

De l'arithmétique non symbolique à l'arithmétique symbolique

Aude Lemaire

▶ **To cite this version:**

Aude Lemaire. De l'arithmétique non symbolique à l'arithmétique symbolique. Sciences cognitives. 2014. dumas-01081389

HAL Id: dumas-01081389

https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-01081389

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

DE L'ARITHMÉTIQUE NON SYMBOLIQUE À L'ARITHMÉTIQUE SYMBOLIQUE

DIRECTEUR DE MÉMOIRE : Michel FAYOL

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2013 / 2014

Aude LEMAIRE

Née le 29/08/1991

REMERCIEMENTS :

Je tiens à remercier :

Le professeur Michel Fayol, d'avoir accepté d'être mon maître de mémoire, en me proposant ce sujet, et de m'avoir orientée tout au long de ce travail ;

M. Chazoule, pour sa contribution à mon étude, ses conseils, et pour m'avoir donné les moyens de poursuivre son travail de recherche ;

M. Chausse, d'avoir pris le temps d'installer le logiciel E-Prime sur mon ordinateur et d'avoir modifié certains paramètres afin de rendre les passations optimales ;

Mme Perros-Durand, orthophoniste, pour l'intérêt porté à mon travail et pour s'être rendue disponible afin de relire mon mémoire et d'assister à ma soutenance ;

Mme Detain, directrice de l'école maternelle Dunois à Paris, et M. Briantais, directeur de l'école élémentaire Maurice Genevoix à Sargé-lès-le-Mans, ainsi que les enseignantes, qui ont accepté que mon expérimentation ait lieu dans leur établissement. Merci aux équipes enseignantes et éducatives de ces deux écoles pour leur accueil ;

Les enfants pour leur participation à l'étude, ainsi que leurs parents qui ont donné leur autorisation, sans eux cette étude n'aurait pas pu être réalisée ;

Ma famille et mes amis, pour m'avoir soutenue et encouragée au cours de mes études.

ATTESTATION DE NON PLAGIAT

Je soussignée Aude LEMAIRE, déclare être pleinement consciente 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, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce mémoire.

Signature :

TABLE DES MATIÈRES :

I. INTRODUCTION ..... - 1 -

II. PARTIE THÉORIQUE ..... - 2 -

II.1. Les représentations numériques selon le modèle du triple code .... - 2 -

II.1.1. Le modèle du triple code ..... - 2 -

II.1.2. La représentation analogique ..... - 2 -

II.1.3. La représentation auditive verbale ..... - 3 -

II.1.4. La représentation visuelle indo-arabe ..... - 3 -

II.1.5. Conclusion ..... - 4 -

II.2. Le développement des compétences arithmétiques chez l'enfant . - 4 -

II.2.1. Le développement du nombre selon Piaget ..... - 4 -

II.2.2. Les compétences arithmétiques précoces ..... - 5 -

II.2.3. L'acquisition des représentations symboliques ..... - 7 -

II.2.4. La représentation analogique : développement et lien avec les représentations symboliques ..... - 9 -

II.2.5. Les fonctions cognitives sous-tendant le développement des compétences arithmétiques ..... - 11 -

II.2.6. Conclusion ..... - 12 -

II.3. Les difficultés d'apprentissage en mathématiques ..... - 12 -

II.3.1. Difficultés d'apprentissage en mathématiques et prévalence ..... - 12 -

II.3.2. Hypothèses sur l'origine des difficultés d'apprentissage en mathématiques ..... - 13 -

II.3.3. MLD au sein de syndromes neurodéveloppementaux ..... - 15 -

II.3.4. Conclusion ..... - 18 -

III. PROBLÉMATIQUE ..... - 19 -

IV. HYPOTHÈSES ..... - 21 -

V. MÉTHODOLOGIE ..... - 22 -
V.1. Population étudiée ..... - 22 -
V.2. Description des épreuves ..... - 22 -
V.2.1. Évaluation des caractéristiques cognitives ..... - 22 -
V.2.2. Comparaisons de quantités ..... - 26 -
V.3. Analyse des résultats ..... - 29 -

VI. ANALYSES DESCRIPTIVES DES DONNÉES ..... - 30 -
VI.1. Résultats aux épreuves de caractéristiques cognitives en GSM .. - 30 -
VI.2. Résultats aux épreuves de caractéristiques cognitives en CP ..... - 31 -
VI.3. Comparaisons des résultats aux épreuves de caractéristiques cognitives en GSM et en CP ..... - 31 -
VI.4. Analyse clinique de l'épreuve des lignes numériques en GSM et en CP ..... - 32 -
VI.5. Analyses des résultats aux comparaisons de quantités en GSM.. - 33 -
VI.6. Analyses des résultats aux comparaisons de quantités en CP ..... - 34 -
VI.7. Comparaison des résultats aux épreuves de comparaisons en GSM et en CP ..... - 34 -

VII. ANALYSES STATISTIQUES DES DONNÉES ..... - 36 -
VII.1. Analyses de corrélations ..... - 36 -
VII.1.1. Corrélations entre les données des enfants de GSM, au niveau des BR - 36 -
VII.1.2. Corrélations entre les données des enfants de GSM, au niveau des TR. - 37 -
VII.1.3. Corrélations entre les données des enfants de CP, au niveau des BR ... - 37 -
VII.1.4. Corrélations entre les données des enfants de CP, au niveau des TR.... - 38 -
VII.2. Analyses de l'effet de rapport ..... - 39 -
VII.2.1. Effet de rapport dans l'exactitude des réponses des enfants de GSM .... - 39 -
VII.2.2. Effet de rapport dans les temps de réponse des enfants de GSM ..... - 40 -
VII.2.3. Effet de rapport dans l'exactitude des réponses des enfants de CP ..... - 41 -
VII.2.4. Effet de rapport dans les temps de réponse des enfants de CP ..... - 42 -

VIII. ANALYSE DES PROFILS INDIVIDUELS ..... - 43 -
VIII.1. Profils des réussites des enfants de GSM aux épreuves de comparaisons ..... - 44 -
VIII.2. Profils des réussites aux comparaisons en fonction des rapports en GSM ..... - 45 -
VIII.3. Profils des réussites des enfants de CP aux épreuves de comparaisons ..... - 47 -
VIII.4. Profils des réussites aux comparaisons en fonction des rapports en CP ..... - 48 -
VIII.5. Conclusion ..... - 49 -

IX. ÉTUDE DE CAS ..... - 50 -

X. DISCUSSION ..... - 52 -

XI. CONCLUSION ..... - 59 -

XII. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES ..... - 61 -

XIII. ANNEXES ..... - 66 -
XIII.1. Annexe A : Protocole utilisé pour la passation des épreuves ... - 66 -
XIII.2. Annexe B : exemple d'item pour chaque épreuve de comparaisons de quantités ..... - 73 -
XIII.3. Annexe C : exemples d'écriture en miroir à l'épreuve de comptage en écriture arabe ..... - 76 -
XIII.4. Annexe D : exemples de réponses à l'épreuve des lignes numériques ..... - 77 -

Liste des tableaux

Tableau 1 : données démographiques des participants dont les résultats entrent dans les analyses de groupes

Tableau 2 : comparaisons en fonction de la distance et du rapport pour les épreuves de comparaisons de cercles, jetons, surfaces rectangles, numéraux verbaux et chiffres arabes

Tableau 3 : résultats des enfants de GSM aux épreuves de caractéristiques cognitives

Tableau 4 : résultats des enfants de CP aux épreuves de caractéristiques cognitives

Tableau 5 : moyennes et écarts types des pourcentages de BR et des TR pour les enfants de GSM en fonction des tâches de comparaisons

Tableau 6 : moyennes et écarts types des pourcentages de BR et des TR pour les enfants de CP en fonction des tâches de comparaisons

Tableau 7 : corrélations entre (I) les épreuves de caractéristiques cognitives (en blanc) et (II) les épreuves de comparaisons (en grisé) pour les BR des enfants de GSM

Tableau 8 : corrélations entre (I) les épreuves de caractéristiques cognitives (en blanc) et (II) les épreuves de comparaisons (en grisé) pour les TR des enfants de GSM

Tableau 9 : corrélations entre (I) les épreuves de caractéristiques cognitives (en blanc) et (II) les épreuves de comparaisons (en grisé) pour les BR des enfants de CP

Tableau 10 : corrélations entre (I) les épreuves de caractéristiques cognitives (en blanc) et (II) les épreuves de comparaisons (en grisé) pour les TR des enfants de CP

Tableau 11 : moyennes et écarts types des pourcentages des BR des enfants de GSM en fonction des tâches et des rapports

Tableau 12 : moyennes et écarts types des TR des enfants de GSM en fonction des tâches et des rapports

Tableau 13 : moyennes et écarts types des pourcentages des BR des enfants de CP en fonction des tâches et des rapports

Tableau 14 : moyennes et écarts types des TR des enfants de CP en fonction des tâches et des rapports

Tableau 15 : résultats aux épreuves de caractéristiques cognitives et profils individuels des réussites aux épreuves de comparaisons chez les enfants de GSM

Tableau 16 : profils individuels des réussites aux épreuves de comparaisons selon les rapports (1/2, 2/3 et 3/4) chez les enfants de GSM

Tableau 17 : résultats aux épreuves de caractéristiques cognitives et profils individuels des réussites aux épreuves de comparaisons chez les enfants de CP

Tableau 18 : profils individuels des réussites aux épreuves de comparaisons selon les rapports (1/2, 2/3 et 3/4) chez les enfants de CP

Tableau 19 : résultats de l'enfant n°32 aux épreuves de caractéristiques cognitives et notes z le situant par rapport à la moyenne des résultats des autres enfants de CP

Tableau 20 : pourcentages des BR et moyennes des TR de l'enfant n°32 aux comparaisons et notes z le situant par rapport à la moyenne des résultats des autres enfants de CP

Tableau 21 : profil individuel des réussites aux épreuves de comparaisons de l'enfant n°32

Liste des abréviations

BR : bonnes réponses

Chverb : chaîne verbale

Coll. : collaborateurs

Collect. : collections

Compt. : comptage

CP : cours préparatoire

ET : écart type

GSM : grande section de maternelle

hIPS : *horizontal segment of intraparietal sulcus* (segment horizontal du sillon intrapariétal)

Id : numéro d'identifiant

Lignes num. : lignes numériques

MLD : *mathematical learning disability* (difficultés d'apprentissage en mathématiques)

moy : moyenne

ns : non significatif

OTS : *object tracking system* (système de suivi d'objets)

SNA : système numérique approximatif

SNARC : *spatial numerical association of response code* (association spatio-numérique des codes de réponse)

Surf. : surfaces

Surf. rect. : surfaces rectangles

TR : temps de réponse

I. INTRODUCTION

Qu'ils soient sous forme verbale ou arabe, les nombres sont utilisés au cours des apprentissages scolaires mais aussi lors de nombreuses activités quotidiennes : les jeux, les achats, la date, l'heure, les comptes… Cependant, certains individus rencontrent des difficultés dans leur compréhension et leur manipulation, un handicap au quotidien. La prévention et la remédiation de ces difficultés nécessitent l'appréhension du fonctionnement normal de la cognition mathématique, à travers le développement et l'apprentissage des représentations des quantités.

La théorie de Piaget situait l'accès au concept de nombre vers 7 ans. Des études plus récentes mettent en évidence l'existence d'une représentation analogique vraisemblablement innée des quantités. Celle-ci s'intègre dans le modèle du triple code (Dehaene et coll., 1991) [10] qui distingue 3 représentations des quantités : la représentation analogique, innée et universelle, et 2 représentations symboliques (verbale et arabe), acquises et culturelles. Une « greffe » des représentations symboliques sur la représentation analogique est suggérée par le fait que la représentation analogique soit activée par les codes symboliques (Dehaene et coll., 2003) [12]. Néanmoins, ce modèle n'aborde pas la question du développement des représentations des quantités, ni de leur mise en relation. Plusieurs résultats de la littérature suggèrent que la mise en place des codes symboliques s'effectue entre 2 et 7 ans, mais peu de données sont disponibles.

Dans cette perspective, notre objectif est d'étudier l'acquisition des représentations numériques symboliques et leur mise en relation avec la représentation analogique. Pour ce faire, notre protocole comprend des épreuves informatisées de comparaisons de quantités, à partir desquelles nous analyserons l'effet de rapport, dont la présence signe la mise en relation automatique des codes symboliques avec la représentation analogique. Nous cherchons aussi à mettre en évidence une dépendance du symbolique par rapport à l'analogique, observable à travers des études de corrélations et de profils. Par la suite, cette recherche pourrait contribuer à l'élaboration d'un outil informatisé d'évaluation des représentations des quantités, symboliques et non symboliques, chez les enfants de 5-7 ans.

Tout d'abord, nous exposerons le modèle du triple code, les données actuelles concernant les représentations des quantités, les fonctions cognitives nécessaires aux compétences arithmétiques, puis les hypothèses causales pour les difficultés en mathématiques. Ensuite, nous présenterons les épreuves de notre protocole, puis nous exposerons, analyserons et interprèterons les résultats obtenus sur notre population d'enfants de GSM et de CP.

II. PARTIE THÉORIQUE

II.1. Les représentations numériques selon le modèle du triple code

À la fin du XXe siècle, les recherches neuropsychologiques sur le traitement numérique se concentrent sur un système cognitif qui n'est plus abordé de façon unitaire mais modulaire. Dans cette perspective, des études de cas pathologiques ont permis de décrire les composantes et mécanismes engagés dans le traitement numérique chez le sujet sain.

II.1.1. Le modèle du triple code

Le modèle du triple code, élaboré par Dehaene en 1992, est la référence actuelle en tant qu'architecture cognitive du traitement numérique.

À la suite de dissociations observées entre le traitement numérique exact et approximatif, 2 systèmes de traitement numérique ont été mis en évidence (Dehaene et coll., 1991) [10] : un système numérique exact à travers la notation symbolique, et un système numérique approximatif à travers une représentation analogique des quantités. L'existence d'une représentation non symbolique des quantités représente l'apport le plus important du modèle. Des capacités de traitement numérique des quantités existent chez les bébés et plusieurs animaux, étayant l'hypothèse d'un système de traitement numérique non verbal.

Grâce aux avancées en neuro-imagerie, le modèle du triple code est anatomo-fonctionnel (Dehaene et coll., 2003) [12]. Il postule l'existence de 3 représentations numériques associées à des localisations cérébrales distinctes : la représentation analogique, innée, approximative et correspondant au « sens » du nombre ; les représentations symboliques (verbale et arabe), acquises, précises et asémantiques. Ces représentations sont relativement indépendantes, pouvant être atteintes isolément. Elles sont continuellement en interaction car un traitement numérique implique généralement plusieurs représentations.

II.1.2. La représentation analogique

La représentation analogique des quantités, innée et universelle, correspond au « sens du nombre » encodant la magnitude (quantité). Elle permet les calculs approximatifs, les estimations et les comparaisons. Elle serait localisée dans les régions pariétales bilatérales, plus particulièrement dans le segment horizontal du sillon intrapariétal (« hIPS »). Cette région est systématiquement activée lors des manipulations mentales des quantités, indépendamment de la forme de présentation de celles-ci (analogique, verbale ou arabe). Cette représentation est assimilée métaphoriquement à une ligne numérique mentale, orientée de gauche à droite, avec une compression des quantités vers la droite. Elle suit la

loi de Weber-Fechner : plus les quantités sont grandes, plus elles sont contigües sur cette représentation mentale, donc plus l'imprécision est grande. Ceci explique plusieurs effets, constatés lors des tâches de comparaisons : l'effet de distance (les temps de comparaisons augmentent avec la proximité des quantités), l'effet de taille (les temps de comparaisons augmentent avec la grandeur des quantités), l'effet de rapport (les temps de comparaisons augmentent quand le rapport entre les quantités se rapproche de 1), l'effet SNARC (une association spatio-numérique des codes de réponse, liée à l'orientation de la ligne numérique mentale : les temps de comparaison diminuent avec la main gauche quand la quantité est plus petite que la quantité cible, et avec la main droite quand elle est plus grande ; l'attention visuo-spatiale et la motricité sont orientés vers la gauche à la présentation de petits nombres et vers la droite à la présentation de grands nombres).

