises) Donne-moi 1 fraise					
Préparer la caisse avec 1 pomme, 1 banane, 1 fraise Combien y a t'il de fruits ? Ils sont pareils les fruits ? Cela te gêne pour les compter ?					Gêne par rapport à l'hétérogénéité ?
Tendre le panier (opaque) à l'enfant Maintenant, mets 3 bananes dans le panier					
Epreuves de calcul					
A partir de l'item précédent, enlever 1 banane en le montrant à l'enfant J'enlève une banane du panier pour la manger, combien y a t'il de bananes dans le panier maintenant ?					
Vider la panier, y mettre 1 pomme. J'ai une pomme dans mon panier, je vais au marché en acheter une autre. La marchande me donne une pomme (rajouter une pomme dans le panier). Combien j'ai de pommes maintenant ?					
Comparaison					
Préparer une caisse avec 1 pomme, une caisse avec 3 pommes En montrant les deux caisses Comment faire pour que ce soit pareil ?					
En montrant les fruits Tu peux me montrer pareil de doigts ?	2 bananes	3 fraises	4 pommes		

Planche 1

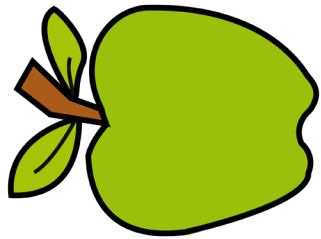
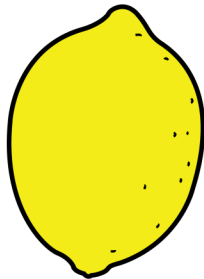
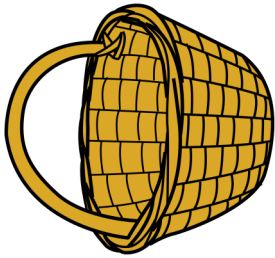
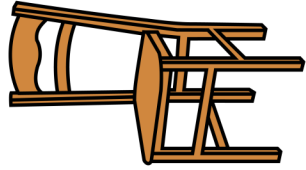
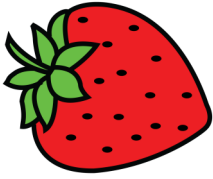
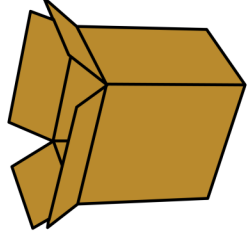
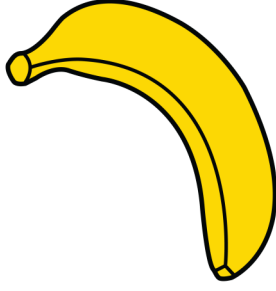
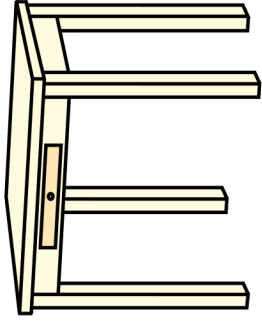


Planche 2

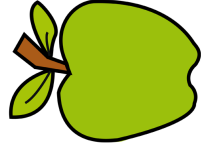
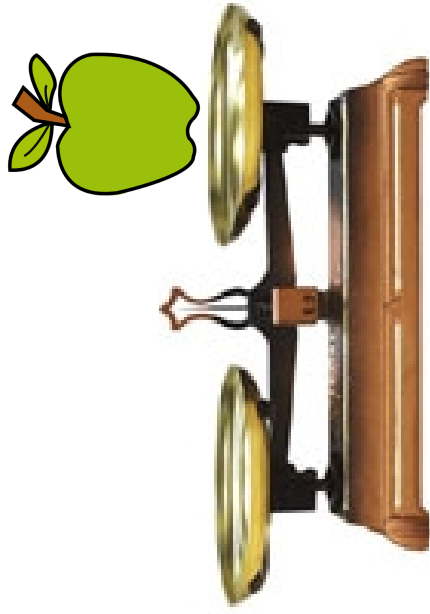
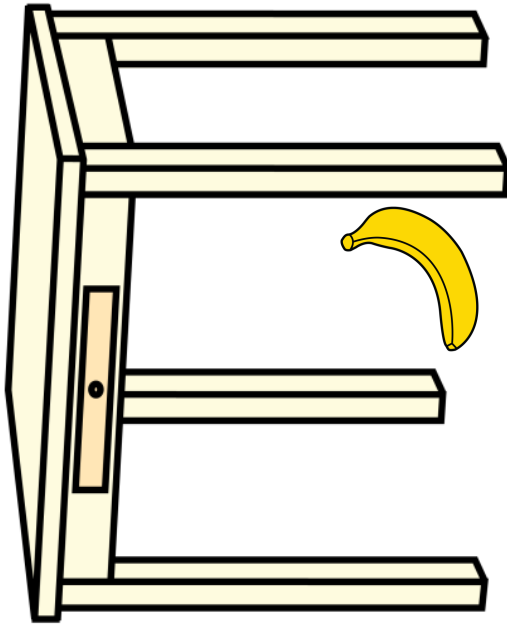
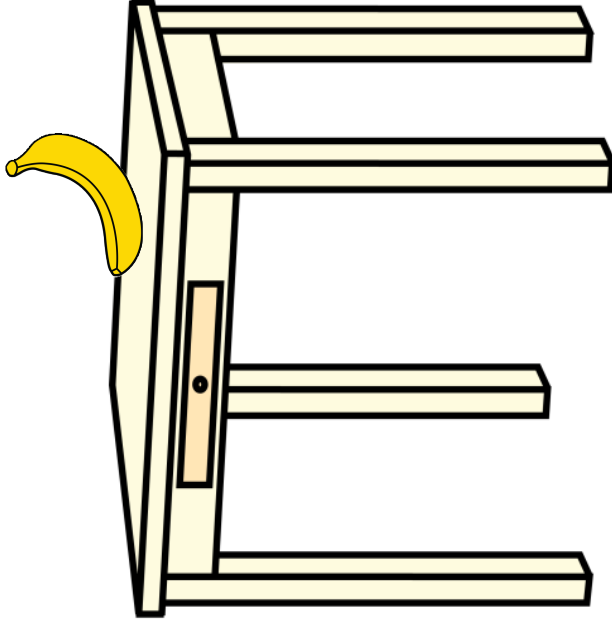
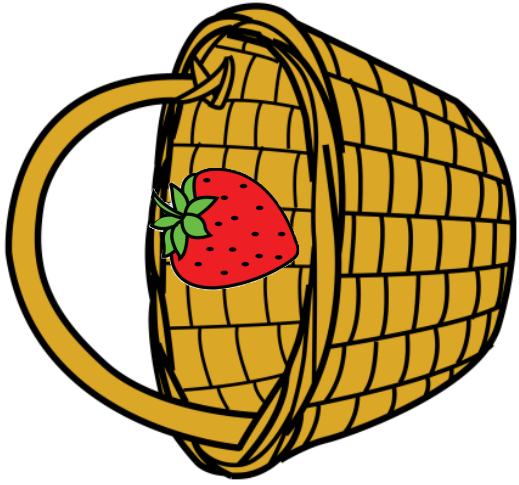
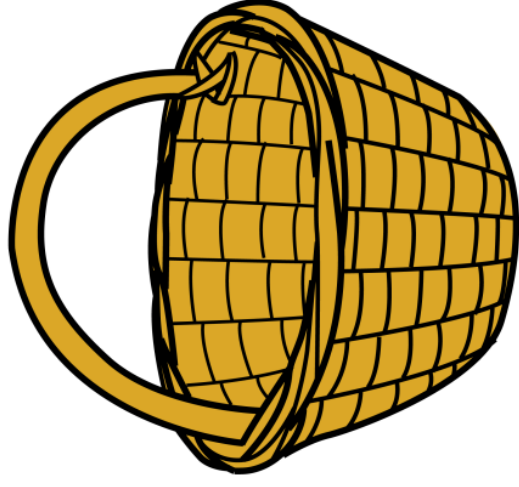
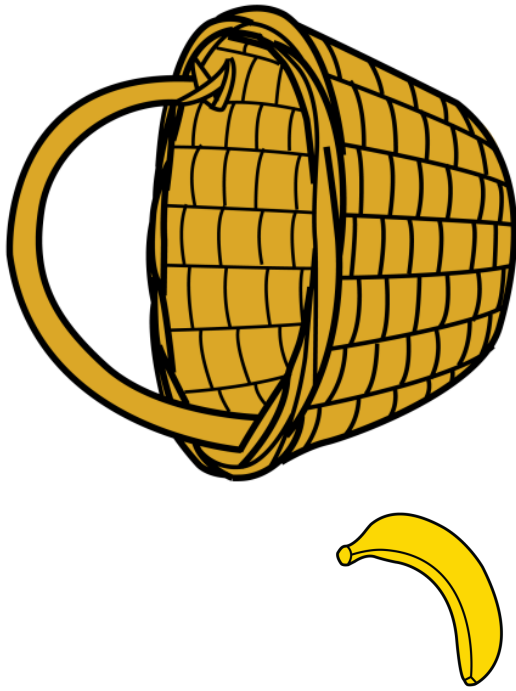
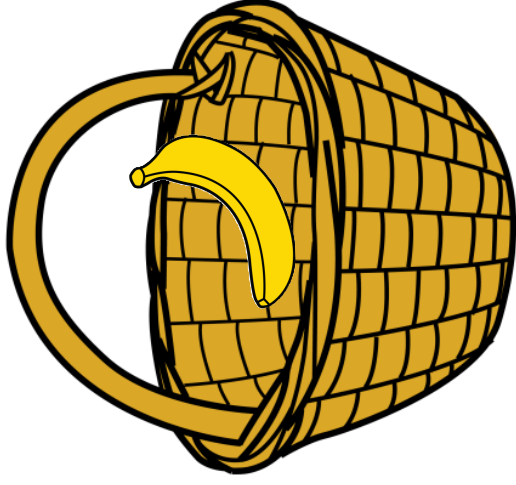
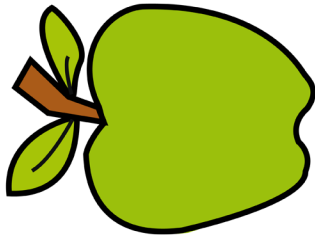
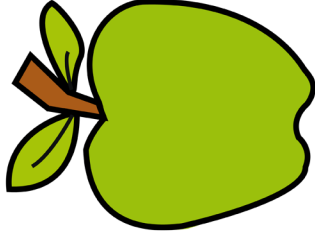
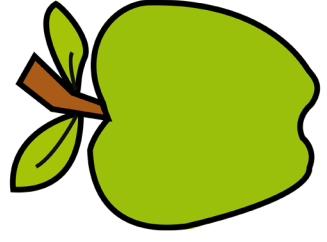
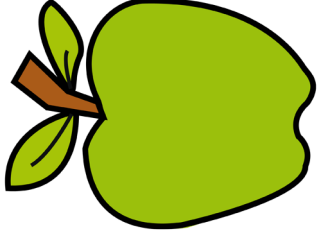