II.1.3. La représentation auditive verbale

La représentation verbale des quantités requiert un apprentissage implicite de la langue, se réalisant grâce à l'interaction quotidienne. Chaque nom de nombre correspond à une quantité en fonction de sa place dans la chaîne verbale. Le code verbal comporte un lexique (en français, les noms de nombres de un à seize, les noms des dizaines et cent, mille, million, milliard), une syntaxe permettant le codage indéfini des quantités (en français, la syntaxe est additive, comme dix-huit, ou multiplicative, comme quatre-vingts), et des bases organisant ce code verbal (en français, il repose essentiellement sur la base 10, mais parfois également sur les bases 20 ou 60). La facilité d'acquisition de la chaîne numérique verbale est variable d'un système verbal à l'autre. Les asiatiques disposent d'un système plus régulier et économique que les occidentaux (Fayol, 2012) [24]. Cette représentation verbale permet le traitement des noms de nombres, le stockage en mémoire des faits arithmétiques (tables d'addition et de multiplication) et les calculs exacts d'opérations simples (comptages). Elle se situerait dans le gyrus angulaire gauche et les régions périsylviennes de l'hémisphère gauche, qui dominent pour le traitement langagier.

II.1.4. La représentation visuelle indo-arabe

La représentation indo-arabe des quantités correspond aux nombres écrits en chiffres arabes. Indépendante de la langue et quasi-universelle, elle nécessite un enseignement explicite même si les affichages numériques, de plus en plus présents, permettent quelques acquisitions incidentes. Ce code indo-arabe, structuré selon la base 10, est composé d'un lexique simple (chiffres de 0 à 9) et d'une syntaxe correspondant aux règles positionnelles (la valeur du chiffre est donnée par sa position dans le nombre). Les enfants asiatiques, dont la base 10 est davantage discernable dans leur système verbal, apprennent plus

rapidement le système indo-arabe que les enfants occidentaux (Fayol, 2012) [24]. Cette représentation numérique indo-arabe intervient dans le traitement des nombres écrits en chiffres arabes, les jugements de parité et les calculs écrits exacts. Elle se situerait dans les aires occipito-temporales bilatérales.

II.1.5. Conclusion

Dehaene n'aborde pas la question de l'acquisition des représentations numériques symboliques. Le modèle du triple code ne reflète que le système cognitif numérique chez l'adulte, ce n'est pas un modèle développemental. Néanmoins, ce modèle théorique peut constituer une base de réflexion pour concevoir le développement et l'apprentissage des représentations des quantités. Notre recherche sera élaborée à partir de ces données neuropsychologiques, en étudiant le lien entre la représentation analogique innée et les représentations symboliques acquises plus tard, activant également la représentation analogique qui leur donne du sens : comment ces représentations des quantités, analogiques et symboliques, se développent-elles et sont-elles mises en relation ?

II.2. Le développement des compétences arithmétiques chez l'enfant

II.2.1. Le développement du nombre selon Piaget

Piaget a mené de nombreux travaux sur le développement des connaissances chez l'enfant, notamment celles concernant les mathématiques. Dans ce domaine, il a mis en évidence l'indépendance du nombre par rapport à la perception, notamment spatiale. Puisqu'il semble important de prendre en compte cette notion, dans une épreuve de comparaisons de notre protocole, la surface occupée sera contrôlée (identique pour chaque item) ; en conséquence les comparaisons ne pourront s'effectuer sur des caractéristiques perceptives.

Piaget et ses collaborateurs (Piaget et coll., 1980) [39] ont conduit diverses recherches sur la conservation des quantités, continues ou discontinues. Ils classent les réponses des enfants en 3 stades successifs : absence de conservation (les quantités dépendent d'une qualité perçue isolément des autres (long, haut, serré…)), réponses intermédiaires (conflit cognitif entre le début des opérations abstraites et l'aspect perceptif : l'équivalence n'est pas durable), conservation nécessaire (opérations abstraites : équivalence durable indépendamment des perceptions). Pour Piaget, les structures logiques de la pensée, dont le développement est repérable à travers les épreuves de conservation, servent de base à toute connaissance. Elles sous-tendent le nombre et la connaissance arithmétique. Selon Piaget, le nombre constitue un tout permanent (un invariant), identique à lui-même quel que soit l'agencement spatial ou temporel de ses composants. L'accès au concept de nombre serait

tardif (vers 7 ans), indépendant du langage et des pratiques sociales. Le nombre, synthèse du cardinal et de l'ordinal, nécessite la coordination de la classification et de la sériation.

Cependant, cette approche piagétienne montre quelques faiblesses. Tout d'abord, pour Piaget, les habiletés mathématiques reposent sur une capacité unique, la logique, alors que les difficultés observées en mathématiques sont différentes d'un individu à l'autre. Les activités de logique (sur la cardinalité et l'ordinalité) favoriseraient alors l'accès au concept de nombre, mais Douglas Clements (1984) (cité par Fayol, 2012) [24] a montré que ces stimulations influaient seulement sur le niveau de logique de l'enfant, contrairement aux activités numériques qui améliorent les résultats dans les 2 domaines, logique et numérique. De plus, des aptitudes numériques sont présentes chez plusieurs espèces animales et chez les bébés, bien avant la période critique (vers 7 ans) avancée par Piaget (Fayol, 2012 ; Lafay et coll., 2013) [24] [33]. En outre, Piaget lui-même évoque que les facteurs propres à chaque tâche de conservation conduisent à interpréter les performances par rapport à l'épreuve correspondante, mais que les résultats ne sont pas généralisables.

La conception piagétienne incite à ne pas se restreindre aux savoirs et savoir-faire mathématiques, s'intéressant aux aspects logiques de la pensée mathématique. À la fin du XXe siècle, ce point de vue est rompu par les recherches en neuropsychologie s'orientant vers de nouvelles perspectives : une architecture modulaire qui rend compte de la diversité des déficits, et l'étude de cas pathologiques pour la compréhension de ce modèle cognitif.

II.2.2. Les compétences arithmétiques précoces

Contrairement aux thèses de Piaget, plusieurs études mettent en avant l'existence de capacités numériques chez le nourrisson, avant même qu'il ait recours au système verbal ou aux manipulations. La plupart de ces études s'appuient sur le paradigme d'habituation : les bébés sont exposés à un pattern visuel ou auditif, pour lequel leur attention diminue au fur et à mesure. Lors du changement de pattern perceptif, l'attention du bébé augmente s'il détecte ce changement, mais elle reste constante ou diminue si aucune différence n'est détectée. Ainsi, Xu et Spelke (2000), (citées par Fayol, 2012) [24] ont montré que les bébés de 6 mois distinguent des ensembles de 8 et 16 éléments, mais pas des ensembles pour lesquels l'écart est moindre ; ils discriminent les quantités dans un rapport minimum de 1/2. Cette capacité s'améliore rapidement, puisque dès 9 mois la discrimination est possible avec un rapport de 2/3. À cet âge, les calculs approximatifs sont également possibles. McCrink et Wynn (2004) (citées par Dehaene, 2009a) [16] ont utilisé une autre méthode, qui s'appuie sur la surprise exprimée par les bébés de 9 mois (ils regardent plus longtemps) lors de la violation de règles d'addition et de soustraction : 5 objets sont ajoutés

à 5 autres derrière un écran ; lorsqu'on enlève l'écran, le bébé est surpris quand il ne voit que 5 objets, ce qui suggère qu'il en attendait environ 10. Selon Brannon, les bébés de 11 mois semblent aussi discerner la taille relative des collections : après la présentation d'une séquence de patterns dont le nombre de points augmente, ils sont sensibles au changement si une séquence de patterns avec un nombre décroissant de points leur est présentée (Butterworth, 2005) [4]. Concernant les petites quantités, les bébés peuvent distinguer précisément de petites collections de n et n+1 éléments, si n < 4, dès les premières semaines de vie. Ils effectuent des opérations simples à 5 mois : ajout ou retrait d'un élément dans une collection inférieure à 4 éléments (Wynn, 1992, citée par Butterworth, 2005) [4]. Ainsi, les bébés peuvent très tôt discriminer précisément de petites quantités et approximativement de grandes quantités, se représenter les numérosités de collections, et réaliser sur celles-ci des manipulations mentales pour traiter des problèmes arithmétiques simples (ajout ou retrait).

Un débat persiste entre ceux qui estiment que ces capacités numériques sont très précocement spécifiques au domaine numérique et ceux qui postulent pour un système non numérique de traitement perceptif des quantités continues (surface, volume, brillance…), ou encore pour un système de fichiers d'objets des caractéristiques non numériques des éléments présentés (couleur, forme…). Habituellement, les informations numériques et perceptives sont corrélées (par exemple, quand la quantité augmente, la surface augmente) donc le traitement de l'une ou l'autre information donne le même résultat (Butterworth, 2005) [4]. Cependant, Rousselle et coll. (2004) [42] ont montré que des enfants de 3 ans s'appuyaient sur des indices perceptifs continus pour effectuer des comparaisons de quantités, pas sur les quantités analogiques ou sur un système de fichiers d'objets. En effet, leurs performances se situent au-dessus du hasard, sauf si la surface occupée est contrôlée.

Des résultats, semblables à ceux issus des études portant sur les nourrissons, sont disponibles chez plusieurs espèces animales. Les bébés et les animaux, de même que certains peuples dépourvus d'un système numérique verbal, disposeraient d'une représentation mentale analogique des quantités, biologiquement déterminée, qui suit la loi de Weber-Fechner. Cela suggère que cette connaissance spécifique au domaine numérique est ancrée dans l'évolution, innée et indépendante du langage et des symboles numériques acquis par la suite (Dehaene et coll., 1998) [11]. Dehaene et coll. (2004) [13] postulent que les substrats cérébraux sous-tendant la numérosité sont présents précocement et influencent grandement le développement numérique précoce. À 3 mois, la région pariétale droite (où se situerait la représentation analogique selon le modèle du triple code) répond à un

changement numérique suffisamment conséquent (selon un rapport 1/2) alors qu'un changement de l'objet est détecté par les voies visuelles occipito-temporales (Dehaene, 2009b) [17]. Cette spécialisation cérébrale serait donc présente dès la naissance.

La cognition numérique analogique est composée de 2 systèmes innés et distincts, sous-tendus par des réseaux cérébraux distincts et des processus attentionnels différents (Hyde, 2011) [28]:

- Un « système d'individualisation parallèle », parfois nommé OTS (système de suivi d'objets), pour les petites quantités discontinues : une individualisation simultanée et parallèle de chaque élément de la collection. Ce système correspond au « subitizing », une perception intuitive, rapide et précise de la quantité, limitée à 3 ou 4 items. Ce système semble lié à la mémoire de travail visuelle dont la limite est de 3-4 items ;
- Un « système numérique approximatif » (SNA) pour les quantités continues et les grandes quantités discontinues : une estimation intuitive et rapide, à travers une représentation mentale approximative de la magnitude numérique, représentable sous forme d'une ligne numérique qui suit la loi de Weber-Fechner (l'imprécision augmente quand la numérosité augmente). Cette propriété, présente très précocement, conforte l'idée que la représentation analogique des quantités, qui supporte le sens du nombre, est semblable à celle des adultes dès la naissance.

II.2.3. L'acquisition des représentations symboliques

À la représentation analogique innée, s'ajoutent les codes symboliques, acquis d'abord implicitement, puis explicitement à travers les apprentissages (Fayol, 2008) [23]. Ces codes, culturels et arbitraires, permettent la représentation et la manipulation des quantités.

- **Le code verbal :** il nécessite la connaissance de la chaîne numérique verbale dont l'acquisition est plus ou moins aisée selon la langue : elle est plus tardive et difficile en français car le système n'est pas très régulier et ne laisse pas transparaître directement la structure décimale, contrairement au système chinois. Selon Fuson, plusieurs niveaux se succèdent lors de l'acquisition de la chaîne verbale, entre 2 ans et 7 ans (Chazoule, 2012) [6] : le chapelet (suite de noms de nombres indifférenciés, énoncée en un seul bloc) ; la chaîne insécable (mots individualisés mais comptage seulement possible à partir de 1) ; la chaîne sécable (comptage possible à partir d'un nombre donné ou entre deux nombres) ; la chaîne terminale (noms de nombres considérés comme des entités distinctes, et utilisés pour le dénombrement de collections et la réalisation d'opérations simples telles que les additions et les soustractions).

L'acquisition de la numérosité verbale s'effectue lentement car elle doit surmonter plusieurs difficultés, notamment la correspondance entre les noms de nombres et la cardinalité à laquelle ils renvoient, déterminée par leur rang dans la chaîne verbale. De plus, l'enfant doit être capable d'abstraction pour reconnaître équivalentes deux collections composées d'un même nombre d'éléments, même si elles diffèrent sur d'autres caractéristiques telles que la forme, la couleur ou l'identité de leurs éléments.

Le comptage est une technique de quantification précise qui nécessite la coordination de deux compétences : l'énonciation de la chaîne verbale et le pointage digital ou visuel de chaque élément de la collection. En 1978, Gelman et Gallistel (cités par Chazoule, 2012) [6] considèrent que 5 principes innés sous-tendent cette acquisition :

- Le principe d'ordre stable : énonciation de la chaîne verbale dans l'ordre approprié ;
- Le principe de stricte correspondance terme à terme : attribution d'un seul mot-nombre à chaque élément de la collection ;
- Le principe cardinal : le dernier mot-nombre énoncé correspond au nombre total d'éléments de la collection (le cardinal) ;
- Le principe d'abstraction : l'hétérogénéité des éléments ne modifie pas le cardinal ;
- Le principe de non pertinence de l'ordre : l'ordre du comptage ne modifie pas le cardinal.

Le comptage sert de base aux premiers apprentissages arithmétiques, ainsi l'addition peut être effectuée par comptage des éléments des deux collections à additionner (Butterworth, 2005) [4].

- **Le code indo-arabe :** les données sur l'apprentissage de ce système sont beaucoup moins importantes que celles portant sur le système verbal acquis plus précocement. Bien que le système arabe de numération écrite paraisse simple, composé des chiffres de 0 à 9, les enfants sont confrontés à plusieurs difficultés. En effet, la notation positionnelle, fondée sur la base 10, est plus facilement accessible aux enfants dont le système verbal laisse transparaître la structure décimale. Le système verbal français étant relativement opaque, les erreurs de transcodage du code verbal au code indo-arabe sont fréquentes. Ces erreurs sont d'autant plus fréquentes que le nombre de chiffres ou de mots est grand, de même lors de la présence de 0 dans le nombre (Fayol, 2012) [24]. Une autre difficulté, au niveau graphique ou spatial cette fois, est liée au tracé des chiffres : vers 5-6 ans les inversions des formes des chiffres, comme celles des lettres, sont fréquentes. L'écriture en miroir touche davantage les chiffres qui contredisent la règle implicite de l'écriture vers la droite (1, 2, 3, 7, 9) et les erreurs

sont aussi influencées par ce qui a été écrit précédemment : après un chiffre ou une lettre orienté vers la droite, l'enfant a tendance à orienter le caractère suivant à droite (Fisher, 2011) [25].