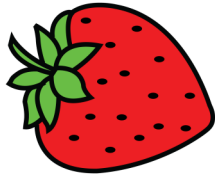
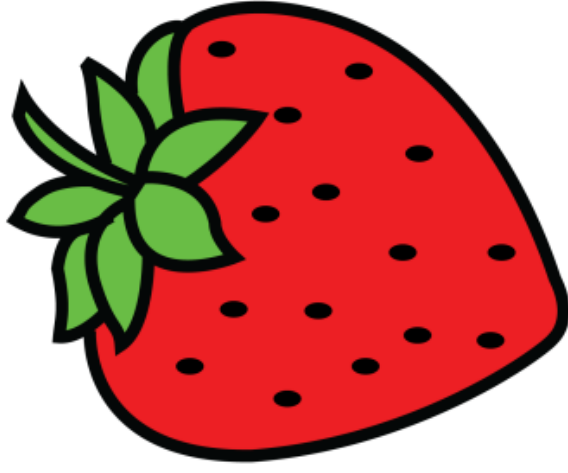
Planche 3

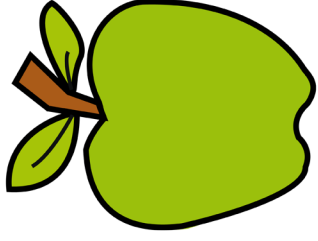
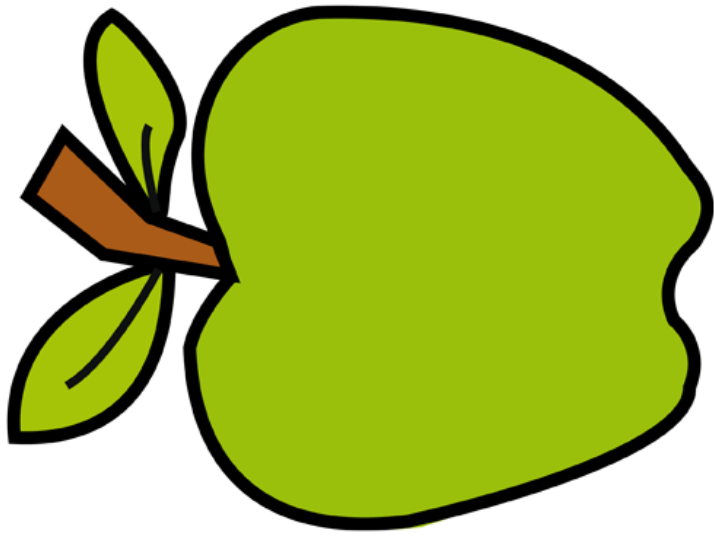


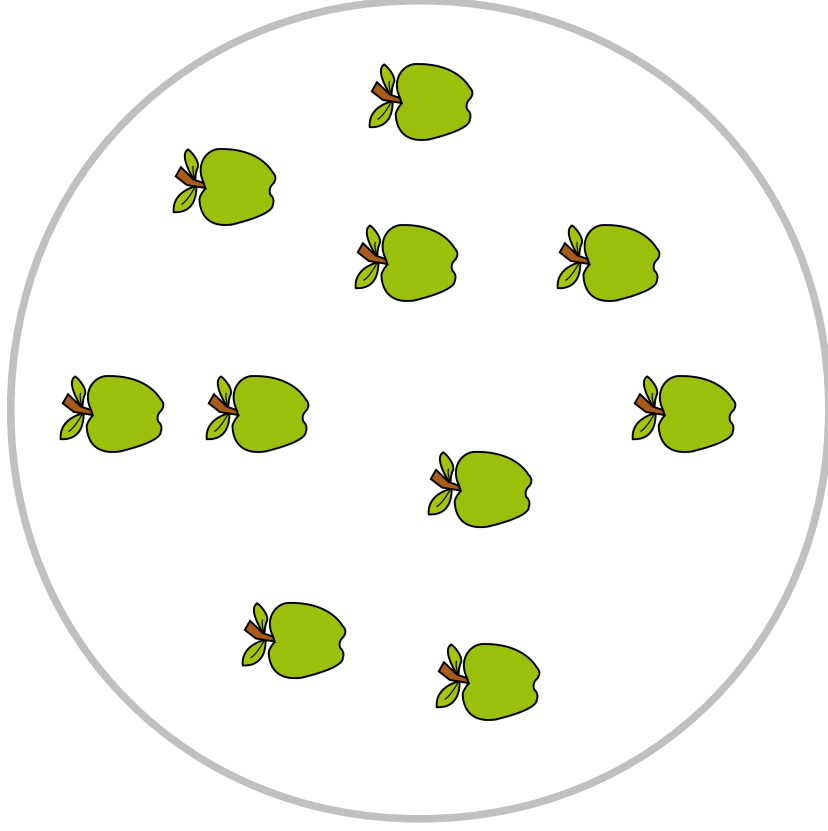
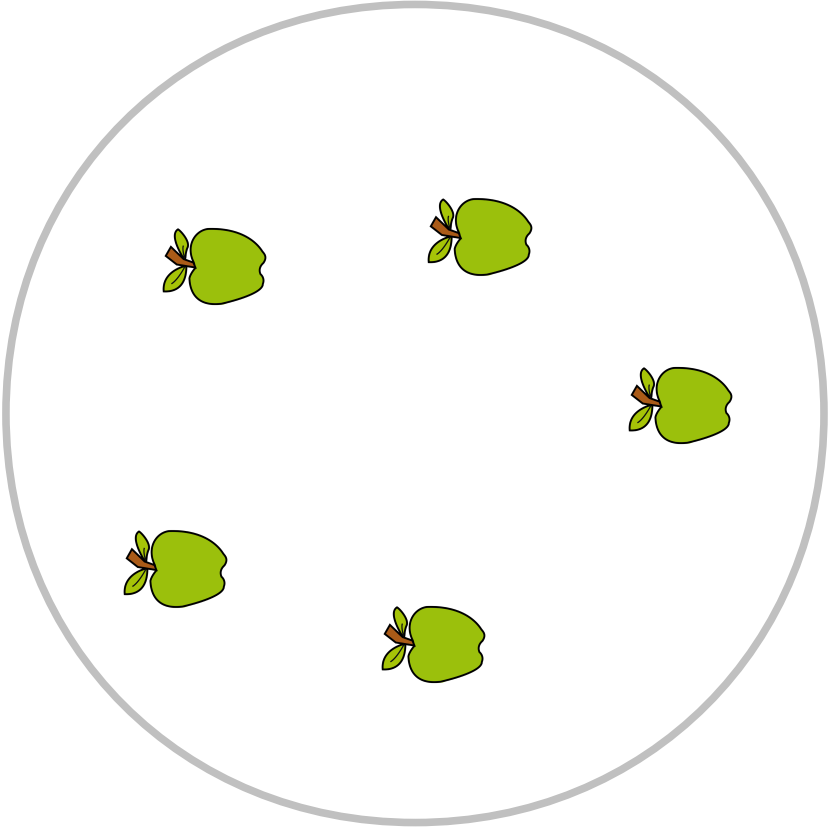


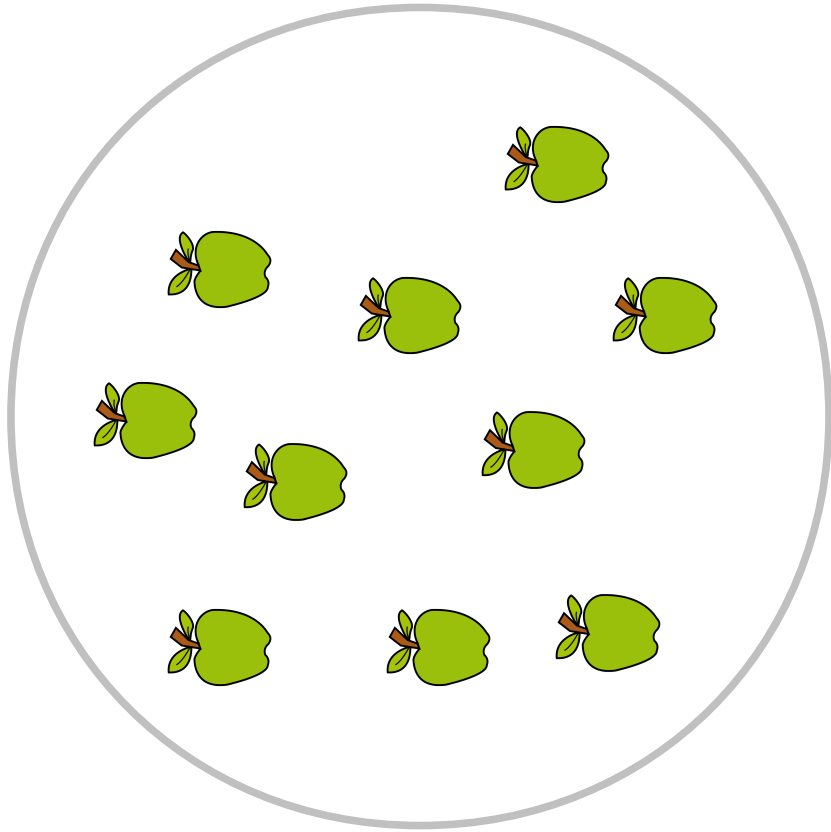
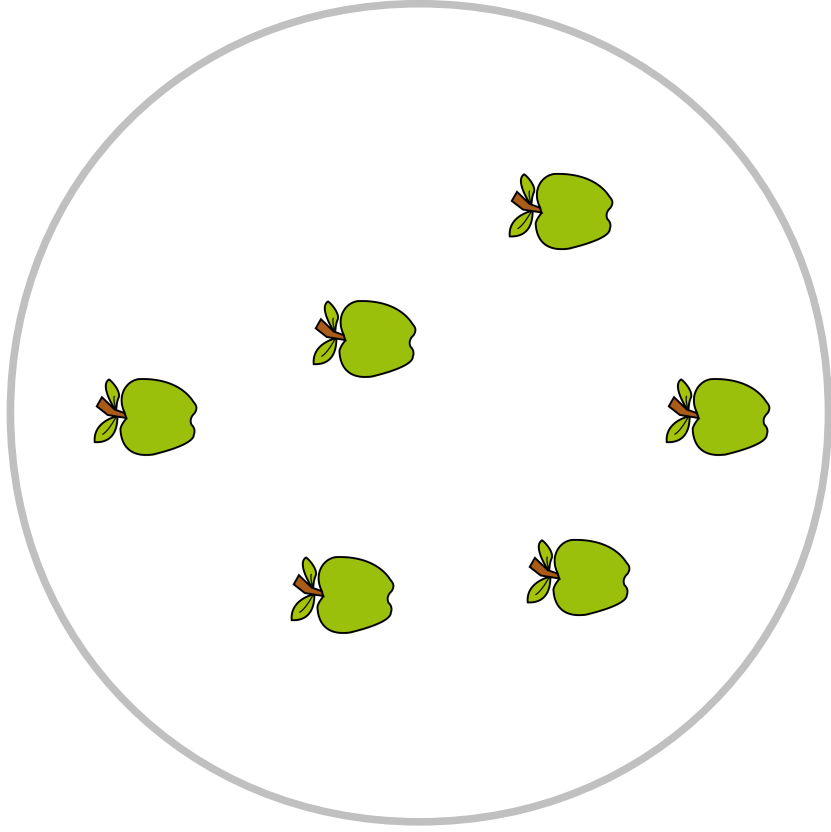


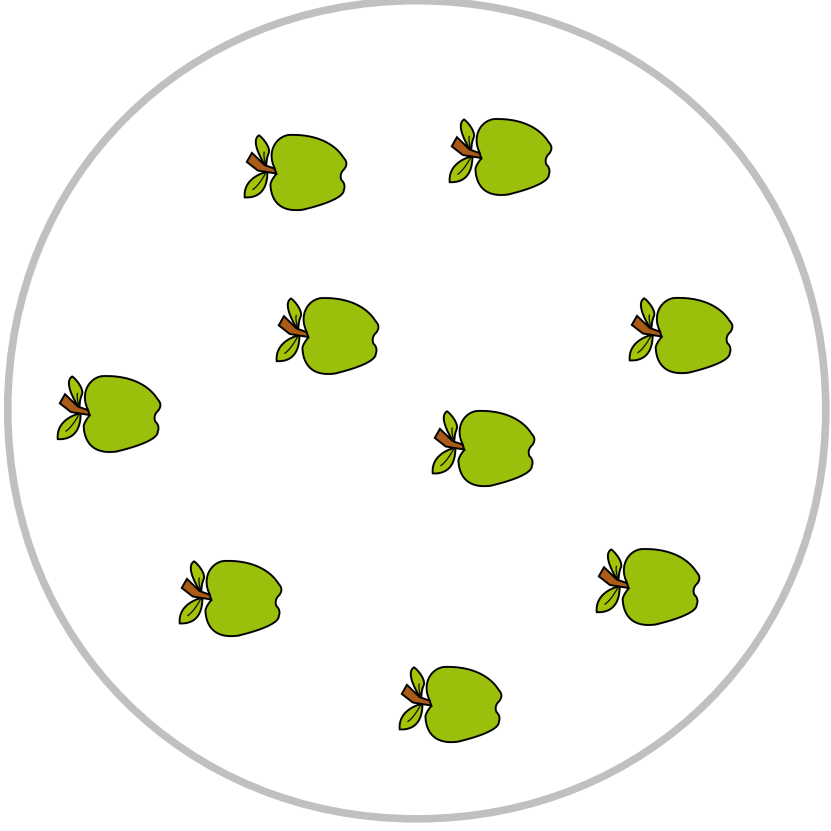
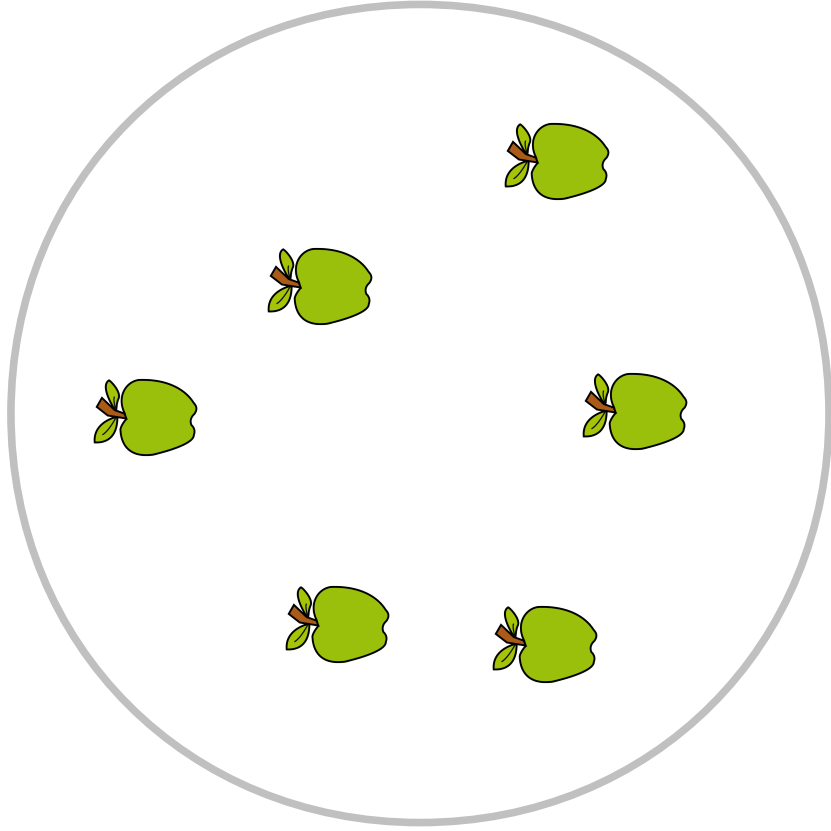


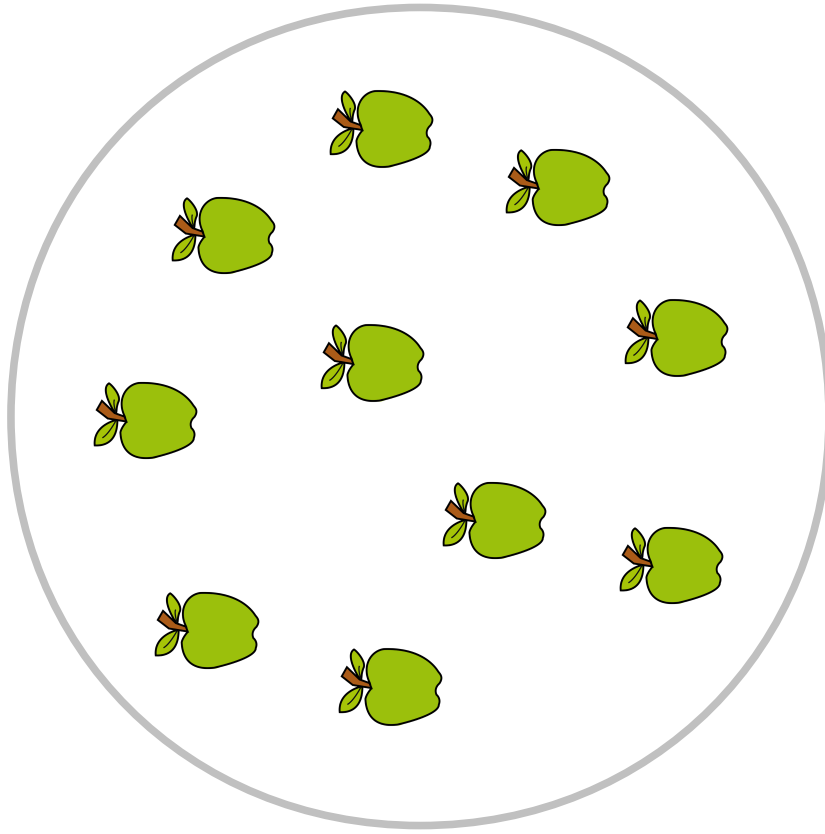
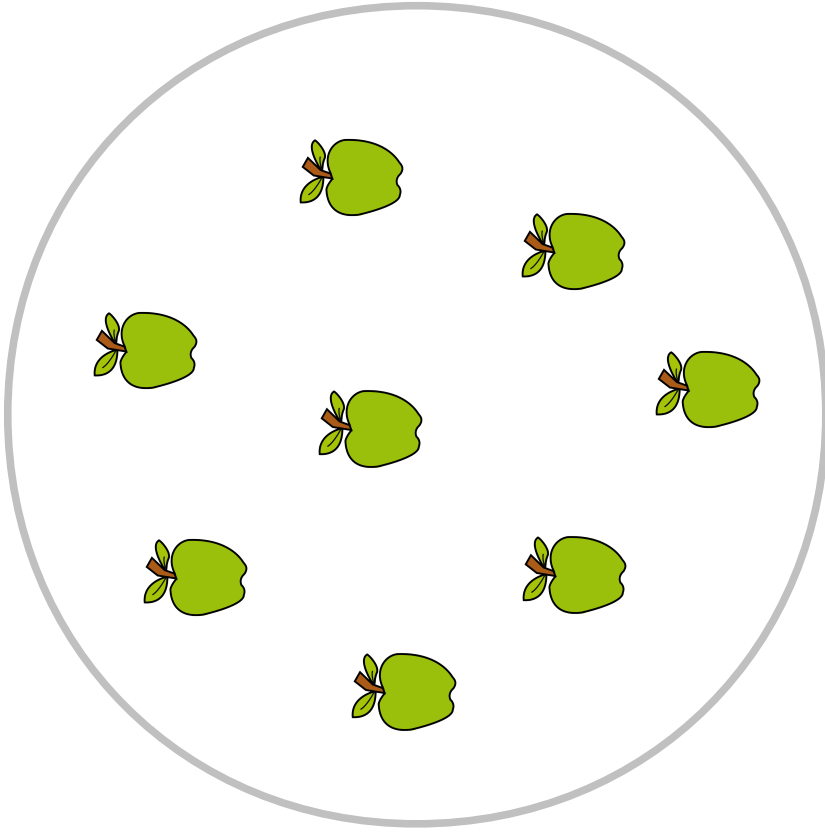