Des différences socio-culturelles sont retrouvées dans l'apprentissage du système verbal (Leroy-Malherbe, 2005) [34] et à travers les comparaisons symboliques (Fayol, 2012) [24], mais pas lors de l'utilisation du système non symbolique. En plus des variables socio-culturelles, les stimulations parentales et le mode d'enseignement influencent grandement les connaissances et performances numériques des enfants (Sophian, 2009) [44].

II.2.4. La représentation analogique : développement et lien avec les représentations symboliques

Le subitizing, processus correspondant à l'OTS, est présent précocement mais gagne en rapidité durant l'enfance. Pour certains auteurs, l'OTS constituerait le fondement du système symbolique, puisqu'il correspond à une numérosité précise, et soutiendrait le concept de succession des nombres (Piazza, 2010) [40]. Cependant, cette hypothèse n'est pas la plus soutenue, et elle ne constituera pas l'objet de travail de ce mémoire.

Les données actuelles étayent davantage l'idée du rôle fondamental du SNA dans l'acquisition des symboles numériques. De nombreuses études retrouvent une corrélation entre l'acuité du SNA et les résultats en mathématiques chez les enfants jusqu'à 14 ans. Néanmoins, ce lien n'est pas retrouvé chez les adultes, ce qui suggère que le SNA favoriserait uniquement l'amorçage des systèmes numériques symboliques, qui dépendraient ensuite d'autres facteurs (Inglis et coll., 2011) [29]. De plus, certaines études portant sur des tâches de comparaisons rapportent qu'une fois acquis, le traitement symbolique devient plus facile que le traitement non symbolique (Holloway et coll., 2009, cités par Lafay et coll., 2013 ; Chazoule, 2012) [33] [6]. Ces résultats semblent conforter l'hypothèse d'une dépendance initiale suivie d'une indépendance progressive des représentations symboliques des quantités par rapport à la représentation analogique. Notre étude reposera sur cette hypothèse.

Des effets de taille et de distance sont présents dans les tâches de comparaisons avec des stimuli analogiques aussi bien que symboliques. Ces effets, caractéristiques de la loi de Weber-Fechner, suggèrent une traduction automatique des symboles numériques en quantités approximatives à partir du SNA. Cette traduction est retrouvée avec d'autres tâches symboliques qui requièrent l'estimation par le SNA, telles que la vérification d'opérations symboliques ou la résolution de problèmes verbaux, comme celui de Gilmore

et coll. (« Sarah possède 21 bonbons, et on lui en donne 30 de plus. Jean, lui, en a 34. Qui en a le plus ? »), auxquels la réussite des enfants de 5-6 ans se situe au-delà du hasard (Dehaene, 2009a) [16]. Quel que soit l'âge, la référence aux quantités approximatives du SNA permettrait l'interprétation sémantique des symboles numériques acquis, verbaux ou indo-arabes, de façon automatique.

De même que l'OTS, le SNA se développe : la précision des représentations numériques augmente avec l'âge car le rapport de discrimination entre 2 quantités se rapproche de 1, les adultes étant capables de discriminer des quantités dans un rapport 10/11 (Lafay et coll., 2013) [33]. En outre, la ligne numérique mentale, initialement logarithmique (compressée du côté des grandes quantités), tend vers une organisation linéaire dès 5-6 ans. Cette linéarité est liée à l'amélioration de la précision du SNA, et sûrement à l'acquisition des systèmes symboliques. En effet, les adultes indiens Mundurucus, qui possèdent un lexique limité aux tout premiers nombres et n'ont pas d'enseignement mathématique, suivent une organisation logarithmique quand ils placent des chiffres sur une droite graduée de 1 à 10, contrairement aux adultes occidentaux qui respectent une organisation linéaire (distance égale entre chaque nombre consécutif) (Dehaene et coll., 2008) [15]. La ligne numérique mentale, sous-tendant l'effet SNARC, traduit les liens entre les nombres et l'espace, qui émanent certainement de substrats cérébraux voisins au niveau pariétal.

Selon Dehaene, la région du sillon intrapariétal (hIPS) encode la signification des quantités, la représentation quantitative des nombres. Elle est activée dans différentes cultures par toute représentation des quantités, symbolique ou non, suggérant une « greffe » des symboles numériques sur les circuits cérébraux préexistants pour les traitements numériques analogiques, hypothèse retenue pour ce mémoire. Le système pariétal postérieur intervient aussi dans de nombreuses activités numériques. Ce réseau est complété par le gyrus angulaire gauche, proche des aires du langage, qui permet surtout la récupération des faits arithmétiques stockés en mémoire (Dehaene et coll., 2003) [12].

L'articulation des symboles numériques avec la représentation analogique des quantités n'est pas absolue, ces représentations ne sont pas traitées de manière strictement identique. En effet, l'interprétation sémantique des représentations symboliques est plus précise car les effets de distance et de taille sont moins importants qu'avec l'analogique. De plus, le codage des représentations n'est pas de même nature : un codage de la position (« *place coding* ») pour les symboles (activation de la position cible et des positions adjacentes, antérieures et postérieures, de façon décroissante) et un codage de la somme (« *summation coding* ») pour les représentations analogiques, comme les collections de points (activation

de la suite des nombres jusqu'au nombre cible) (Roggeman et coll., 2007) [41]. En outre, selon White et coll. (2012) [45], l'intégration de la magnitude numérique et de l'information spatiale lors de l'apprentissage des nombres symboliques arabes s'effectue en 2 temps : l'accès à la magnitude existe dès la première année de primaire alors que le lien entre nombres et espace se met en place seulement l'année suivante.

II.2.5. Les fonctions cognitives sous-tendant le développement des compétences arithmétiques

L'arithmétique nécessite la collaboration de composantes cognitives non spécifiques au domaine numérique : langage, mémoire de travail, mémoire à long terme, gnosies digitales.

- **Le langage** : le niveau de langage influence l'acquisition de la chaîne verbale. Celle-ci sous-tend le dénombrement et le calcul, indispensables aux apprentissages en arithmétique (Fayol, 2012) [24].
- **La mémoire de travail** : permettant le stockage et le traitement simultané de l'information lors de tâches cognitives telles que les activités arithmétiques, elle est organisée en 4 composantes, selon Baddeley (Daclin et coll., 2011 ; David-Cazeilles et coll., 2011) [8] [9] : l'administrateur central ou central exécutif, la boucle phonologique pour les informations verbales, le calepin visuo-spatial pour les informations visuo-spatiales et le buffer épisodique qui permet le passage en mémoire à long terme. Elle joue un rôle important lors des acquisitions arithmétiques, par exemple pour l'apprentissage de la chaîne verbale et des faits arithmétiques, ou le transcodage.
- **La mémoire à long terme** : elle est constituée de la mémoire déclarative (la mémoire épisodique pour les événements définis dans un contexte spatio-temporel et la mémoire sémantique pour les savoirs) et de la mémoire procédurale qui stocke les procédures. Par rapport à l'arithmétique, elle contient toutes les connaissances arithmétiques, les procédures de résolution d'opérations et les souvenirs des moments d'apprentissage.
- **Les gnosies digitales :** les capacités perceptivo-tactiles, de perception et de discrimination des doigts, seraient liées au développement arithmétique (Fayol et coll., 1998 ; Fayol et coll., 2004 ; Fayol et coll., 2005) [20] [21] [22]. Les doigts offrent une première forme d'abstraction en représentant les petites collections d'objets variés sous forme de collections-témoins. De plus, leur utilisation permettrait une appropriation du concept numérique de base, selon lequel des grandeurs différentes sont équivalentes (1 main équivaut à 5 doigts). Les doigts permettent également de manipuler les quantités pour effectuer des opérations simples d'ajout ou de retrait, favorisant le comptage, qui

sous-tend les acquisitions arithmétiques. Les déficits perceptivo-tactiles sont alors souvent associés à des difficultés au niveau des représentations des quantités.

II.2.6. Conclusion

Alors que Piaget situe l'accès au nombre vers 7 ans, la neuropsychologie met en lumière des capacités numériques innées ancrées dans le cortex pariétal. La représentation analogique des quantités qui sous-tend le « sens du nombre » aurait 2 composantes : l'OTS, pour la discrimination précise des petites quantités, et le SNA pour l'estimation des grandes quantités. Des représentations numériques symboliques, acquises secondairement, viendraient « se greffer » sur cette représentation non symbolique : le code verbal, puis le code indo-arabe. Cependant, les mécanismes de la mise en place des représentations symboliques restent flous. En effet, bien que de nombreuses similarités (tel que l'accès automatique au SNA à partir des symboles ou la corrélation neurologique intrapariétale) témoignent d'une relation entre l'analogique et le symbolique, ces représentations diffèrent en plusieurs points : leur précision, leur codage, et les zones cérébrales impliquées dans leur traitement. De plus, le développement des savoirs et savoir-faire arithmétiques est lié au développement de ces représentations des quantités, mais implique également des fonctions cognitives telles que le langage, la mémoire et les capacités perceptivo-tactiles.

II.3. Les difficultés d'apprentissage en mathématiques

Les difficultés d'apprentissage en mathématiques (MLD : « *mathematical learning disability* ») sont relativement courantes. Cependant, les recherches dans ce domaine sont moins nombreuses et plus récentes que celles portant sur les difficultés d'apprentissage de la lecture. Il semble néanmoins indispensable de comprendre les mécanismes sous-tendant ces difficultés afin de mettre en place des interventions ciblées, plus efficaces (Geary, 2011) [27]. De plus, ces études pourraient aider à comprendre le développement normal des habiletés mathématiques, et plus particulièrement le lien entre la représentation analogique des quantités et les représentations symboliques, notre objet de recherche.

II.3.1. Difficultés d'apprentissage en mathématiques et prévalence

Certains enfants présentent des difficultés dans l'apprentissage des mathématiques, bien qu'ils soient exempts de troubles sensoriels, moteurs ou intellectuels. Ces enfants peuvent avoir des difficultés dans la représentation et la compréhension des quantités, la récupération des faits arithmétiques et l'apprentissage des procédures arithmétiques (Geary, 2011) [27]. Diverses études rapportent une prévalence de ces difficultés entre 3 et 8 % des élèves, cette hétérogénéité étant expliquée par l'utilisation de critères différents selon les études (Fayol, 2012) [24]. Certains de ces déficits, différents d'un enfant à l'autre,

peuvent persister à l'âge adulte et nuire à l'insertion sociale et professionnelle de l'individu (Lafay et coll., 2013) [33].

II.3.2. Hypothèses sur l'origine des difficultés d'apprentissage en mathématiques

Plusieurs hypothèses théoriques ont été proposées pour expliquer l'origine des MLD : des hypothèses de déficits spécifiques au domaine numérique ou des hypothèses de déficits cognitifs généraux (Andersson et coll., 2012) [1].

II.3.2.1 Hypothèse du trouble du sens du nombre

Certains attribuent l'origine des difficultés en mathématiques à un « faible » sens du nombre. Comme évoqué précédemment, cette sémantique numérique innée reposerait sur 2 systèmes fondamentaux : l'OTS et l'ANS. Le déficit de l'un et / ou l'autre de ces systèmes, considérés par la plupart des auteurs comme fondements des compétences arithmétiques supérieures, serait à l'origine des difficultés en mathématiques.

L'hypothèse du déficit du SNA prévoit que les enfants avec MLD ont des difficultés lors des tâches numériques approximatives telles que les comparaisons numériques (symboliques et non symboliques), du fait d'un SNA moins précis et moins linéaire (moins mature) que celui de leurs pairs sans MLD (Andersson et coll., 2012) [1]. Plusieurs études, dont celle de Chu et coll. (2013) [7], ont retrouvé un lien entre une faible acuité du SNA et l'existence de MLD. Ce résultat concorde avec notre hypothèse qui met en avant le rôle primordial de la représentation analogique dans la mise en place des représentations symboliques. Cependant, Chu et coll. (2013) [7] rapportent que d'autres études (Rousselle et coll., 2007 ; Iuculano et coll., 2008) n'ont pas retrouvé cette corrélation. En outre, Butterworth (2010) [5] remet en cause l'hypothèse qui attribue au SNA un rôle primordial pour l'apprentissage mathématique, surtout du fait de la nature approximative du système.

Pour certains auteurs, l'OTS supporterait le développement des représentations numériques exactes, à l'origine de l'arithmétique. Selon Carey, les enfants associent les différentes quantités à des mots de nombres distincts, par déduction, selon le même principe que l'OTS (Butterworth, 2010) [5]. La découverte de la fonction de successeur permet de comprendre que la valeur cardinale du mot-nombre est définie par sa place dans la chaîne numérique (Noël et coll., 2011) [37]. L'hypothèse du déficit de l'OTS prévoit que les enfants avec MLD ont des difficultés de subitisation (discrimination exacte des petites quantités), ce qui a été retrouvé dans plusieurs études (Andersson et coll., 2012) [1]. Mais des difficultés lors du dénombrement de quantités supérieures ont également été relevées (Butterworth, 2010 ; Landerl et coll., 2004, cités par Andersson et coll., 2012) [5] [1].

Enfin, un déficit de ces 2 systèmes de base pourrait être à l'origine de MLD, comme le suggère une corrélation significative ($r = 0,68$; $p < 0,05$) retrouvée entre subitisation (tâche de l'OTS) et estimation de la ligne numérique (tâche du SNA) par Andersson et coll. (2012) [1] pour le groupe MLD de 20 enfants. Ces 2 tâches ne sont pas corrélées ($r = 0,10$) pour le groupe contrôle de 43 enfants. Cette hypothèse est étayée par un dysfonctionnement intrapariétal identifié dans les études d'imagerie chez les enfants avec MLD, la région intrapariétale sous-tendant le sens du nombre à travers le SNA et l'OTS. Cependant, l'hypothèse du déficit du sens du nombre n'explique pas l'existence de tableaux cliniques hétérogènes (Kaufmann et coll., 2013) [31].

II.3.2.2 Hypothèse du déficit d'accès

Une autre hypothèse considère que ce n'est pas la représentation analogique qui est atteinte mais ses relations avec les représentations symboliques, verbales et / ou arabes. Cela coïncide également avec notre hypothèse d'une dépendance initiale des représentations symboliques par rapport à la représentation analogique. Les enfants avec MLD auraient des difficultés à se représenter les quantités à partir des symboles numériques, à leur attribuer une signification, ce qui aurait un impact sur l'acquisition des concepts mathématiques et des procédures arithmétiques. Cette hypothèse prédit que les enfants avec MLD ont des difficultés lors des tâches numériques symboliques, mais pas lors des tâches numériques non symboliques (Andersson et coll., 2012) [1], ce qui a été retrouvé avec des tâches de comparaisons de quantités (Rousselle et coll., 2007 ; De Smedt et coll., 2011) [43] [19]. Cependant, Landerl et coll. (2009) (cités par De Smedt et coll., 2011) [19], ont montré que les enfants avec MLD avaient des difficultés lors des comparaisons symboliques et non symboliques, en accord avec l'hypothèse du déficit du sens du nombre.

II.3.2.3 Hypothèse du déficit du codage de la numérosité

Selon Butterworth (2010) [5] : « les nombres arabes, verbaux et non symboliques sont mis en correspondance avec un code interne qui représente chaque numérosité comme un ensemble discret de neurones ». Ce système de codage exact de la numérosité, impliqué dans la reconnaissance, la représentation et la manipulation des quantités exactes, est également valable pour les grandes quantités et n'est pas dépendant de l'attention visuelle, contrairement à l'OTS. L'hypothèse du déficit du codage de la numérosité prédit que les enfants avec MLD ont des difficultés dans la subitisation et le dénombrement de collections, comme dans plusieurs études, alors qu'Andersson et coll. (2012) [1] ne retrouvent pas cette difficulté à identifier exactement (par le comptage) les grandes numérosités. En outre, le codage de la numérosité est en lien avec l'utilisation des doigts

car il permet la correspondance terme à terme entre la collection d'éléments codée et une collection de doigts (Butterworth, 2010) [5]. Cela est cohérent avec l'influence des gnosies digitales sur les performances en mathématiques, précédemment évoquée.

II.3.2.4 Hypothèse du déficit cognitif général

Les mathématiques dépendent également de fonctions cognitives non spécifiques au domaine numérique, présentées précédemment. Dans cette perspective, certains auteurs proposent l'hypothèse d'un déficit cognitif général à l'origine de MLD. De nombreuses études retrouvent que les enfants avec MLD ont des difficultés de mémoire de travail verbale et / ou visuo-spatiale, de récupération des informations en mémoire sémantique et de fonctions exécutives (flexibilité, inhibition, vitesse de traitement, attention, planification, mise à jour), mais il existe des divergences entre les résultats (Andersson et coll., 2012) [1]. Cette hypothèse du déficit de fonctions cognitives générales expliquerait l'hétérogénéité des tableaux cliniques, qui diffèreraient selon les fonctions cognitives atteintes (Kaufmann et coll., 2013) [31]. En outre, des anomalies neurologiques dans les régions cérébrales qui sous-tendent ces fonctions cognitives ont été retrouvées chez les enfants avec MLD, et appuient cette hypothèse (Kucian et coll., 2013 ; Rotzer et coll., 2008, cités par Ashkenazi, 2013) [32] [2]. Les déficits cognitifs généraux sont donc à prendre en compte lors des évaluations et des interventions auprès des enfants avec MLD.

II.3.2.5 Hypothèse de déficits multiples

Les MLD pourraient être liées à des causes diverses selon les enfants. Certains seraient atteints d'un déficit unique, parmi ceux évoqués précédemment, alors que d'autres auraient des déficits multiples (Andersson et coll., 2012) [1]. Ceci expliquerait l'hétérogénéité des profils et les contradictions retrouvées dans les résultats des différentes études.

II.3.2.6 Approche génétique

La génétique est également mobilisée dans la recherche des causes des MLD, notamment afin de déterminer si ces difficultés résultent de l'inné ou de l'acquis. Des études familiales et de jumeaux concluent que la génétique influence une partie des performances en mathématiques, donc la potentialité de MLD (Gauvrit, 2012) [26]. Néanmoins, les facteurs environnementaux contribuent aussi aux performances mathématiques. Les interventions sur les enfants avec MLD peuvent donc améliorer leurs performances (Geary, 2011) [27].

II.3.3. MLD au sein de syndromes neurodéveloppementaux

Certains syndromes neurodéveloppementaux, tels que le syndrome de DiGeorges, le syndrome du X fragile, le syndrome de Turner, le syndrome de Williams-Beuren ou encore

le syndrome de Gerstmann, s'accompagnent fréquemment de MLD. La compréhension de ces syndromes permet d'accroître nos connaissances sur les processus mathématiques et leurs substrats cérébraux, et d'améliorer la compréhension des MLD et du développement des représentations des quantités dans la population générale, notre sujet d'étude.

II.3.3.1 Généralités

Karmiloff-Smith et ses collaborateurs (2012) [30] défendent l'intérêt d'une approche neuro-constructiviste pour étudier le développement des compétences et mettre en place des interventions efficaces. Le suivi du développement des enfants atteints d'un syndrome neurodéveloppemental permettrait de comprendre la dynamique de changement résultant de la génétique et de l'environnement. Ceci s'oppose aux méthodes « statiques », fondées sur les modèles neuropsychologiques de lésions cérébrales adultes. En outre, les comparaisons entre les difficultés relevées chez les enfants atteints de ces syndromes neurodéveloppementaux sont importantes puisqu'ils présentent des tableaux cliniques divers, correspondant potentiellement aux différents sous-types de MLD.

Les enfants atteints de ces syndromes, donc à risque de MLD, sont détectables plus précocement que ceux avec MLD sans syndrome. Ainsi, des études supplémentaires portant sur les trajectoires développementales des enfants avec un syndrome neurodéveloppemental permettraient d'affiner la compréhension des mécanismes du développement mathématique dans la population générale : le développement de la représentation analogique des quantités, la mise en place des représentations symboliques, et leurs contributions aux compétences mathématiques (De Smedt et coll., 2009) [18] ; sujets auxquels notre étude s'intéresse. De plus, les MLD sont fréquemment associées à des déficits de compétences cognitives qui influencent les mathématiques. Ainsi, les études portant sur ces syndromes permettent d'apprécier l'importance de ces facteurs et la façon dont le développement atypique des enfants influe sur leurs habiletés mathématiques.

Les travaux de neuro-imagerie, effectués sur des individus atteints de l'un de ces syndromes génétiques, contribuent à l'amélioration des connaissances sur les bases neurobiologiques de MLD et sur les influences génétiques du développement cérébral et des habiletés mathématiques (De Smedt et coll., 2009) [18]. Des anomalies pariétales, structurelles ou fonctionnelles, ont été retrouvées chez ces individus (De Smedt et coll., 2009 ; O'Hearn et coll., 2009 ; Dehaene et coll., 2004) [18] [38] [14]. Cela soutient la théorie de la contribution du cortex pariétal au développement de la cognition mathématique, en accord avec l'hypothèse du trouble du sens du nombre, concordant ainsi avec l'hypothèse étudiée dans ce mémoire.

II.3.3.2 Les syndromes neurodéveloppementaux

Le syndrome de DiGeorges (ou syndrome de délétion du chromosome 22q11, ou syndrome vélo-cardio-facial) résulte d'une micro délétion sur la région 11.2 du chromosome 22. Les difficultés retrouvées dans les procédures de calcul pourraient être liées aux troubles visuo-spatiaux, et les déficits dans la compréhension et la représentation des quantités seraient liés à l'atteinte de la représentation analogique des quantités (De Smedt et coll., 2009) [18]. Cela serait en accord avec notre hypothèse, issue du triple code, d'une « greffe » des représentations symboliques sur la représentation analogique.

Le syndrome du X fragile correspond à la mutation d'un seul gène sur le bras long du chromosome X. Les études décrivent des habiletés mathématiques altérées (l'application des connaissances) et des habiletés mathématiques préservées (les connaissances en mémoire) dans 2 domaines : le sens du nombre et la connaissance des nombres rationnels. De plus, des difficultés dans les capacités cognitives (fonctions exécutives, capacités visuo-spatiales, compétences liées à la lecture) ont été observées, ce qui génère un questionnement sur l'origine des difficultés en mathématiques : s'agit-il d'un déficit primaire lié au syndrome ou d'un déficit secondaire dû à l'atteinte des fonctions cognitives nécessaires au développement des habiletés mathématiques (Murphy, 2009) [36] ?

Le syndrome de Turner (ou monosomie du X) est lié à l'absence totale ou partielle d'un seul ou des 2 chromosomes X. Des difficultés dans la subitisation, limitée à des quantités inférieures par rapport à la population générale, ont été mises en évidence chez ces enfants. Cependant, les tâches de comparaisons de quantités sont correctement effectuées, donc le traitement numérique de base, supporté par la représentation analogique des quantités, serait intact (Bruandet et coll., 2004) [3]. Dans l'étude de Mazzocco (2009) [35], la majorité des mauvaises performances ont lieu sur des tests chronométrés. Bien que cette lenteur puisse être liée à des déficits de traitement numérique ou de fonctions cognitives générales, cela signale l'importance de la prise en compte des temps de réponse dans les évaluations. Dans notre étude, ce critère sera pris en compte dans les analyses.

Le syndrome de Williams-Beuren fait suite à une micro délétion sur le chromosome 7. Les études évoquent une représentation analogique atypique (O'Hearn et coll., 2009) [38] et des difficultés de connexion avec les symboles numériques (Van Herwegen et coll., 2008, cités par Fayol, 2012) [24]. Bien que leur représentation numérique de base soit atteinte, les individus affichent certaines habiletés mathématiques, telles que la lecture des nombres. L'OTS, qui semble efficient dans l'enfance, apparaît comme un support potentiel au développement des habiletés numériques, même si ce système se révèle atypique plus tard.

Ces syndromes partagent des caractéristiques communes : des habiletés verbales efficientes, des habiletés spatiales et mathématiques altérées suite aux atteintes pariétales. Les difficultés spatiales seraient en lien avec l'atteinte de la ligne numérique mentale, sous-tendant la représentation analogique, donc associées à certains déficits dans les compétences mathématiques. Cependant, cette représentation analogique ne serait pas essentielle à toutes les compétences mathématiques, car certaines sont possibles grâce aux habiletés verbales ou mnésiques préservées (Fayol, 2012) [24]. Cela contredirait l'hypothèse de ce mémoire, qui souligne le rôle primordial de la représentation analogique dans la mise en place des représentations symboliques. Des études supplémentaires permettraient d'étudier le rôle spécifique du langage, de la mémoire et des habiletés visuo-spatiales, sur le développement des compétences mathématiques.

Enfin, le syndrome de Gerstmann se définit par 4 symptômes : une agnosie digitale (trouble de la reconnaissance des doigts), une dysgraphie (trouble de l'écriture), une difficulté à distinguer la droite et la gauche, et des difficultés en mathématiques. Les études soulignent l'étroite relation entre la représentation digitale et la représentation numérique, même si la nature de ce lien n'est pas encore claire. Il pourrait être cérébral, leurs substrats cérébraux étant proches, ou fonctionnel, hypothèse étayée par des corrélations retrouvées entre les deux domaines chez des enfants (Fayol et coll., 2005 ; Fayol, 2012) [22] [24].

II.3.4. Conclusion

Les difficultés d'apprentissage en mathématiques (MLD) sont relativement fréquentes, il s'avère alors important de mettre en place des stratégies efficaces pour y remédier. Dans cette perspective, il paraît nécessaire de comprendre le développement normal et l'origine des déficits, qu'elle soit spécifique au domaine numérique et / ou en lien avec certaines fonctions cognitives générales. Parmi les hypothèses causales pour MLD, celle du déficit multiple semble actuellement la plus envisageable, suggérant que les MLD sont sous-tendues par un ou plusieurs déficits de base, pouvant différer d'un individu à l'autre, et correspondant aux différentes hypothèses émises (Andersson, 2012) [1]. Les recherches portant sur les syndromes neurodéveloppementaux souvent accompagnés de MLD sont également importantes pour éclaircir nos connaissances sur les habiletés mathématiques, les développements normaux et atypiques (Mazzocco, 2009) [35] et les substrats cérébraux sous-jacents (De Smedt et coll., 2009) [18].

III. PROBLÉMATIQUE

Pour comprendre comment s'effectuent les acquisitions dans le domaine arithmétique, nous nous référons au modèle du triple code. L'objectif est d'étudier les représentations des quantités dans une perspective développementale, la manière dont se mettent en place les représentations symboliques et leur articulation avec la représentation analogique innée.

Selon le modèle du triple code, les représentations symboliques, verbales et arabes, se « greffent » sur la représentation analogique, qui donne du sens à ces symboles. Donc les performances aux épreuves mettant en jeu les codes symboliques ne pourraient pas être supérieures à celles obtenues avec le code analogique. De plus, le code verbal, sous-tendant l'acquisition plus tardive du code arabe, génèrerait de meilleurs résultats que le code arabe.

Cependant, l'hypothèse selon laquelle : analogique > verbal > arabe, n'a pas été totalement validée par les résultats de Chazoule (2012) [6]. En effet, si cela est retrouvé dans les résultats des enfants de 4 ans aux épreuves de comparaisons de quantités, les performances aux épreuves verbales et arabes des enfants de 5 ans rejoignent voire dépassent celles réalisées aux épreuves analogiques. Il a également observé que les performances aux comparaisons analogiques sont meilleures lorsque la surface des quantités à comparer n'est pas contrôlée, pour les enfants de 4 et 5 ans et les adultes. Ceci est en accord avec certaines données de la littérature (Rousselle et coll., 2004) [42] soulignant l'influence des variables perceptives lors des tâches de comparaisons de quantités.

Notre étude s'inscrit dans la continuité de cette thèse, ce qui explique en partie le choix d'étudier une population d'enfants de 5-7 ans. Nous pourrons comparer nos résultats à ceux obtenus par Chazoule (2012) [6], pour observer l'évolution des représentations des quantités. Le choix de la population est également motivé par les données de la littérature situant la mise en place des représentations symboliques entre 2 et 7 ans. De plus, la prise en compte des temps de réponse, envisageable à 5-7 ans, fournit un critère d'analyse supplémentaire.

Notre objectif est donc l'étude, chez des enfants de 5-7 ans, des relations entre les performances de comparaisons de quantités, selon qu'elles sont présentées sous format symbolique (verbal ou arabe) ou non-symbolique (cercles, surfaces ou collections de jetons). Les études de corrélations et de profils devraient permettre de déterminer si les représentations symboliques dépendent des représentations non-symboliques. Nous

étudierons l'effet de rapport dont la présence signe la mise en relation automatique des codes symboliques avec la représentation analogique. Cet effet de rapport est retrouvé chez les adultes, mais pas encore chez les enfants de 5 ans, dans les résultats de Chazoule (2012) [6]. De plus, l'étude des profils individuels permettra de faire apparaître les enfants ayant des difficultés particulières.

De nombreux enfants connaissent des difficultés en mathématiques, souvent liées à un défaut au niveau des représentations des quantités, selon certaines hypothèses causales exposées précédemment. Cette étude constitue une étape préalable à l'établissement d'un bilan des représentations des quantités, symboliques et non symboliques, par le biais d'un outil informatisé prenant en compte la précision et la rapidité des réponses. Cette évaluation permettrait une remédiation plus efficace, car plus adaptée aux difficultés de l'enfant.

IV. HYPOTHÈSES

Notre première hypothèse stipule que, dans les épreuves de comparaisons de quantités, les performances en arithmétique symbolique dépendent des performances en arithmétique non symbolique, selon le modèle du triple code. De ce fait, la réussite (ou l'échec) aux épreuves non symboliques conditionne la réussite (ou l'échec) aux épreuves symboliques.

Notre deuxième hypothèse est la suivante : analogique (cercles et jetons) > verbal > arabe, conformément au modèle du triple code. Nous nous attendons à de meilleurs résultats aux épreuves de comparaisons de quantités présentées sous un format analogique (cercles et jetons), comparativement à celles présentées sous un format symbolique (verbal et arabe). De même, nous prévoyons que les comparaisons de numéraux verbaux soient mieux réussies et plus rapides que les comparaisons de chiffres arabes.

Notre troisième hypothèse envisage une meilleure réussite aux épreuves de comparaisons analogiques lorsque la surface n'est pas contrôlée, en accord avec les résultats de Chazoule (2012) [6]. Donc les comparaisons de surfaces devraient être moins bien réussies et moins rapides que les deux autres épreuves analogiques (comparaisons de cercles et de jetons).

Notre quatrième hypothèse prévoit une meilleure réussite à l'ensemble des épreuves et une plus grande rapidité aux comparaisons pour les enfants de CP, par rapport à ceux de GSM.

Notre cinquième hypothèse stipule que les codes symboliques sont automatiquement mis en relation avec la représentation analogique en CP, éventuellement en GSM. Cela se traduit par l'apparition d'un effet de rapport dans les épreuves de comparaisons symboliques : plus le rapport entre les quantités à comparer se rapproche de 1, plus la comparaison est difficile (en exactitude et en temps de réponse). Cet effet de rapport devrait également être présent avec les comparaisons analogiques, pour les deux groupes d'enfants, conformément aux données de la littérature portant sur le traitement analogique.