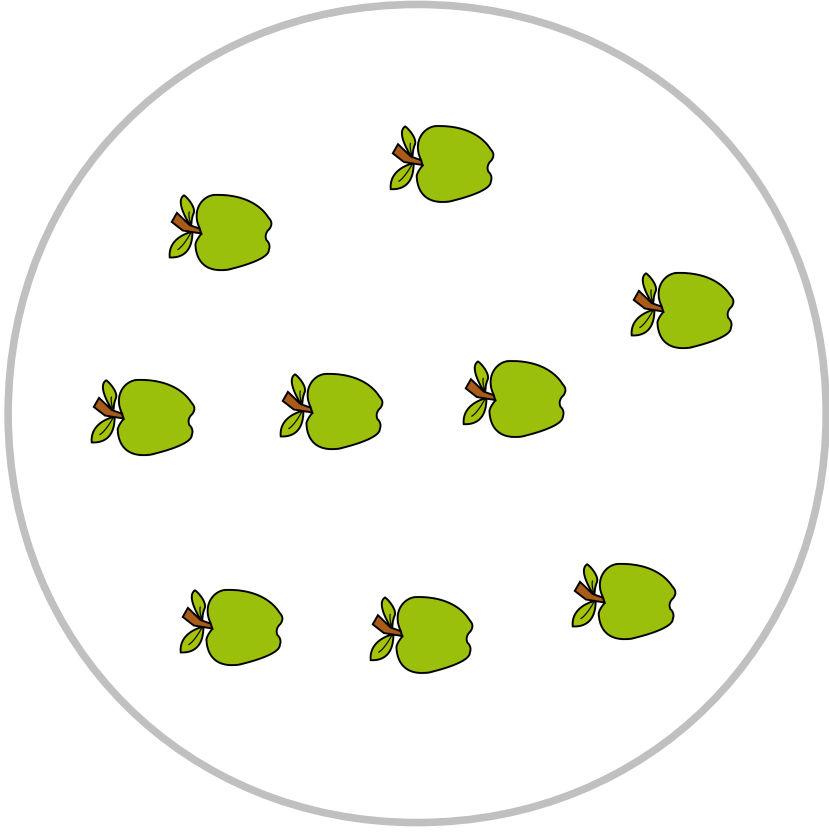
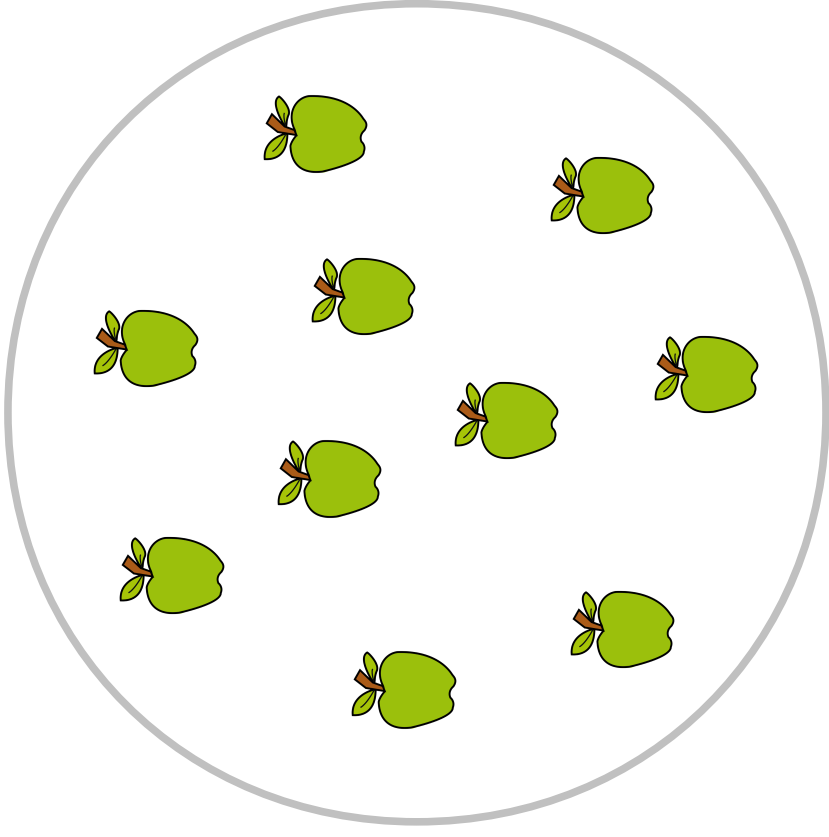


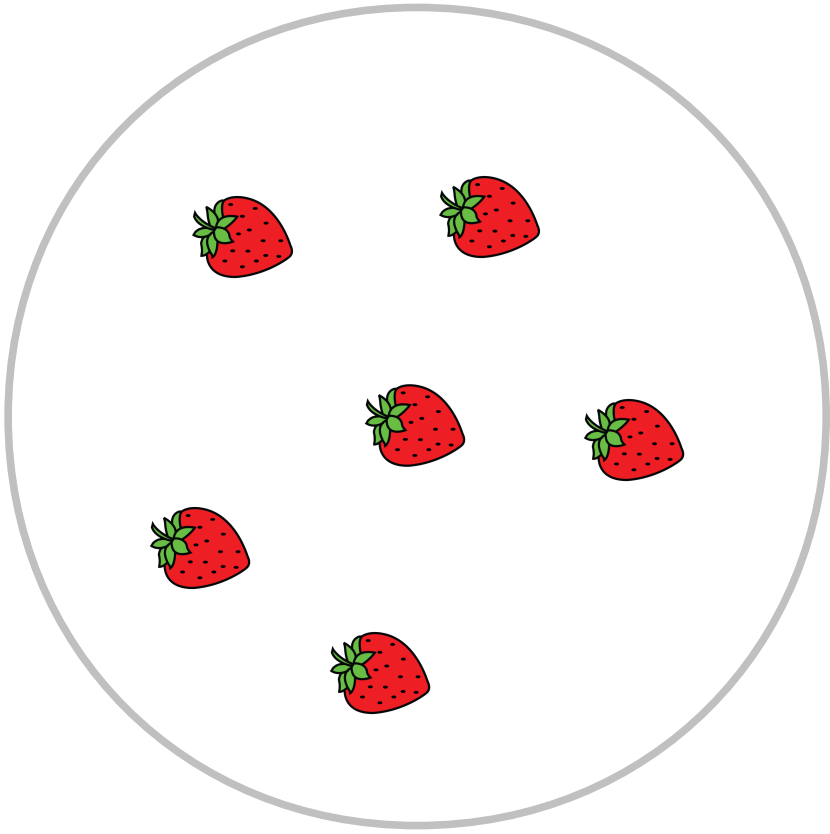
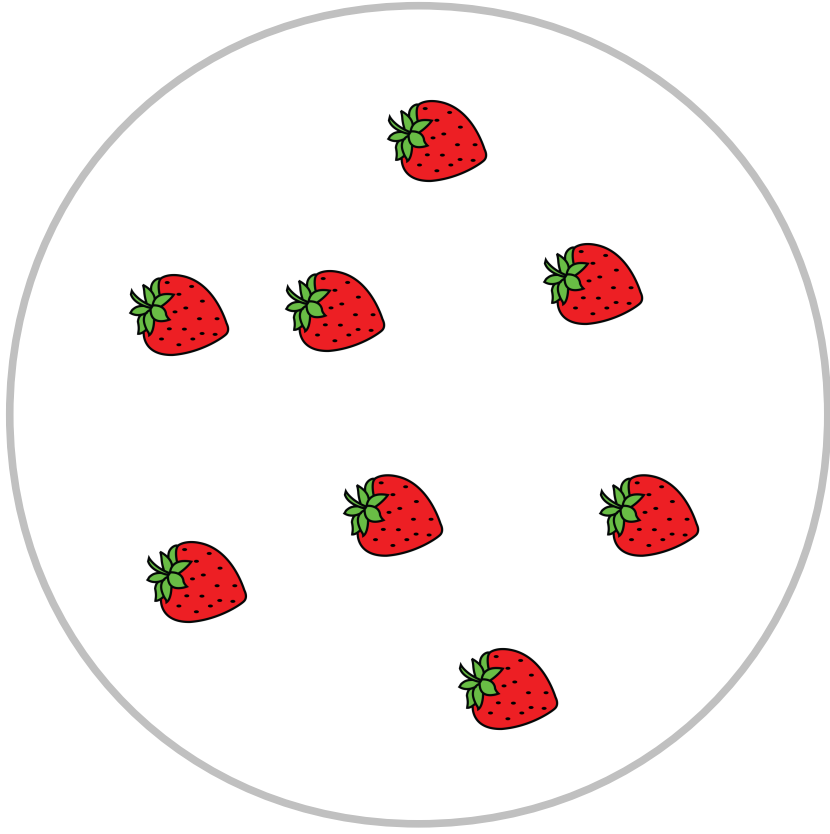


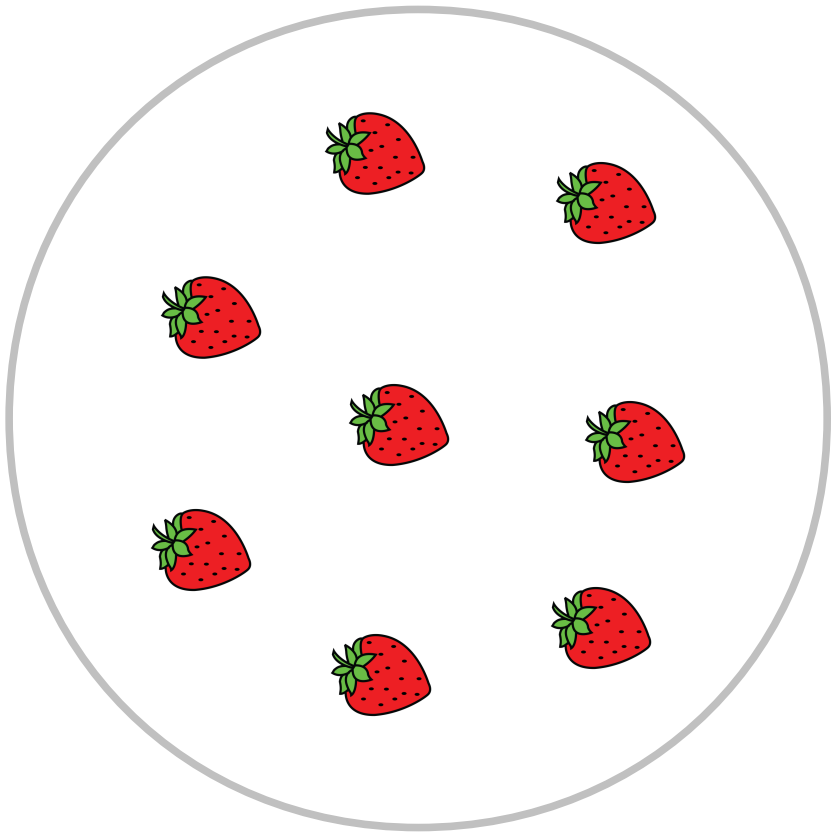
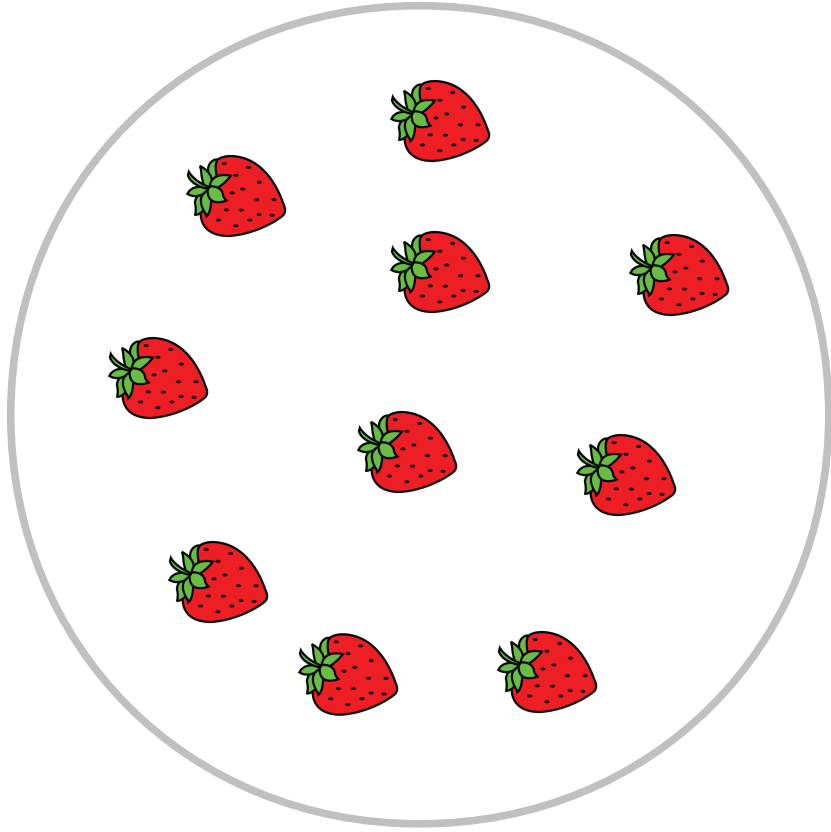


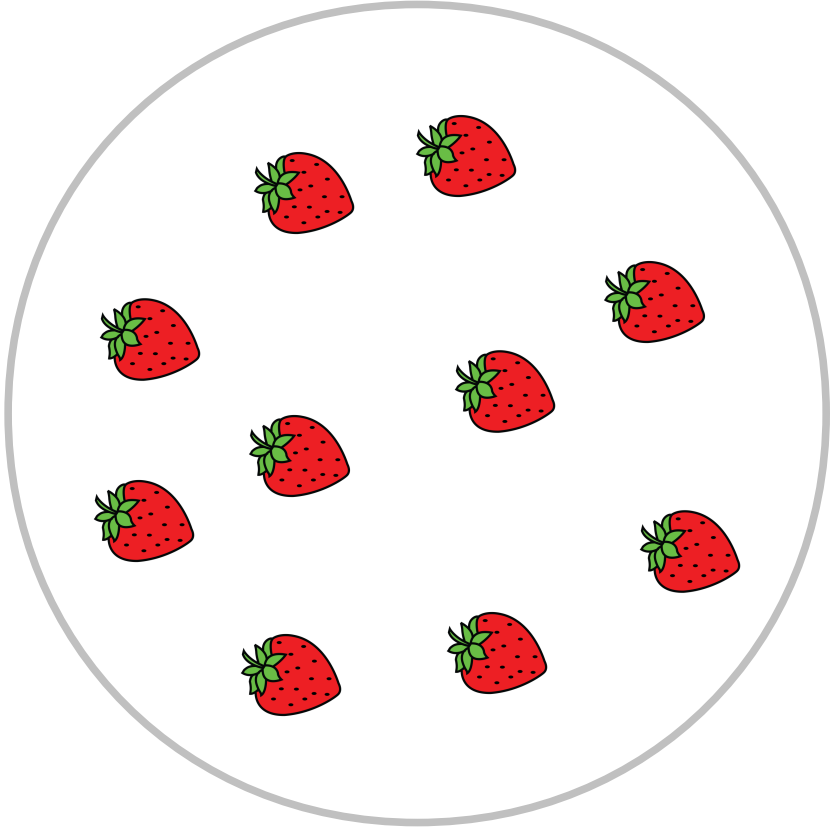
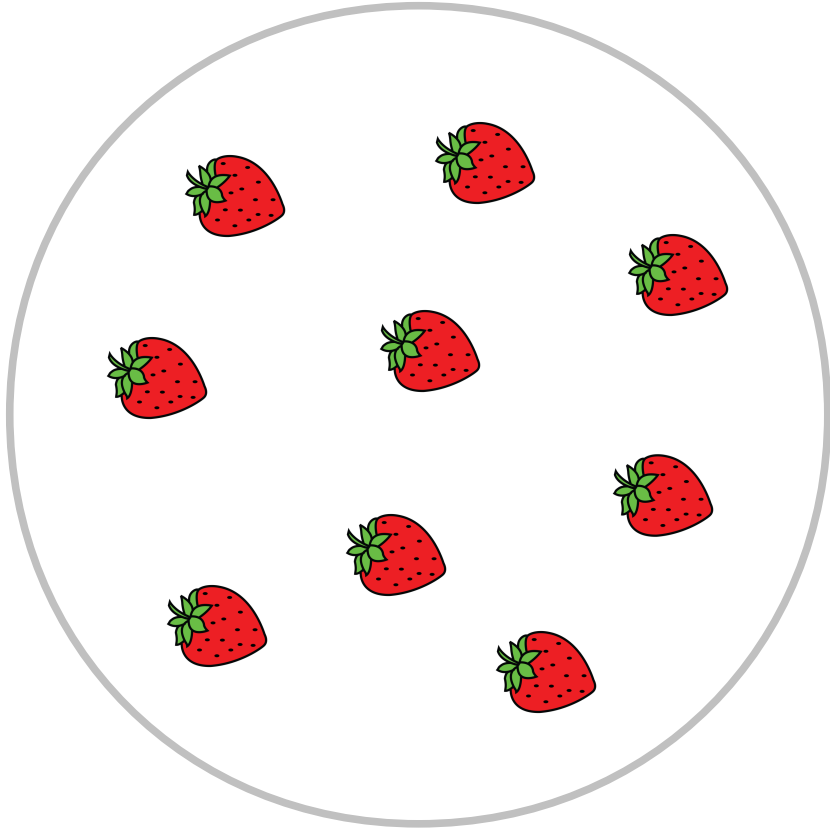


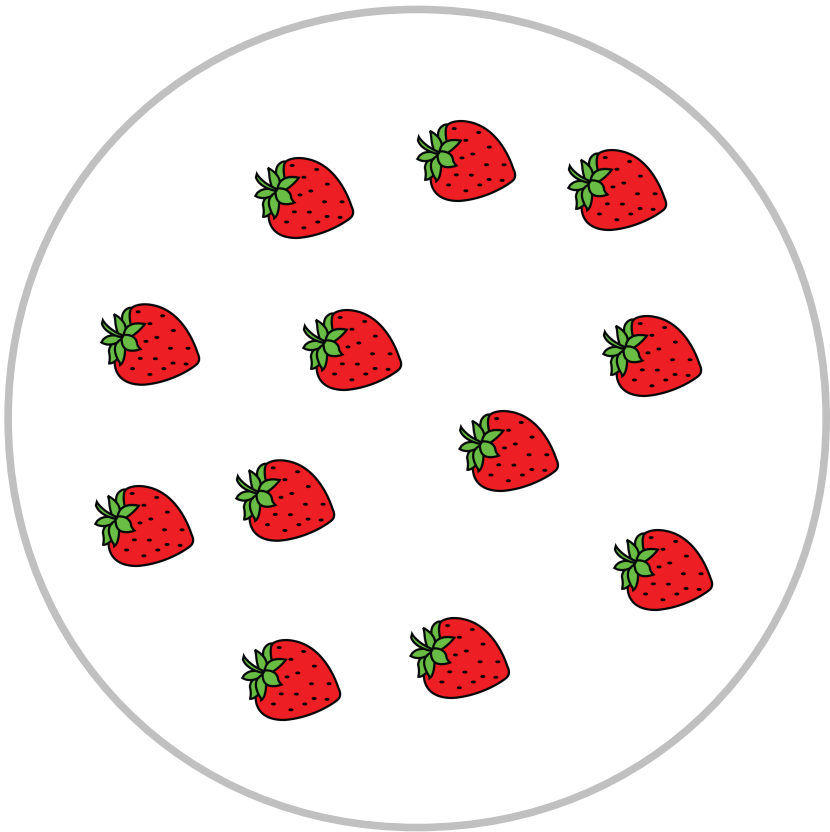
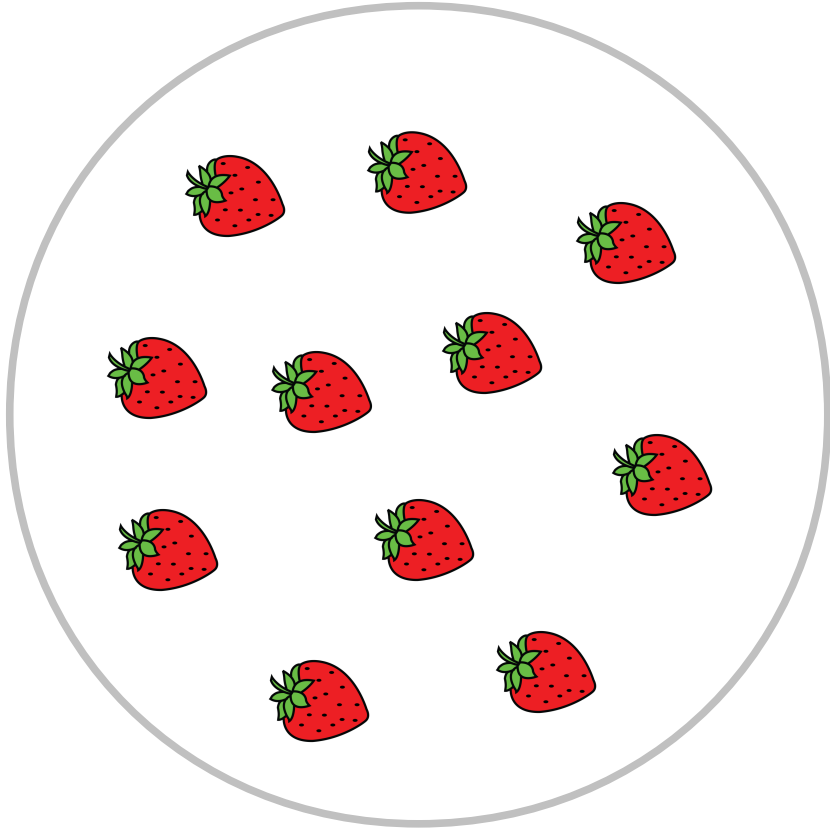