V. MÉTHODOLOGIE

V.1. Population étudiée

Notre étude a porté sur 30 enfants scolarisés en Grande Section de Maternelle (GSM), dans 3 classes de l'école Dunois à Paris XIIIe (75), et sur 32 enfants scolarisés en Cours Préparatoire (CP), dans 2 classes de l'école Maurice Genevoix à Sargé-lès-le-Mans (72). La passation des épreuves a été effectuée en juin 2013.

Parmi les 32 enfants de CP, nous en avons conservés 31 pour les analyses de groupes. En effet, les résultats d'un enfant (N°32) ne sont pas pris en compte dans ces analyses, puisqu'ils présentent un écart trop important par rapport aux résultats obtenus par l'ensemble de la cohorte dans de nombreuses épreuves. Cependant, cet enfant fera l'objet d'une étude de cas. En ce qui concerne les enfants de GSM, tous ceux de notre échantillon (30 enfants) seront pris en compte dans les analyses de groupes.

	GSM	**CP**
Âge :		
_ Moyenne	_ 70 mois (5 ans 8 mois)	_ 81 mois (6 ans 9 mois)
_ Écart type	_ 4 mois	_ 3 mois
_ Âge minimal	_ 60 mois (4 ans 10 mois)	_ 76 mois (6 ans 2 mois)
_ Âge maximal	_ 76 mois (6 ans 2 mois)	_ 89 mois (7 ans 5 mois)
Genre :		
_ Filles	_ 14 (46,67 %)	_ 12 (38,7 %)
_ Garçons	_ 16 (53,33 %)	_ 19 (61,3 %)
Effectif	30	31

Tableau 1 : données démographiques des participants dont les résultats entrent dans les analyses de groupes

V.2. Description des épreuves

Les passations individuelles s'effectuent en 2 temps de 20 minutes environ, le premier pour l'évaluation de caractéristiques cognitives, le deuxième correspondant aux épreuves informatisées de comparaisons de quantités. L'enfant est seul avec l'expérimentateur et l'ordre de présentation des épreuves correspond à celui respecté ci-après.

V.2.1. Évaluation des caractéristiques cognitives

Les épreuves portent essentiellement sur les connaissances numériques des enfants, évaluant les savoirs et savoir-faire arithmétiques. Le domaine verbal est également abordé à travers une épreuve de vocabulaire.

- Épreuve d'énonciation de la chaîne verbale

Principe

Cette épreuve évalue le niveau de la chaîne verbale de l'enfant, ainsi que l'acquisition du principe d'ordre stable (énonciation des mots-nombres dans l'ordre approprié).

Passation et cotation

La consigne est la suivante : « *Montre-moi jusqu'où tu sais compter* ». L'enfant énonce la chaîne numérique à l'oral et l'examinateur note le dernier mot-nombre de la chaîne verbale produite correctement, c'est-à-dire respectant l'ordre conventionnel ; il arrête l'enfant à 20. Les scores peuvent donc se situer entre 0 et 20 (car arrêt de la chaîne verbale à 20).

- Épreuve de comptage / dénombrement

Principe

Cette épreuve évalue l'acquisition du principe cardinal, c'est-à-dire le fait de comprendre que le dernier mot-nombre énoncé lors du comptage correspond au cardinal de l'ensemble. Le comptage nécessite l'énonciation de la chaîne verbale et le pointage visuel ou digital.

Matériel, passation et cotation

Cinq feuilles comportent chacune 3, 7, 9, 12 ou 18 gros points verts identiques, disposés de façon aléatoire. L'examinateur présente une feuille à l'enfant et énonce la consigne suivante : « *Compte les points et dis-moi combien il y en a sur cette feuille* ». Si l'enfant se contente de compter les points en énonçant la chaîne numérique, l'examinateur lui demande ensuite « *Combien y a-t-il de points sur la feuille ?* », pour vérifier que l'enfant comprend que le dernier mot-nombre correspond au cardinal de l'ensemble. L'ordre de présentation des feuilles suit l'augmentation du nombre de points : 3, 7, 9, 12, puis 18. Un point est accordé à chaque dénombrement correct, les scores peuvent se situer entre 0 et 5.

- Épreuve de constitution de collections

Principe

Cette épreuve évalue la capacité de l'enfant à utiliser ses connaissances numériques pour former des collections constituées d'un nombre donné d'objets.

Matériel, passation et cotation

Vingt petits morceaux de bois (Kapla) sont mis à disposition de l'enfant. La consigne est la suivante : « *Donne-moi n Kapla s'il te plaît* », n correspondant à un nombre qui croît au fur et à mesure de l'épreuve : 2, 4, 6, 9, puis 12. Entre chaque item, les Kapla que l'enfant a donnés à l'examinateur sont remis avec les autres. Un point est accordé à chaque collection de Kapla correctement constituée. Les scores peuvent donc se situer entre 0 et 5.

- Épreuve de comptage en écriture arabe

Principe

Contrairement aux épreuves précédentes, qui impliquent le code verbal, cette épreuve s'intéresse au système symbolique arabe, évaluant la connaissance des chiffres arabes.

Matériel, passation et cotation

L'examinateur inscrit les chiffres 1 et 2 sur une feuille, sous le regard de l'enfant, et il énonce la consigne : « *J'ai commencé ici* (écrire : 1, 2), *je voudrais que tu continues en écrivant le plus loin que tu sais* ». L'enfant écrit la suite des chiffres arabes, l'examinateur l'arrête lorsqu'il atteint 20, cette limite étant la même que lors de l'énonciation de la chaîne verbale. Le score correspond au dernier chiffre arabe de la suite écrite correctement, c'est-à-dire respectant l'ordre stable de la chaîne numérique. Les scores peuvent donc se situer entre 0 et 20. L'écriture en miroir n'est pas prise en compte dans la notation, les difficultés graphiques ou spatiales sont fréquentes à ces âges mais n'empêchent pas la connaissance des chiffres arabes. Les chiffres arabes sont donc acceptés dès lors qu'ils sont reconnaissables.

- Épreuve des lignes numériques

Principe

Cette épreuve évalue la façon dont l'enfant se représente les quantités symboliques, présentées par le code verbal oral en l'occurrence. Ceci est apprécié par le lien que l'enfant établit entre la représentation symbolique (code verbal oral) et la représentation analogique (trait horizontal analogue à la ligne numérique mentale) pour une quantité donnée. L'épreuve s'inspire de la batterie de tests ZAREKI-r, avec l'épreuve de positionnement de nombres sur une échelle. Cependant, cette épreuve diffère de celle de notre protocole, car les traits sont verticaux et non horizontaux, chaque ligne numérique va de 0 à 100 et ces valeurs ne sont pas indiquées par le code arabe (1 et 10 inscrits dans notre épreuve).

Matériel, passation et cotation

Trois feuilles sont successivement présentées à l'enfant. Sur chaque feuille figurent 3 traits horizontaux de 20 cm, gradués par des traits verticaux à leurs 2 extrémités : 0 à gauche, 10 à droite. La consigne est la suivante : « *Sur cette feuille, il y a des échelles de nombres. Le premier trait ici* (montrer celui de gauche) *correspond à 0. Le second trait* (montrer celui de droite) *correspond à 10. Cette échelle de nombres va donc de 0 à 10. Je voudrais que tu indiques avec un trait où tu mettrais n* ». n correspond à un chiffre : 3, puis 7, 1, 5, 2, 9, 6, 4 et 8. Chaque chiffre doit être placé par un trait vertical sur une ligne différente pour éviter que le placement d'un chiffre influe beaucoup sur le suivant. Un point est accordé quand l'enfant a placé le trait au bon endroit sur la ligne numérique, avec une marge d'erreur de plus ou moins 0,5 cm par rapport à l'emplacement exact du chiffre. Un demi-point est accordé quand la réponse de l'enfant se situe entre - 0,5 cm et - 1 cm, ou entre + 0,5 cm et + 1 cm, par rapport à la position exacte. Les scores peuvent se situer entre 0 et 9.

- Épreuve de reconnaissance de chiffres arabes

Principe

Cette épreuve évalue la connaissance du système symbolique arabe, en reconnaissance cette fois, et non en production comme dans l'épreuve de comptage en chiffres arabes.

Matériel, passation et cotation

Huit feuilles comportent chacune un nombre arabe différent. Elles sont présentées dans l'ordre croissant des chiffres : 3, 5, 8, 10, 13, 15, 18, 20. La consigne est la suivante : « *Voici des nombres. Peux-tu les lire tout haut ?* ». Un point est accordé quand le nombre est lu correctement par l'enfant. Les scores peuvent donc se situer entre 0 et 8.

- Épreuve de vocabulaire

Principe

L'épreuve de vocabulaire de la Némi 2 est utilisée pour évaluer le niveau de performance de l'enfant dans le domaine verbal. Le niveau de langage est évalué car il pourrait influer sur les compétences numériques de l'enfant quand le code verbal est utilisé.

Passation et cotation

La passation suit le protocole de la Némi 2 (voir annexe A page 67), la consigne est la suivante : « *Je vais te dire des mots et te demander ce qu'ils veulent dire. Il y en a que tu*

connais bien, d'autres qui te sont moins familiers et enfin, quelques-uns que tu ne connais pas du tout ». Suivant l'âge de l'enfant, l'épreuve ne commence pas à partir des mêmes items, qui sont présentés selon un ordre de difficulté croissante. L'épreuve s'arrête dès 3 échecs consécutifs. Le protocole de la Némi 2 accorde 0, 1 ou 2 points à chaque item, suivant la réponse donnée. La note standard (entre 1 et 7) est ensuite calculée en fonction de l'âge de l'enfant. Les difficultés de parole et langage ne sont pas prises en compte dans la notation, seule la connaissance du vocabulaire est évaluée.

V.2.2. Comparaisons de quantités

Les épreuves de comparaisons de quantités sont présentées sur ordinateur, à l'aide du logiciel E-Prime, qui permet de recueillir les réponses effectuées et les temps de réponse (seuls les temps de réponse des items réussis seront pris en compte pour les analyses). Les enfants répondent en appuyant sur une des 2 touches marquées d'une gommette blanche sur le clavier de l'ordinateur : une touche est située à droite (touche « s »), l'autre à gauche (touche « l »), pour correspondre aux 2 images (droite et gauche) de l'écran. Pour chaque item, 2 quantités apparaissent simultanément à l'écran, dans un format analogique (réglettes, cercles, jetons ou surfaces rectangles) ou symbolique (numéraux verbaux ou chiffres arabes). L'enfant doit appuyer le plus vite possible sur la touche qui se trouve du même côté que la quantité la plus grande. Pour chaque épreuve, la moitié des items présentent la plus grande quantité à gauche et l'autre moitié la présentent à droite.

La première épreuve (comparaisons de réglettes) ne comprend que 10 items, elle sert de contrôle de la compréhension de la consigne et de la notion « plus grand que ». Les autres épreuves comportent 44 items, mais les 8 premiers items permettent à l'enfant de se familiariser avec la tâche et ne sont pas pris en compte dans les analyses. Ces épreuves de comparaisons s'effectuent selon 3 rapports (1/2, 2/3 et 3/4), mais également 3 distances (1, 2 et 3), entre les quantités à comparer.

Distance \ Rapport	1/2	2/3	3/4
1	1 vs 2	2 vs 3	3 vs 4
2	2 vs 4	4 vs 6	6 vs 8
3	3 vs 6	6 vs 9	9 vs 12

Tableau 2 : comparaisons en fonction de la distance et du rapport pour les épreuves de comparaisons de cercles, jetons, surfaces rectangles, numéraux verbaux et chiffres arabes

Dans certaines épreuves de comparaisons (jetons, surfaces rectangles, numéraux verbaux et chiffres arabes), une image de 2 bustes d'enfants (un garçon et une fille), avec un cercle

placé en dessous de chacun, est présentée à l'écran pour chaque item. Dans chaque cercle figure une quantité représentée sous un format analogique ou symbolique. Dans chaque épreuve, la fille est à gauche pour la moitié des items et à droite pour l'autre moitié. Ainsi, chaque comparaison de quantités est présentée de 4 façons différentes, par exemple pour « 1 vs 4 » : « 1 vs 4f », « 1 vs 4g », « 4 vs 1f » et « 4 vs 1g » ; les lettres « g » et « f » signifiant que c'est le garçon (« g ») ou la fille (« f ») qui figure à gauche sur l'écran.

- Comparaisons de réglettes : épreuve contrôle

La consigne est la suivante : « *Maintenant, tu vas voir apparaître des baguettes sur l'écran. Montre-moi quelle est la plus grande des 2 baguettes en appuyant sur l'une des 2 touches blanches du clavier* ». À chaque item, 2 réglettes de longueurs différentes apparaissent (voir annexe B page 73 pour une illustration).

Cette épreuve de comparaisons de quantités analogiques continues est nécessaire car l'enfant se familiarise avec l'outil informatique et la tâche qui lui est demandée, en rapport avec la notion « plus grand que ». Cette épreuve permet également de vérifier que les réponses de l'enfant ne sont pas dues au hasard et que ses résultats dans les autres épreuves de comparaisons pourront être pris en compte pour les analyses.

- Comparaisons de cercles

Cette épreuve de comparaisons présente des quantités sous un format analogique continu, comme l'épreuve précédente. La consigne est la suivante : « *Maintenant, tu vas voir apparaître des cercles sur l'écran. Montre-moi quel est le plus grand des 2 cercles en appuyant sur l'une des 2 touches blanches du clavier. Appuie le plus vite possible sans te tromper* ». Pour chaque item, 2 cercles de surfaces différentes apparaissent à l'écran (voir annexe B page 73 pour une illustration). La différence entre les cercles est calculée en fonction de leur diamètre.

- Comparaisons de jetons

Cette épreuve de comparaisons s'effectue à partir de quantités analogiques discontinues : 2 collections de points noirs de 3 mm disposés aléatoirement, chacune attribuée à un enfant. La consigne est donnée lors de la présentation du premier item, avec l'image des bustes d'enfants (1 vs 4g) : « *Voici 2 enfants, un garçon et une fille ; on leur donne des bonbons : voici les bonbons du garçon et voici ceux de la fille* (en les montrant). *Peux-tu me montrer qui en a le plus en appuyant sur l'une des 2 touches blanches du clavier ? Appuie le plus vite possible sans te tromper* ». Les autres items sont ensuite présentés, correspondant à

une image du garçon et de la fille qui ont un nombre de jetons (bonbons) différent (voir annexe B page 74 pour une illustration).

- Comparaisons de surfaces rectangles

Comme pour l'épreuve précédente, les comparaisons s'effectuent sur des quantités analogiques discontinues. Cependant, cette épreuve bénéficie d'un contrôle de la surface : alors que la surface occupée augmentait parallèlement à l'augmentation du nombre de points pour les jetons, la surface occupée par l'ensemble des surfaces rectangles reste la même quelle que soit la quantité de surfaces rectangles. En effet, un même rectangle (longueur : 5 cm ; largeur : 3 cm) figure dans chaque cercle. Celui-ci est subdivisé en rectangles identiques entre eux, représentant des parts du gâteau. Ainsi, la surface, variable perceptive qui biaise les tâches de comparaisons de quantités selon certains auteurs, est ici contrôlée. La consigne est donnée en même temps que la présentation du premier item (1 vs 4g) : « *Voici 2 enfants, un garçon et une fille ; ils ont fait un gâteau d'anniversaire qu'ils vont pouvoir partager. Par exemple* (montrer le premier item d'exemple), *ici la fille a 8 parts et le garçon 3 parts. Je voudrais maintenant que tu me montres qui a le plus de parts en appuyant sur l'une des 2 touches blanches du clavier. Appuie le plus vite possible sans te tromper* ». Les autres items sont ensuite présentés, correspondant à une image du garçon et de la fille qui ont un nombre de surfaces rectangles (parts de gâteau) différent (voir annexe B page 74 pour une illustration).