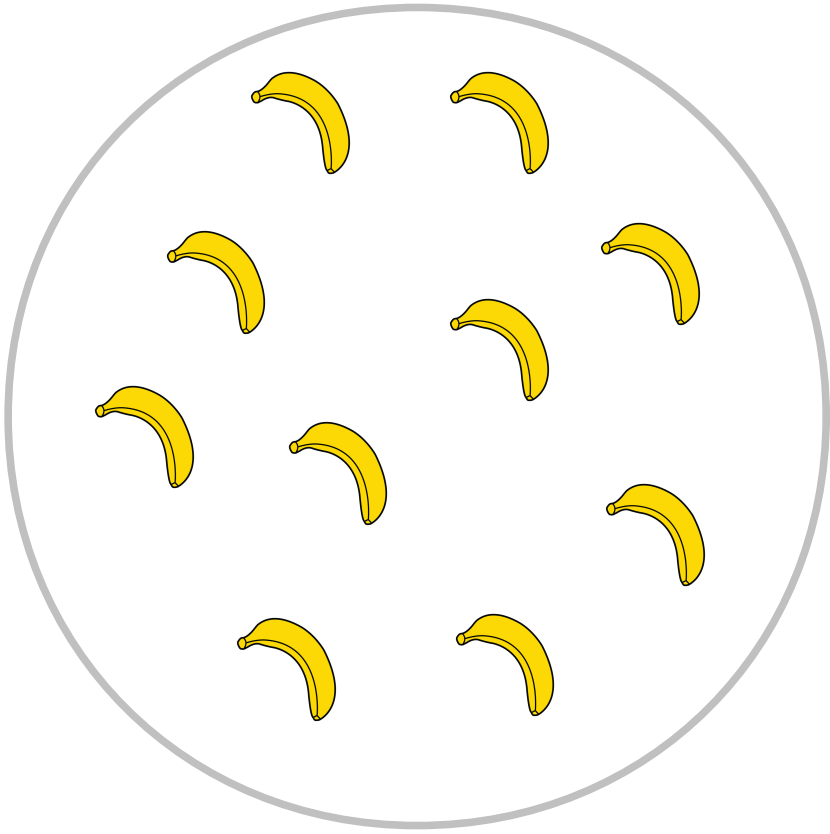
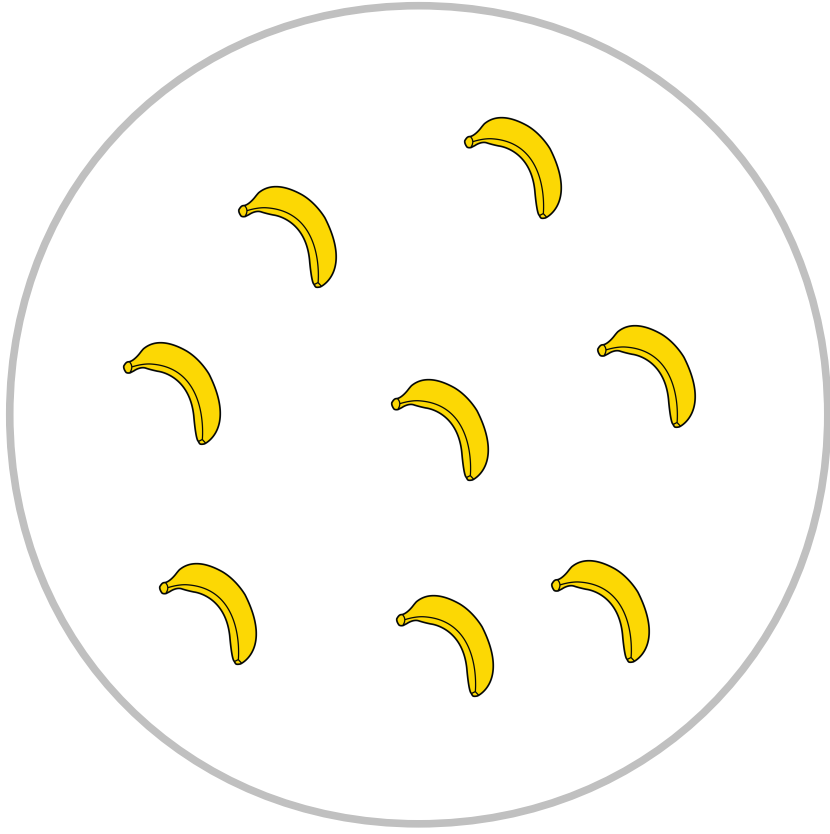


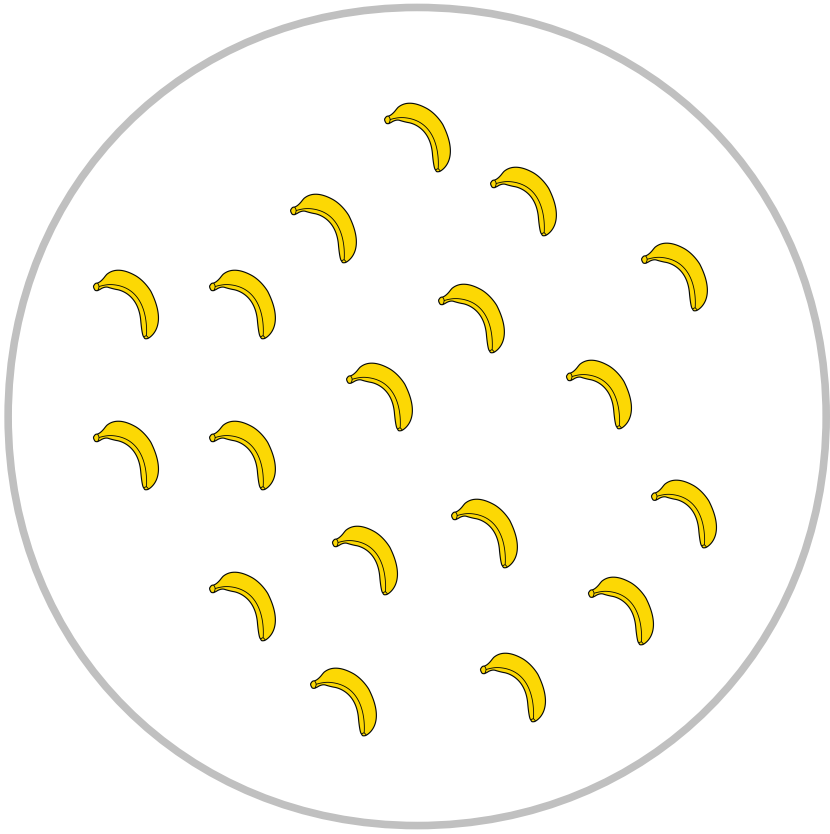
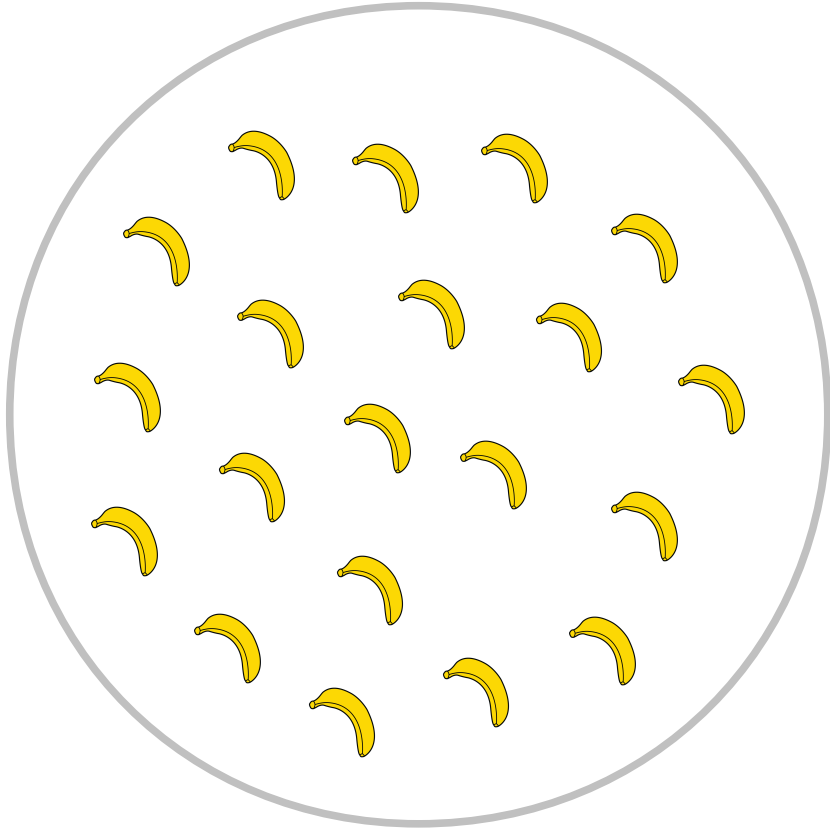












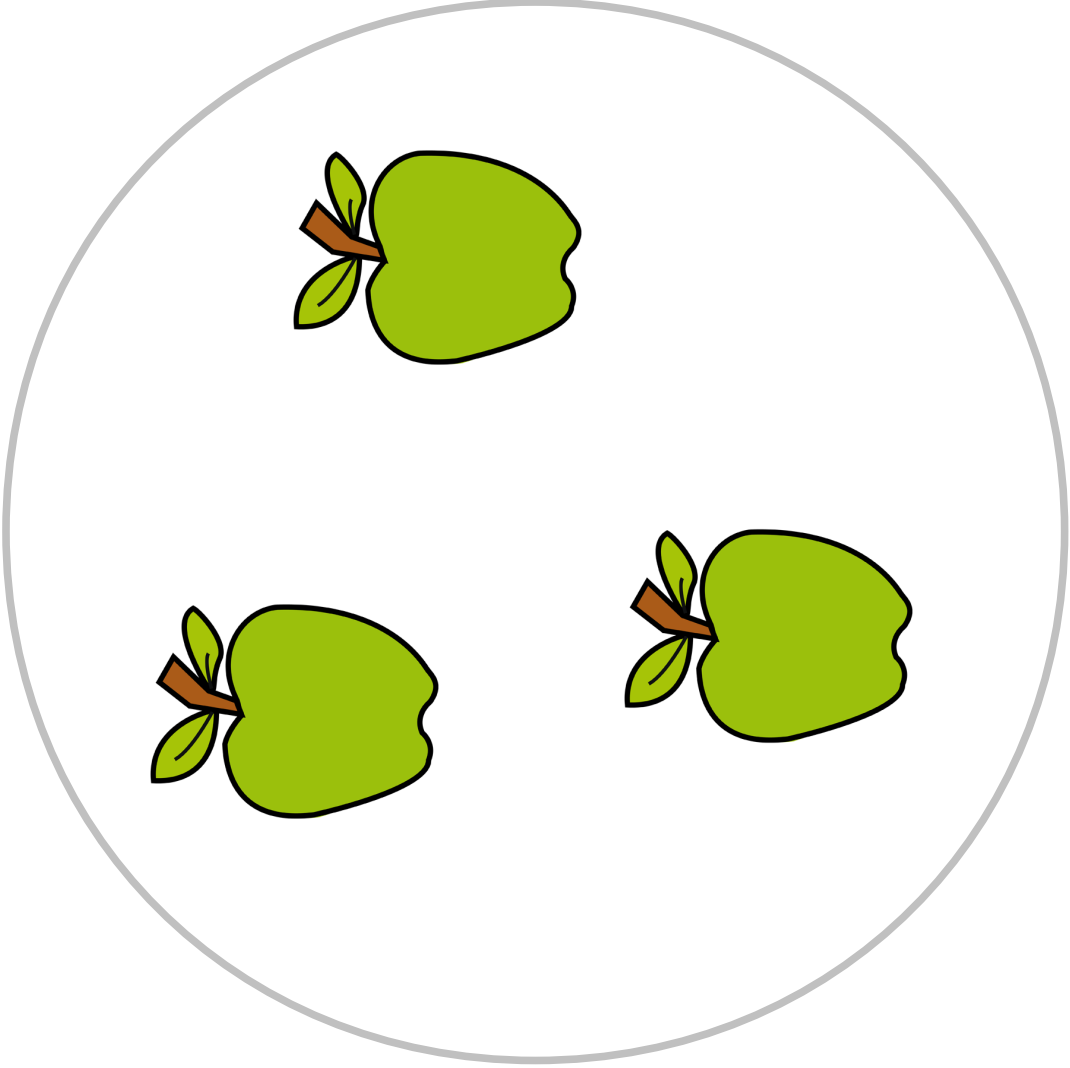
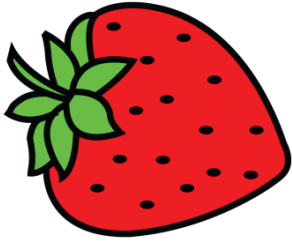