- Comparaisons de numéraux verbaux

Cette épreuve met en jeu le système numérique symbolique verbal, la présentation des quantités à comparer s'effectue oralement. Une image de 2 enfants avec 2 cercles est toujours présente à l'écran (voir annexe B page 75 pour une illustration). Les quantités n'apparaissent pas visuellement dans chaque cercle mais l'enfant doit associer le premier nombre entendu à l'enfant de gauche et le deuxième à l'enfant de droite. La présentation des 2 quantités à comparer est séquentielle (temps de latence : 1000 ms), contrairement aux autres épreuves de comparaisons pour lesquelles elle est simultanée. Les nombres sont énoncés par une voix féminine pré-enregistrée et émise par l'ordinateur. Cependant, avant de commencer l'épreuve, 4 items supplémentaires d'exemple (8 vs 3 ; 2 vs 9 ; 3 vs 10 ; 3 vs 8) sont présentés par l'expérimentateur. En raison de la difficulté liée à l'aspect séquentiel et abstrait de cette épreuve, il est important de s'assurer de la compréhension de la consigne par l'enfant. L'expérimentateur énonce la consigne suivante pour les 2 premiers items d'exemple : « *Si je donne n bonbons au garçon* (le montrer) *et p bonbons à*

la fille (la montrer), *peux-tu me montrer qui en aura le plus ? Montre-moi le plus vite possible sans te tromper* ». Pour les 2 items d'exemple suivants, l'expérimentateur pointe seulement du doigt l'enfant auquel correspond le nombre qu'il énonce. Ensuite, l'épreuve peut commencer : présentation des 44 items enregistrés, en désignant l'enfant qui correspond au nombre entendu.

- Comparaisons de chiffres arabes

Cette épreuve évalue l'autre système symbolique : la représentation arabe des quantités. Deux chiffres arabes, inscrits dans chaque cercle, sont à comparer. La consigne est donnée en même temps que la présentation du premier item (1 vs 4g) : « *Voici toujours nos 2 enfants. Si je donne cette quantité de bonbons* (montrer le chiffre 1) *au garçon et cette quantité de bonbons* (montrer le chiffre 4) *à la fille, peux-tu me montrer qui en a le plus en appuyant sur l'une des 2 touches blanches du clavier ? Appuie le plus vite possible sans te tromper* ». Les autres items sont ensuite présentés, correspondant à une image du garçon et de la fille sous lesquels un chiffre arabe (correspondant à une quantité de bonbons) différent est inscrit (voir annexe B page 75 pour une illustration).

V.3. Analyse des résultats

Les 30 enfants de GSM obtiennent une moyenne de 98 % de réussite aux comparaisons de réglettes, les 31 enfants de CP retenus pour les analyses de groupes ont réussi cette épreuve à 99 %. Les performances se situant bien au-delà du hasard, les résultats de ces enfants peuvent être pris en compte pour l'ensemble des épreuves de comparaisons de quantités. Pour répondre à nos hypothèses nous analyserons les résultats de la manière suivante :

- analyse des données brutes des enfants de GSM et des enfants de CP ;
- étude des corrélations entre les épreuves, pour les enfants de GSM et ceux de CP ;
- étude des effets de rapport dans les résultats aux épreuves de comparaisons de quantités, pour les enfants de GSM et les enfants de CP ;
- étude des profils individuels, pour les enfants de GSM et les enfants de CP ;
- étude de cas (participant n°32 CP).

Des analyses de régression ont été conduites pour étudier comment les performances aux épreuves symboliques pouvaient être prédites par celles aux épreuves analogiques. Cependant, les résultats de ces analyses ne sont pas pertinents car nos effectifs sont peu appropriés à de tels traitements statistiques. L'étude s'en tiendra donc aux analyses précédemment citées.

VI. ANALYSES DESCRIPTIVES DES DONNÉES

VI.1. Résultats aux épreuves de caractéristiques cognitives en GSM

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart type
Énonciation de la chaîne verbale	16	20	19,87	0,73
Comptage / Dénombrement	3	5	3,97	0,81
Constitution de collections	3	5	4,6	0,62
Comptage en écriture arabe	5	20	14,23	5,49
Lignes numériques	0	2,5	0,58	0,7
Reconnaissance chiffres arabes	3	8	6	1,93
Langage / Vocabulaire	1	7	3,47	1,5

Tableau 3 : résultats des enfants de GSM aux épreuves de caractéristiques cognitives

La chaîne numérique verbale est bien connue par les enfants de GSM, seul un enfant n'atteint pas le maximum. Ils ont une utilisation relativement bonne de ce code verbal et des principes sous-jacents (principes de Gelman), puisque le comptage et la constitution de collections sont assez bien réussis. Les résultats à l'épreuve des lignes numériques sont globalement très faibles. Il existe de grosses différences de performances au niveau de l'écriture en chiffres arabes, beaucoup n'ont pas acquis le principe du système décimal : 11 élèves seulement écrivent correctement la suite jusqu'à 20. L'écart type est plus faible pour la lecture de chiffres, mais les différences subsistent, notamment pour la lecture des nombres à 2 chiffres. En effet, 12 enfants ne lisent pas correctement tous les nombres supérieurs à 10, ce qui suggère une difficulté d'accès au concept de la base 10. De plus, des fautes récurrentes apparaissent : plusieurs enfants (n°3, 7, 12 et 17) lisent « 23, 25, 28 » pour « 13, 15, 18 », d'autres (n°7, 9, 17 et 27) « 22 » pour « 20 ». Les résultats en langage se répartissent entre le minimum (1) et le maximum (7), 11 enfants obtiennent le score de 3 (moyenne faible).

Lors de l'écriture des chiffres arabes, l'inversion des formes des chiffres, appelée écriture en miroir, est fréquente. En effet, seulement 5 enfants (n°2, 11, 22, 29 et 30) écrivent correctement les chiffres, avec un d'entre eux (n°2) s'arrêtant à 6. Les chiffres 9, 5 et 6 sont les moins réussis, avec 13 ou 12 enfants qui inversent leur forme, alors que le 2 est bien produit par tous les participants. Ces résultats ne concordent pas avec les données de la littérature qui présentent les chiffres 1, 2, 3, 7 et 9 comme les plus touchés par l'écriture en miroir (Fisher, 2011) [25].

VI.2. Résultats aux épreuves de caractéristiques cognitives en CP

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart type
Énonciation de la chaîne verbale	15	20	19,84	0,9
Comptage / Dénombrement	2	5	4,23	0,85
Constitution de collections	4	5	4,81	0,4
Comptage en écriture arabe	11	20	18,97	2,73
Lignes numériques	0	4	0,89	1,1
Reconnaissance chiffres arabes	7	8	7,97	0,18
Langage / Vocabulaire	1	6	3,71	1,16

Tableau 4 : résultats des enfants de CP aux épreuves de caractéristiques cognitives

Les enfants de CP connaissent bien la chaîne numérique verbale, un seul enfant n'atteint pas le maximum, comme retrouvé en GSM. Ils effectuent également assez bien le comptage et la constitution de collections. Dans l'ensemble, les résultats aux lignes numériques ne sont pas satisfaisants. La plupart des enfants maîtrisent l'écriture des chiffres arabes, 26 élèves vont jusqu'à 20. Cependant, à cette épreuve la différence entre les performances est importante, avec 3 enfants s'arrêtant à 11. Cette différence n'est pas retrouvée au niveau de la lecture de chiffres, qui semble automatisée car réussie entièrement, à l'exception d'un enfant qui échoue un item : « 18 » lu « 28 » ; faute relevée plusieurs fois en GSM. En langage, les résultats se distribuent entre 1 et 6, avec 11 enfants obtenant le score de 4 (moyenne).

À l'épreuve d'écriture des chiffres arabes, l'inversion des formes des chiffres n'est pas très fréquente. En effet, seulement 5 enfants (n°8, 9, 11, 13 et 19) inversent la forme du 7 et un enfant (n°10) n'écrit pas correctement les chiffres 4, 5 et 6. De plus, ces erreurs sont aléatoires : les enfants qui produisent un chiffre dans le sens inverse, le produisent aussi dans le bon sens, suggérant des connaissances en cours d'acquisition et instables.

VI.3. Comparaisons des résultats aux épreuves de caractéristiques cognitives en GSM et en CP

La différence des moyennes d'âges des 2 groupes d'enfants est significative (GSM : 5 ans 8 ; CP : 6 ans 9 ; $t(59) = 11,24$; $p < 0,001$), donc nous pouvons comparer ces 2 échantillons. Au niveau de leurs résultats, les différences significatives s'observent aux épreuves mettant en jeu le code arabe : l'écriture ($t(59) = 4,29$; $p < 0,001$) et la lecture ($t(59) = 5,65$; $p < 0,001$) de chiffres arabes. Pour ces 2 épreuves, les résultats en CP sont significativement supérieurs à ceux en GSM. Lors de l'écriture des chiffres, l'inversion des formes est beaucoup plus rare en CP qu'en GSM, conformément aux données de la littérature qui situent l'écriture en miroir vers 5-6 ans. Les 2 groupes ne se distinguent pas

significativement au niveau des autres résultats : les épreuves sous-tendant le code verbal sont assez bien réussies, contrairement aux lignes numériques auxquelles les performances sont très faibles. De plus, les résultats des enfants de GSM et de CP se répartissent de façon homogène autour de la moyenne à l'épreuve de langage, notre échantillon représentant bien les enfants tout-venant.

VI.4. Analyse clinique de l'épreuve des lignes numériques en GSM et en CP

Pour les 2 groupes, les moyennes sont très faibles à l'épreuve des lignes numériques. Pour situer les chiffres, plusieurs enfants comptent en posant leur doigt à intervalles aléatoires sur la ligne, à partir du 0. Toutefois, certains tiennent compte du 10 quand ils placent les plus grands chiffres. Ceux-là semblent avoir établi un lien entre les numéraux verbaux et la quantité qu'ils représentent, même si ce lien n'est pas encore assez précis. Cette stratégie est observée chez 12 enfants de GSM et 24 enfants de CP, les autres ne tiennent compte que du 0 pour placer tous les chiffres, suggérant un lien encore très flou entre le symbolique (les chiffres) et l'analogique (représenté par la ligne numérique). D'autres stratégies immatures sont observées chez des enfants de GSM : certains alignent les 3 chiffres sur chaque feuille, d'autres les placent aléatoirement. De plus, nous observons des incohérences pour 16 enfants de GSM et 3 enfants de CP : sur une même feuille, un chiffre plus grand qu'un autre est placé au même niveau ou plus près du 0 que le chiffre plus petit. En outre, les scores ne reflètent pas toujours le niveau réel de l'enfant. Certains n'obtiennent pas de point en effectuant un placement cohérent et en rapprochant les plus grands chiffres du 10, alors que d'autres ont un score supérieur avec un placement pas toujours cohérent, aléatoire, ou encore avec tous les chiffres placés près du 0. Cela témoigne d'une part de hasard dans la cotation de cette épreuve et conforte l'importance d'une analyse qualitative des performances. En effet, celle-ci permet de montrer une amélioration conséquente, entre GSM et CP, de la façon dont les enfants se représentent les quantités présentées symboliquement, par rapport à une ligne numérique. Globalement, les enfants de CP réalisent le placement des chiffres avec moins d'incohérences, en suivant davantage une logique, et se repèrent plus au 10 pour le placement des plus grands chiffres. Bien que la moyenne obtenue à cette épreuve par les enfants de CP soit très peu supérieure à celle des enfants de GSM, le lien analogique / symbolique se précise.

VI.5. Analyses des résultats aux comparaisons de quantités en GSM

GSM	Moyenne BR	Écart type BR	Moyenne TR	Écart type TR
Cercles	0,93	0,07	1124	271
Jetons	0,91	0,08	1802	423
Surfaces	0,87	0,08	2102	621
Verbal	0,88	0,07	1321	381
Arabe	0,88	0,08	1847	455

Tableau 5 : moyennes et écarts types des pourcentages de BR et des TR pour les enfants de GSM en fonction des tâches de comparaisons

En termes de réussite, la meilleure moyenne des enfants de GSM est obtenue à l'épreuve de comparaisons de cercles, même si la différence n'est significative que par rapport aux comparaisons de surfaces ($t(29) = 4,22$; $p < 0,001$), de numéraux verbaux ($t(29) = 3,28$; $p < 0,004$) et de chiffres arabes ($t(29) = 3,01$; $p < 0,006$). La différence est seulement tendancielle avec les jetons ($t(29) = 1,82$; $p < 0,08$). De plus, les comparaisons de jetons sont significativement mieux effectuées que les comparaisons de surfaces ($t(29) = 3,07$; $p < 0,006$), comme attendu avec le contrôle de la surface occasionnant une difficulté.

De la même façon que pour la réussite, la meilleure moyenne des enfants de GSM en vitesse de réponse est obtenue à l'épreuve de comparaisons de cercles, où les réponses sont les plus rapides. Cette fois la différence est significative avec toutes les autres modalités : les jetons ($t(29) = 10,69$; $p < 0,001$), les surfaces ($t(29) = 9,26$; $p < 0,001$), les numéraux verbaux ($t(29) = 2,98$; $p < 0,007$) et les chiffres arabes ($t(29) = 11,08$; $p < 0,001$). Les TR sont significativement plus lents pour les surfaces que pour les jetons ($t(29) = 5,27$; $p < 0,001$) et les chiffres arabes ($t(29) = 3,56$; $p < 0,002$). Les comparaisons verbales ont été effectuées significativement plus vite que celles des jetons ($t(29) = 7,50$; $p < 0,001$), des surfaces ($t(29) = 8,84$; $p < 0,001$) et des chiffres arabes ($t(29) = 7,49$; $p < 0,001$). Néanmoins, ce résultat est à nuancer du fait de la présentation séquentielle des quantités dans les comparaisons verbales. En effet, le TR mesuré débute à la présentation de la 2^{e} quantité, la 1ère a donc déjà pu être traitée par l'enfant, contrairement aux autres épreuves.

VI.6. Analyses des résultats aux comparaisons de quantités en CP

CP	Moyenne BR	Écart type BR	Moyenne TR	Écart type TR
Cercles	0,95	0,07	995	167
Jetons	0,92	0,05	1507	347
Surfaces	0,89	0,08	1827	466
Verbal	0,92	0,06	1016	565
Arabe	0,91	0,05	1444	347

Tableau 6 : moyennes et écarts types des pourcentages de BR et des TR pour les enfants de CP en fonction des tâches de comparaisons

Les comparaisons de cercles sont significativement les mieux réussies par les enfants de CP, par rapport à toutes les autres modalités : les jetons (t (30) = 4,23 ; $p < 0,001$), les surfaces (t (30) = 3,62 ; $p < 0,002$), les numéraux verbaux (t (30) = 2,40 ; $p < 0,03$) et les chiffres arabes (t (30) = 3,54 ; $p < 0,002$). Ils obtiennent des résultats significativement meilleurs avec les numéraux verbaux qu'avec les surfaces (t (30) = 2,34 ; $p < 0,03$). Les comparaisons de jetons ne sont que tendanciellement mieux réussies que les comparaisons de surfaces (t (30) = 2,02 ; $p < 0,06$).