Planche 21



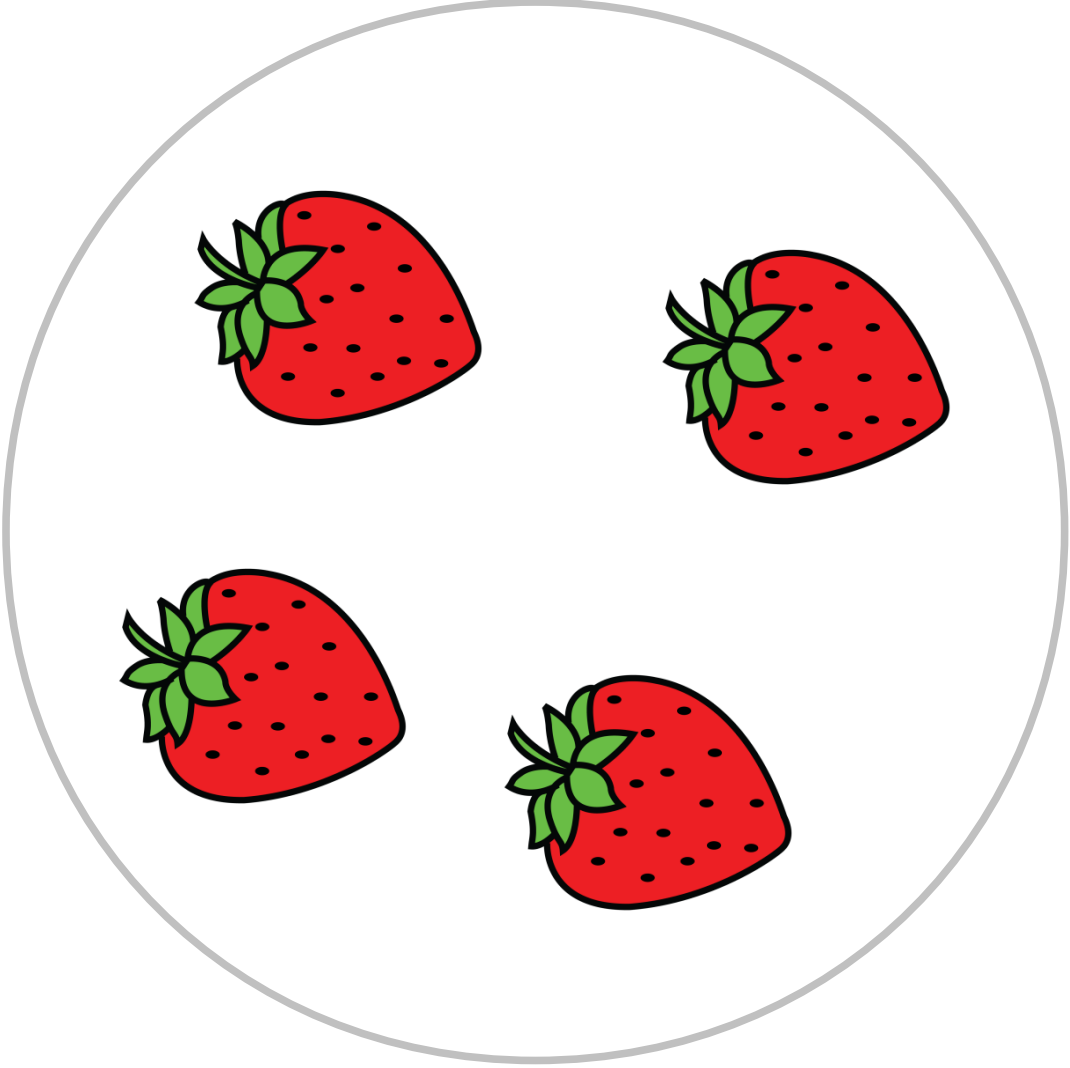
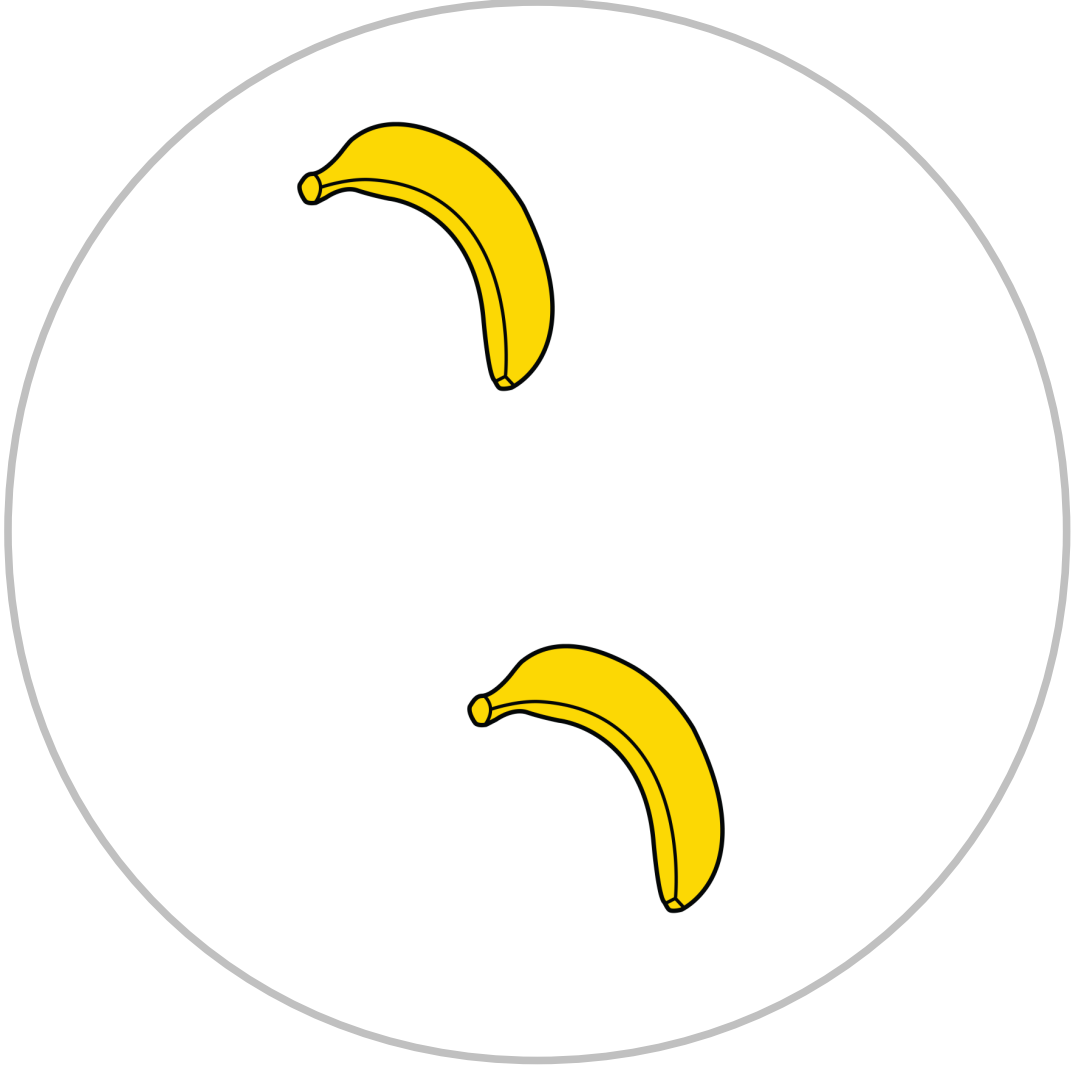
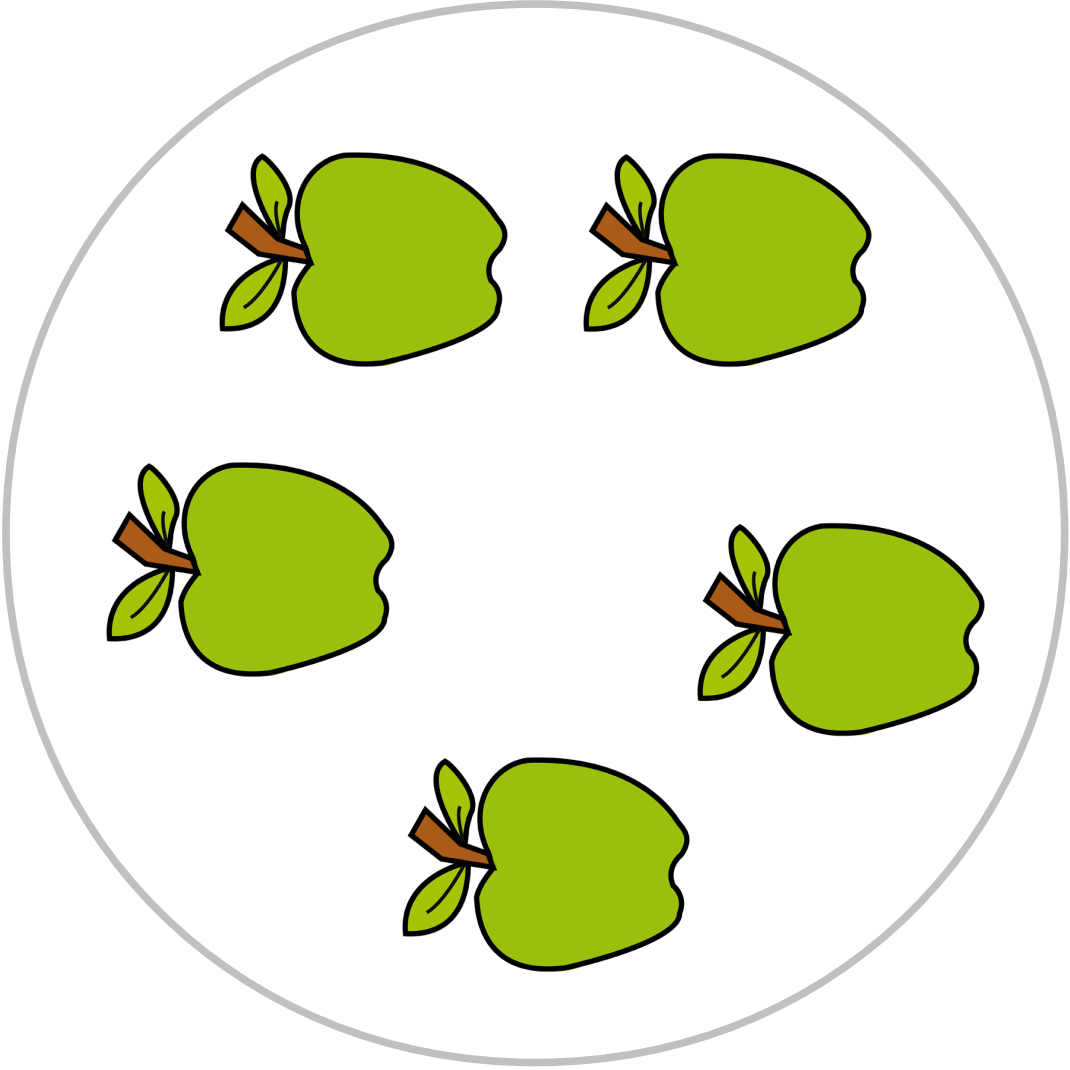


Planche 23







Chers parents d'élèves de l'école Notre-Dame,

Actuellement étudiante en école d'orthophonie, j'effectue un **travail de recherche** qui porte sur la façon dont les jeunes enfants se mettent spontanément à compter.

M. le directeur m'a donné l'autorisation d'intervenir dans l'école afin de collecter des résultats pour cette étude.

Vous enfant est actuellement en moyenne section de maternelle.

Je sollicite votre autorisation pour lui faire passer un test d'une quinzaine de minutes sur le temps scolaire, en accord avec l'enseignante.

Ce test est absolument anonyme, il est conçu pour de jeunes enfants, de manière concrète et ludique. Il n'a pas pour but d'évaluer votre enfant par rapport à une norme, mais d'établir des liens entre langage, mémoire et développement du comptage.

En vous remerciant par avance de votre coopération,

Marie-Aline CATTIER-HAUVILLE, étudiante en 4ème année au Département d'Orthophonie de l'Université Paris 6, tél : 06-..

J'accepte que mon enfant (Nom, prénom).....participe à cette étude.

Date : Signature :

Je n'accepte pas que mon enfant (Nom, prénom).....participe à cette étude.

Date : Signature :

Merci de confier ce bulletin complété à l'enseignante de votre enfant

Chers parents d'élèves de l'école Notre-Dame,

Actuellement étudiante en école d'orthophonie, j'effectue un **travail de recherche** qui porte sur la façon dont les jeunes enfants se mettent spontanément à compter.

M. le directeur m'a donné l'autorisation d'intervenir dans l'école afin de collecter des résultats pour cette étude.

Vous enfant est actuellement en petite section de maternelle.

Je sollicite votre autorisation pour lui faire passer un test d'une dizaine de minutes sur le temps scolaire, en accord avec l'enseignante. Je re-testerai les enfants dans quelques mois pour étudier leur évolution.

Ce test est absolument anonyme, il est conçu pour de très jeunes enfants, de manière concrète et ludique. Il n'a pas pour but d'évaluer votre enfant par rapport à une norme, mais d'établir des liens entre langage, mémoire et développement du comptage.

En vous remerciant par avance de votre coopération,
Marie-Aline CATTIER-HAUVILLE, étudiante en 4ème année au Département d'Orthophonie de l'Université Paris 6, tél : 06-..

J'accepte que mon enfant (Nom, Prénom).....participe à cette étude.

Date : Signature :

Je n'accepte pas que mon enfant (Nom, Prénom).....participe à cette étude.

Date : Signature :

Merci de confier ce bulletin complété à l'enseignante de votre enfant

ABSTRACT :

The basis of this project was to study how young children manage to build a symbolic mathematical system from non-symbolic numerical abilities. 191 questionnaires were administered to children aged 33 to 56 months. Such abilities as language, visual short term memory, verbal short term memory, number discrimination, digital gnosis, arithmetic and counting skills were explored. The results were evaluated quantitatively and qualitatively both in cross-sectional and longitudinal studies. The findings highlight spatial short term memory contribution to early mathematical competence. Besides, strategies were found to be different from one child to another. Further large scale studies are needed to confirm the results of this study.

RÉSUMÉ :

L'objet de notre recherche était d'étudier la façon dont les jeunes enfants mettent en relation leurs habiletés numériques précoces non symboliques avec le langage. Pour ce faire, nous avons construit un protocole administré 191 fois, une ou plusieurs fois à des enfants âgés de 33 à 56 mois. Ce protocole explore aussi bien le langage, que la mémoire à court terme, les gnosies digitales, les compétences numériques préverbales, la chaîne numérique, la connaissance de la cardinalité des nombres et l'arithmétique élémentaire. Aux termes de notre étude, à la fois transversale et longitudinale, nous montrons l'influence du langage et de la mémoire à court terme visuo-spatiale dans les performances mathématiques. Nous identifions également plusieurs profils de développement de la cognition numérique. Ces conclusions devront être confirmées sur des populations plus importantes.

HABILETÉS NUMÉRIQUES À L'ENTRÉE EN MATERNELLE ET FACTEURS PRÉDICTIONNELS DE LEUR ÉVOLUTION

MOTS-CLÉS : NOMBRE, APPRENTISSAGES, ENFANT, HABILETÉS NUMÉRIQUES PRÉCOCES, MÉMOIRE À COURT TERME VISUO-SPATIALE

KEY-WORDS : NUMBER, LEARNINGS, CHILD, EARLY NUMERICAL ABILITIES, VISUAL-SPATIAL SHORT TERM MEMORY

137 pages (dont 30 pages d'annexes)

95 références bibliographiques