Les comparaisons de cercles sont également celles effectuées le plus rapidement : la différence est significative avec les jetons (t (30) = 10,81 ; $p < 0,001$), les surfaces (t (30) = 11,44 ; $p < 0,001$) et les chiffres arabes (t (30) = 8,88 ; $p < 0,001$). Cependant, cette différence n'est pas significative avec les comparaisons verbales, qui sont, elles aussi, effectuées significativement plus vite que celles de jetons (t (30) = 5,72 ; $p < 0,001$), de surfaces (t (30) = 9,64 ; $p < 0,001$) et de chiffres arabes (t (30) = 6,57 ; $p < 0,001$). Les comparaisons de surfaces sont celles qui demandent le plus de temps, cette différence est significative avec toutes les autres modalités : les cercles (t (30) = 11,44 ; $p < 0,001$), les jetons (t (30) = 5,07 ; $p < 0,001$), les numéraux verbaux (t (30) = 9,64 ; $p < 0,001$) et les chiffres arabes (t (30) = 5,42 ; $p < 0,001$).

VI.7. Comparaison des résultats aux épreuves de comparaisons en GSM et en CP

En ce qui concerne les BR, la seule différence significative entre les 2 groupes de participants s'observe à l'épreuve de comparaisons de numéraux verbaux : les enfants de CP sont significativement meilleurs que les enfants de GSM (t (59) = 2,64 ; $p < 0,02$). Les autres épreuves sont également mieux réussies par les enfants de CP, mais la différence de performance par rapport aux enfants de GSM reste minime. De plus, la différence tendancielle observée entre les cercles et les jetons pour les enfants de GSM est significative pour ceux de CP. Inversement, la différence significative entre les jetons et les

surfaces qu'il existe en GSM est seulement tendancielle en CP. Enfin, les comparaisons de numéraux verbaux sont significativement mieux réussies que les comparaisons de surfaces pour les enfants de CP seulement.

Au niveau des TR, les enfants de CP sont plus rapides que ceux de GSM à toutes les épreuves de comparaisons. Cette différence est significative pour les cercles ($t(59) = 2,24$; $p < 0,03$), les jetons ($t(59) = 2,99$; $p < 0,005$), les numéraux verbaux ($t(59) = 2,46$; $p < 0,02$) et les chiffres arabes ($t(59) = 2,46$; $p < 0,02$). La plus grande rapidité des enfants de CP par rapport à ceux de GSM reste tendancielle pour les surfaces ($t(59) = 1,96$; $p < 0,06$). De plus, le profil des TR reste le même en GSM et en CP, seule la différence significative qu'il existe entre les cercles et les numéraux verbaux en GSM ne l'est pas en CP : les comparaisons de cercles sont les plus rapides, suivies des comparaisons verbales, viennent ensuite les comparaisons de chiffres arabes et de jetons dont la différence de TR n'est pas significative, enfin les comparaisons de surfaces sont les plus lentes.

En outre, l'épreuve de comparaisons de cercles est la mieux réussie et la plus rapide, que ce soit en GSM ou en CP. À l'inverse, les comparaisons de surfaces sont celles effectuées avec le plus d'erreurs et le plus lentement pour les 2 groupes de participants.

VII. ANALYSES STATISTIQUES DES DONNÉES

VII.1. Analyses de corrélations

VII.1.1. Corrélations entre les données des enfants de GSM, au niveau des BR

	Age	Sexe	Chaîne verbale	Compt.	Collect.	Ecriture chiffres	Lignes num.	Lecture chiffres	Langage	Cercles	Jetons	Surf. rect.	Verbal	Arabe
Age	1													
Sexe	0,23	1												
Chverb	0,048	-0,199	1											
Compt.	0,129	-0,045	0,226	1										
Collect.	0,003	0,066	**0,486****	0,316	1									
Ecriture	0,267	**-0,375***	0,18	0,212	0,079	1								
Lignes	-0,083	-0,309	-0,249	-0,026	-0,199	0,135	1							
Lecture	0,153	**-0,528****	0,196	0,221	0,259	**0,726****	0,039	1						
Langage	-0,013	-0,115	0,059	0,212	-0,052	-0,018	0,11	0,024	1					
Cercles	-0,002	-0,026	-0,034	-0,148	0,041	0,111	**0,399***	0,154	0,189	1				
Jetons	0,12	0,114	**0,594****	-0,006	**0,410***	0,027	0,045	0,026	0,19	**0,372***	1			
Surf.	-0,029	0,033	**0,573****	-0,01	0,141	0,015	0,192	-0,033	0,153	**0,379***	**0,661****	1		
Verbal	-0,134	-0,138	0,044	0,256	0,292	0,034	0,002	0,176	0,341	0,055	0,056	0,079	1	
Arabe	0,071	-0,13	0,286	0,288	0,265	0,225	0,08	0,298	**0,436***	0,196	**0,427***	0,262	0,284	1

Tableau 7 : corrélations entre (I) les épreuves de caractéristiques cognitives (en blanc) et (II) les épreuves de comparaisons (en grisé) pour les BR des enfants de GSM

Deux corrélations sont liées à la variable sexe (notation : garçon = - 1 ; fille = 1). Elles concernent le code arabe : les garçons sont significativement meilleurs que les filles pour la lecture ($r = - 0,53$; $p < 0,004$) et l'écriture de chiffres arabes ($r = - 0,38$; $p < 0,05$).

En ce qui concerne les épreuves de caractéristiques cognitives, 2 corrélations sont significatives : l'une se rapporte aux 2 épreuves mettant en jeu le code arabe (lecture et écriture) ($r = 0,73$; $p < 0,001$), et l'autre concerne le code verbal (chaîne verbale et constitution de collections) ($r = 0,49$; $p < 0,01$). La troisième épreuve s'intéressant au code verbal (comptage) n'est cependant pas corrélée aux 2 autres.

Au niveau des corrélations entre les épreuves de comparaisons, les 3 tâches impliquant le code analogique sont corrélées entre elles, ce qui témoigne leur caractère commun : les cercles et les jetons ($r = 0,372$; $p < 0,05$) ; les cercles et les surfaces ($r = 0,379$; $p < 0,04$) ; les jetons et les surfaces ($r = 0,661$; $p < 0,001$). Une autre corrélation est notée, entre les comparaisons de jetons et celles de chiffres arabes ($r = 0,427$; $p < 0,02$).

Par rapport à l'ensemble des tâches, la connaissance de la chaîne verbale est corrélée à la réussite à 2 épreuves de comparaisons de quantités analogiques : les jetons ($r = 0,594$; $p < 0,002$) et les surfaces ($r = 0,573$; $p < 0,002$). Les comparaisons de jetons sont également corrélées à la constitution de collections ($r = 0,41$; $p < 0,03$). Une corrélation est notée entre l'épreuve des lignes numériques et celle des comparaisons de cercles ($r = 0,399$; $p < 0,03$). De plus, les enfants qui ont les meilleures performances en langage sont ceux qui réussissent le mieux les comparaisons de chiffres arabes ($r = 0,436$; $p < 0,02$).

VII.1.2. Corrélations entre les données des enfants de GSM, au niveau des TR

	Age	Sexe	Chaîne verbale	Compt.	Collect.	Ecriture chiffres	Lignes num.	Lecture chiffres	Langage	Cercles	Jetons	Surf. rect.	Verbal	Arabe
Age	1													
Sexe	0,23	1												
Chverb	0,048	-0,199	1											
Compt.	0,129	-0,045	0,226	1										
Collect.	0,003	0,066	**0,486****	0,316	1									
Ecriture	0,267	**-0,375***	0,18	0,212	0,079	1								
Lignes	-0,083	-0,309	-0,249	-0,026	-0,199	0,135	1							
Lecture	0,153	**-0,528****	0,196	0,221	0,259	**0,726****	0,039	1						
Langage	-0,013	-0,115	0,059	0,212	-0,052	-0,018	0,11	0,024	1					
Cercles	-0,186	0,02	**-0,484****	-0,216	-0,343	-0,309	0,209	-0,209	-0,218	1				
Jetons	**-0,366***	-0,129	0,14	-0,092	-0,107	-0,257	0,139	-0,259	-0,058	**0,573****	1			
Surf.	-0,251	-0,112	0,17	-0,129	-0,023	-0,125	0,055	-0,113	-0,089	**0,368***	**0,890****	1		
Verbal	-0,196	-0,032	0,016	-0,185	-0,101	-0,164	-0,103	-0,344	-0,275	**0,421***	**0,622****	**0,627****	1	
Arabe	-0,266	-0,057	0,086	-0,193	-0,123	-0,351	0,012	-0,344	-0,125	**0,617****	**0,876****	**0,792****	**0,589****	1

Tableau 8 : corrélations entre (I) les épreuves de caractéristiques cognitives (en blanc) et (II) les épreuves de comparaisons (en grisé) pour les TR des enfants de GSM

Au niveau des temps de réponse, l'ensemble des épreuves de comparaisons de quantités est corrélé : les enfants les plus rapides pour une épreuve le sont aussi pour les autres.

Une corrélation est liée à la variable âge : les enfants les plus âgés sont ceux qui effectuent le plus rapidement les comparaisons de jetons ($r = -0,366$; $p < 0,05$), conformément au gain de rapidité avec l'âge. De plus, la seule corrélation entre les caractéristiques cognitives et les TR aux comparaisons concerne la chaîne verbale et les comparaisons de cercles ($r = -0,484$; $p < 0,008$) : les plus rapides sont ceux qui connaissent le mieux la chaîne verbale.

VII.1.3. Corrélations entre les données des enfants de CP, au niveau des BR

	Age	Sexe	Chaîne verbale	Compt.	Collect.	Ecriture chiffres	Lignes num.	Lecture chiffres	Langage	Cercles	Jetons	Surf. rect.	Verbal	Arabe
Age	1													
Sexe	-0,001	1												
Chverb	0,186	0,145	1											
Compt.	0,187	-0,136	0,269	1										
Collect.	0,326	**0,389***	**0,373***	0,035	1									
Ecriture	0,041	-0,139	0,134	-0,011	-0,097	1								
Lignes	-0,277	-0,162	-0,019	-0,187	-0,126	0,071	1							
Lecture	0,186	0,145	**1,000****	0,269	**0,373***	0,134	-0,019	1						
Langage	**-0,468****	0,144	0,273	0,035	0,018	0,134	0,326	0,273	1					
Cercles	0,096	0,165	0,024	**0,375***	0,064	-0,234	0,062	0,024	0,252	1				
Jetons	0,205	0,238	0,003	0,29	**0,452***	-0,124	0,164	0,003	0,127	**0,733****	1			
Surf.	0,231	0,145	**0,465****	0,071	**0,565****	-0,013	0,125	**0,465****	0,185	0,091	0,3	1		
Verbal	0,165	0,156	0,098	0,195	0,222	0,053	0,244	0,098	0,301	0,237	**0,358***	**0,457****	1	
Arabe	0,132	-0,194	0,261	**0,461****	-0,014	0,202	0,002	0,261	0,008	0,265	0,196	0,161	0,285	1

Tableau 9 : corrélations entre (I) les épreuves de caractéristiques cognitives (en blanc) et (II) les épreuves de comparaisons (en grisé) pour les BR des enfants de CP

Pour les CP, une corrélation est également liée à la variable sexe. Cette fois, elle concerne la capacité à constituer des collections ($r = 0,39$; $p < 0,04$), pour laquelle les filles sont significativement meilleures que les garçons.

Une corrélation négative apparaît entre l'âge et le langage ($r = - 0,47$; $p < 0,009$) : les enfants les plus âgés sont ceux qui ont les moins bons résultats à l'épreuve du langage. Mais la cotation à cette épreuve s'effectue en fonction de l'âge, donc cela ne signifie pas que les enfants plus âgés ont un niveau de langage inférieur à celui des enfants plus jeunes.

Au niveau des caractéristiques cognitives, on retrouve une corrélation, également présente chez les enfants de GSM, entre la connaissance de la chaîne verbale et la capacité à constituer des collections ($r = 0,37$; $p < 0,04$). La corrélation entre les épreuves arabes n'apparaît pas mais la lecture des chiffres arabes est corrélée à 2 épreuves mettant en jeu le code verbal : la chaîne verbale ($r = 1$; $p < 0,0001$) et les collections ($r = 0,37$; $p < 0,04$).

Contrairement aux résultats des enfants de GSM, les performances des enfants de CP aux comparaisons de quantités analogiques ne sont pas toutes corrélées, seules celles aux cercles et aux jetons le sont ($r = 0,73$; $p < 0,001$). Les comparaisons de numéraux verbaux sont corrélées à 2 épreuves de comparaisons de quantités analogiques : les jetons ($r = 0,36$; $p < 0,049$) et les surfaces ($r = 0,46$; $p < 0,02$).

De même qu'en GSM, en CP la connaissance de la chaîne verbale est corrélée aux comparaisons de surfaces ($r = 0,47$; $p < 0,009$), et la capacité à constituer des collections est corrélée aux comparaisons de jetons ($r = 0,45$; $p < 0,02$). De plus, la capacité de comptage est corrélée aux comparaisons de chiffres arabes ($r = 0,46$; $p < 0,01$) et de cercles ($r = 0,38$; $p < 0,04$). Les comparaisons de surfaces sont corrélées à 3 épreuves de caractéristiques cognitives : la chaîne verbale ($r = 0,47$; $p < 0,009$), la constitution de collections ($r = 0,57$; $p < 0,002$) et la lecture des chiffres arabes ($r = 0,47$; $p < 0,009$).

VII.1.4. Corrélations entre les données des enfants de CP, au niveau des TR

	Age	Sexe	Chaîne verbale	Compt.	Collect.	Ecriture chiffres	Lignes num.	Lecture chiffres	Langage	Cercles	Jetons	Surf. rect.	Verbal	Arabe
Age	1													
Sexe	-0,001	1												
Chverb	0,186	0,145	1											
Compt.	0,187	-0,136	0,269	1										
Collect.	0,326	**0,389***	**0,373***	0,035	1									
Ecriture	0,041	-0,139	0,134	-0,011	-0,097	1								
Lignes	-0,277	-0,162	-0,019	-0,187	-0,126	0,071	1							
Lecture	0,186	0,145	**1,000****	0,269	**0,373***	0,134	-0,019	1						
Langage	**-0,468****	0,144	0,273	0,035	0,018	0,134	0,326	0,273	1					
Cercles	-0,225	0,279	0,048	-0,049	-0,017	-0,076	-0,23	0,048	**0,379***	1				
Jetons	-0,181	0,124	0,115	-0,015	0,203	-0,133	-0,229	0,115	0,346	**0,680****	1			
Surf.	0,028	0,118	0,104	-0,24	0,264	0,228	**-0,441***	0,104	0,158	**0,521****	**0,663****	1		
Verbal	-0,128	0,268	-0,139	**-0,473****	0,177	0,054	-0,129	-0,139	0,015	**0,543****	**0,539****	**0,602****	1	
Arabe	-0,197	0,231	-0,091	-0,264	0,112	0,014	-0,266	-0,091	0,054	**0,598****	**0,493****	**0,564****	**0,786****	1

Tableau 10 : corrélations entre (I) les épreuves de caractéristiques cognitives (en blanc) et (II) les épreuves de comparaisons (en grisé) pour les TR des enfants de CP

Comme pour les enfants de GSM, les temps de réponse sont corrélés sur l'ensemble des épreuves de comparaisons de quantités pour les enfants de CP.

Par rapport aux corrélations entre les caractéristiques cognitives et les TR aux épreuves de comparaisons, nous observons une corrélation dans le domaine verbal : les meilleurs en comptage sont les plus rapides pour les comparaisons de numéraux verbaux ($r = - 0,473$; $p < 0,008$). Une corrélation concerne le langage et les TR aux comparaisons de cercles ($r = 0,379$; $p < 0,04$) : les plus lents sont ceux qui ont un meilleur niveau de langage. Enfin, les plus rapides aux comparaisons de surfaces sont ceux qui placent le mieux les nombres sur la ligne numérique ($r = - 0,441$; $p < 0,02$).

VII.2. Analyses de l'effet de rapport

L'effet de rapport correspond à une synthèse de l'effet de distance entre les quantités à comparer et l'effet de taille de ces quantités. Sa présence dans les tâches symboliques signe la mise en relation automatique des codes symboliques avec la représentation analogique. Pour étudier l'effet de rapport, nous avons effectué une analyse de variance ANOVA à 3 facteurs (qui correspondent aux 3 rapports : 1/2, 2/3, 3/4) avec mesures répétées.

VII.2.1. Effet de rapport dans l'exactitude des réponses des enfants de GSM

	Cercles		Jetons		Surfaces		Verbal		Arabe	
Rapports	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET
1/2	0,95	0,12	0,97	0,05	0,96	0,08	0,94	0,17	0,95	0,07
2/3	0,93	0,06	0,91	0,1	0,86	0,13	0,84	0,17	0,81	0,13
3/4	0,92	0,07	0,84	0,15	0,79	0,1	0,85	0,15	0,88	0,13

Tableau 11 : moyennes et écarts types des pourcentages des BR des enfants de GSM en fonction des tâches et des rapports

Il existe un effet de rapport pour les comparaisons de jetons ($F (2,58) = 17,51$; $CME = 0,008$; $p < 0,001$), de surfaces ($F (2,58) = 23,81$; $CME = 0,01$; $p < 0,001$), de numéraux verbaux ($F (2,58) = 9,97$; $CME = 0,01$; $p < 0,001$) et de chiffres arabes ($F (2,58) = 16,27$; $CME = 0,009$; $p < 0,001$). L'effet de rapport n'apparaît pas pour les comparaisons de cercles ($F (2,58) = 1,31$; ns), la variabilité entre les différents rapports étant trop faible.

Pour les 2 tâches analogiques (jetons et surfaces), l'effet de rapport correspond à ce qui était attendu, les BR diminuant régulièrement quand le rapport se rapproche de 1 : 1/2 > 2/3 > 3/4. En effet, le rapport 1/2 est significativement mieux réussi que les rapports 2/3 (jetons : $t (29) = 3,89$; $p < 0,002$; surfaces : $t (29) = 4,68$; $p < 0,001$) et 3/4 (jetons : $t (29) = 5,24$; $p < 0,001$; surfaces : $t (29) = 6,98$; $p < 0,001$) ; le rapport 2/3 est

significativement mieux réussi que le rapport 3/4 (jetons : t (29) = 2,77 ; p < 0,02 ; surfaces : t (29) = 2,63 ; p < 0,02).

Concernant les comparaisons de quantités symboliques (numéraux verbaux et chiffres arabes), l'effet de rapport n'a pas le profil relevé aux épreuves analogiques : 1/2 > 3/4 > 2/3. Le rapport 1/2 est significativement mieux réussi que les rapports 2/3 (verbal : t (29) = 3,65 ; p < 0,002 ; arabe : t (29) = 6,02 ; p < 0,001) et 3/4 (verbal : t (29) = 3,75 ; p < 0,002 ; arabe : t (29) = 2,53 ; p < 0,001). Les performances sont significativement meilleures avec le rapport 3/4 qu'avec le rapport 2/3 (t (29) = - 3,07 ; p < 0,006) pour les comparaisons arabes, mais cette différence n'est pas significative à l'épreuve des comparaisons verbales.

VII.2.2. Effet de rapport dans les temps de réponse des enfants de GSM

	Cercles		Jetons		Surfaces		Verbal		Arabe	
Rapports	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET
1/2	1009	276	1523	430	1762	473	1170	428	1641	395
2/3	1219	288	1902	503	2021	513	1345	381	2024	573
3/4	1146	294	2021	512	2587	1119	1458	466	1907	523

Tableau 12 : moyennes et écarts types des TR des enfants de GSM en fonction des tâches et des rapports

Au niveau des temps de réponse, l'effet de rapport est présent pour toutes les épreuves de comparaisons de quantités : les cercles (F (2,58) = 29,79 ; CME = 11462 ; p < 0,001), les jetons (F (2,58) = 26,99 ; CME = 75081 ; p < 0,001), les surfaces (F (2,58) = 19,56 ; CME = 273022 ; p < 0,001), les numéraux verbaux (F (2,58) = 10,49 ; CME = 60079 ; p < 0,001) et les chiffres arabes (F (2,58) = 20,15 ; CME = 57454 ; p < 0,001).

Cet effet de rapport correspond à ce qui était attendu (1/2 < 2/3 < 3/4) pour les comparaisons de jetons, de surfaces et de numéraux verbaux. En effet, les réponses pour le rapport 1/2 sont significativement plus rapides que celles pour les rapports 2/3 (jetons : t (29) = - 5,53 ; p < 0,001 ; surfaces : t (29) = - 4,16 ; p < 0,001 ; verbal : t (29) = - 2,78 ; p < 0,01) et 3/4 (jetons : t (29) = - 6,08 ; p < 0,001 ; surfaces : t (29) = - 4,71 ; p < 0,001 ; verbal : t (29) = -4,57 ; p < 0,001). Le rapport 2/3 est significativement plus rapide que le rapport 3/4 pour les comparaisons de surfaces (t (29) = 4,01 ; p < 0,001). Cette différence est seulement tendancielle pour les comparaisons de jetons (t (29) = - 1,97 ; p < 0,06) et de numéraux verbaux (t (29) = - 1,59 ; p < 0,09).

Comme pour les BR, l'effet de rapport dans les TR aux comparaisons arabes n'a pas le même profil que celui relevé pour les jetons et les surfaces, mais a le profil suivant : 1/2 < 3/4 < 2/3. Ce pattern apparaît aussi pour l'effet de rapport dans les TR aux comparaisons de cercles. Les réponses pour le rapport 1/2 sont significativement plus rapides que celles

pour les rapports 2/3 (cercles : t (29) = - 7,52 ; p < 0,001 ; chiffres arabes : t (29) = - 5,73 ; p < 0,001) et 3/4 (cercles : t (29) = - 6,39 ; p < 0,001 ; chiffres arabes : t (29) = - 5,27 ; p < 0,001). Mais les réponses pour le rapport 3/4 sont effectuées significativement plus rapidement que celles pour le rapport 2/3 aux comparaisons de cercles (t (29) = 2,67 ; p < 0,04). Cette différence est seulement tendancielle avec les comparaisons de chiffres arabes (t (29) = 1,76 ; p < 0,09).

VII.2.3. Effet de rapport dans l'exactitude des réponses des enfants de CP

	Cercles		Jetons		Surfaces		Verbal		Arabe	
Rapports	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET
1/2	0,97	0,08	0,97	0,07	0,97	0,07	0,95	0,06	0,97	0,05
2/3	0,94	0,07	0,94	0,06	0,9	0,08	0,89	0,11	0,88	0,08
3/4	0,95	0,1	0,85	0,1	0,8	0,16	0,91	0,09	0,87	0,09

Tableau 13 : moyennes et écarts types des pourcentages des BR des enfants de CP en fonction des tâches et des rapports

Comme pour les enfants de GSM, les résultats des enfants de CP présentent un effet de rapport significatif dans les épreuves de comparaisons de jetons (F (2,60) = 21,48 ; CME = 0,005 ; p < 0,001), de surfaces (F (2,60) = 22,36 ; CME = 0,009 ; p < 0,001), de numéraux verbaux (F (2,60) = 4,05 ; CME = 0,007 ; p < 0,03) et de chiffres arabes (F (2,58) = 16,27 ; CME = 0,009 ; p < 0,001). Cet effet de rapport n'est que tendanciel dans les comparaisons de cercles (F (2,60) = 2,93 ; CME = 0,003 ; p < 0,07).

L'effet de rapport correspond à ce qui était attendu pour les comparaisons de jetons, de surfaces et de chiffres arabes : 1/2 > 2/3 > 3/4. Le rapport 1/2 est significativement mieux réussi que les rapports 2/3 (jetons : t (30) = 2,34 ; p < 0,03 ; surfaces : t (30) = 3,76 ; p < 0,002 ; arabe : t (30) = 6,24 ; p < 0,001) et 3/4 (jetons : t (30) = 5,92 ; p < 0,001 ; surfaces : t (30) = 6,29 ; p < 0,001 ; arabe : t (5,95) = 2,53 ; p < 0,001). Le rapport 2/3 est significativement mieux réussi que le rapport 3/4 (jetons : t (30) = 4,03 ; p < 0,001 ; surfaces : t (30) = 3,40 ; p < 0,003), sauf pour les comparaisons arabes où la différence n'est pas significative.

Comme constaté en GSM, l'effet de rapport dans les résultats des enfants de CP aux comparaisons de numéraux verbaux n'a pas le même profil que celui retrouvé pour les jetons et les surfaces : 1/2 > 3/4 > 2/3. Le rapport 1/2 est mieux réussi que les rapports 2/3 et 3/4, significativement avec le rapport 2/3 (t (30) = 2,51 ; p < 0,02) et tendanciellement avec le rapport 3/4 (t (30) = 1,99 ; p < 0,06). La différence entre les performances avec les rapports 3/4 et 2/3 n'est pas significative pour les enfants de CP, comme en GSM. L'effet

de rapport dans les comparaisons de cercles suit le même profil, mais seul le rapport 1/2 est significativement mieux réussi que le rapport 2/3 (t (30) = 2,35 ; p < 0,03).

VII.2.4. Effet de rapport dans les temps de réponse des enfants de CP

	Cercles		Jetons		Surfaces		Verbal		Arabe	
Rapports	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET	moy	ET
1/2	892	148	1244	292	1435	315	928	577	1319	403
2/3	1077	197	1581	531	1787	447	975	553	1490	345
3/4	1020	212	1718	512	2345	845	1146	677	1531	364

Tableau 14 : moyennes et écarts types des TR des enfants de CP en fonction des tâches et des rapports

Au niveau des temps de réponse des enfants de CP, l'effet de rapport est présent dans toutes les épreuves de comparaisons de quantités, comme en GSM : les cercles (F (2,60) = 26,02 ; CME = 10670 ; p < 0,001), les jetons (F (2,60) = 13,83 ; CME = 133488 ; p < 0,001), les surfaces (F (2,60) = 41,40 ; CME = 157473 ; p < 0,001), les numéraux verbaux (F (2,60) = 5,76 ; CME = 71017 ; p < 0,006) et les chiffres arabes (F (2,60) = 14,20 ; CME = 27553 ; p < 0,001).

L'effet de rapport correspond à ce qui était attendu pour les épreuves de comparaisons de jetons, de surfaces et de chiffres arabes : 1/2 < 2/3 < 3/4. Les réponses pour le rapport 1/2 sont effectuées significativement plus vite que celles pour les rapports 2/3 (jetons : t (30) = - 3,98 ; p < 0,001 ; surfaces : t (30) = - 5,44 ; p < 0,001 ; chiffres arabes : t (30) = - 3,64 ; p < 0,002) et 3/4 (jetons : t (30) = - 6,46 ; p < 0,001 ; surfaces : t (30) = - 7,31 ; p < 0,001 ; chiffres arabes : t (30) = - 4,72 ; p < 0,001). Le rapport 2/3 est significativement plus rapide que le rapport 3/4 avec les comparaisons de surfaces (t (30) = - 5,36 ; p < 0,001) mais pas avec celles de jetons (t (30) = - 1,19 ; ns) et de chiffres arabes (t (30) = - 1,23 ; ns). L'effet de rapport dans les TR aux comparaisons verbales montre le même pattern : 1/2 < 2/3 < 3/4 ; le rapport 3/4 étant significativement plus lent que les rapports 1/2 (t (30) = - 3,67 ; p < 0,002) et 2/3 (t (30) = - 2,37 ; p < 0,03), mais la différence entre les rapports 1/2 et 2/3 n'est pas significative (t (30) = - 0,67 ; ns).

Comme constaté avec les TR des comparaisons de cercles en GSM, l'effet de rapport ne correspond pas au profil attendu pour les TR des enfants de CP : 1/2 < 3/4 < 2/3. Comme attendu, le rapport 1/2 est significativement plus rapide que les rapports 2/3 (t (30) = - 7,25 ; p < 0,001) et 3/4 (t (30) = - 5,12 ; p < 0,001). Cependant, les TR pour le rapport 3/4 sont tendanciellement plus rapides que ceux pour le rapport 2/3 (t (30) = 2,02 ; p < 0,06).

VIII. ANALYSE DES PROFILS INDIVIDUELS

L'analyse des profils individuels permet d'observer si ces profils sont cohérents par rapport à certaines de nos hypothèses : les performances aux épreuves symboliques dépendraient de celles aux épreuves analogiques, l'analogique serait supérieur au symbolique, avec des résultats meilleurs aux comparaisons analogiques lorsque la surface n'est pas contrôlée, et des résultats avec le code verbal supérieurs à ceux relatifs au code arabe. Cette analyse permet également de comparer les profils de réussite aux comparaisons de quantités par rapport aux résultats obtenus dans les épreuves de caractéristiques cognitives.

Pour établir les profils individuels, nous prenons en compte les BR de chaque participant à chaque épreuve de comparaisons (36 items par épreuve). Nous considérons que l'enfant réussit l'épreuve lorsqu'il obtient au minimum 75 % de BR (27 items réussis sur 36) et alors nous notons « 1 » dans le tableau. Si les performances à l'épreuve sont inférieures à ce seuil de 75 % de BR, nous notons « 0 ». Ces profils ont également été établis pour chaque rapport au sein des 5 épreuves de comparaisons, afin d'observer les variations de réussite selon les rapports et de mieux déceler certaines difficultés rencontrées par les enfants. Cette fois encore, la réussite correspond à un minimum de 75 % de BR (9 items réussis sur 12) pour chaque rapport.

VIII.1. Profils des réussites des enfants de GSM aux épreuves de comparaisons

GSM	Caractéristiques cognitives							Comparaisons				
Id	Chaîne verbale	Compt.	Collect.	Ecriture chiffres	Lignes num.	Lecture chiffres	Langage	Cercles	Jetons	Surf. rect.	Verbal	Arabe
1	20	5	5	20	1,5	8	3	1	1	1	1	1
2	20	5	5	6	0	3	4	1	1	1	1	1
3	20	4	5	7	0	4	1	1	1	1	1	1
4	20	3	5	11	0	8	5	1	1	1	1	1
5	20	4	5	19	1	7	3	1	1	1	1	1
6	20	4	4	6	1	3	6	1	1	1	1	1
7	20	4	5	11	0	4	5	1	1	1	1	1
8	20	5	4	20	1,5	5	7	1	1	1	1	1
9	20	4	3	9	0,5	4	2	1	1	1	1	0
10	20	4	5	19	0	6	2	1	1	1	1	1
11	20	3	4	20	0	8	2	1	1	1	1	1
12	20	4	5	9	0,5	4	3	1	1	1	1	0
13	20	3	4	20	0,5	8	3	1	1	1	1	1
14	20	3	4	11	0,5	7	4	1	1	1	1	1
15	20	3	5	10	0	4	3	1	1	1	1	1
16	20	4	5	12	1,5	8	5	1	1	1	1	1
17	20	3	4	18	1	4	3	1	1	1	1	1
18	20	5	5	12	2	7	4	1	1	1	1	1
19	20	3	5	5	0	4	3	1	1	1	1	1
20	16	3	3	9	1,5	4	3	1	0	0	1	1
21	20	4	5	10	0,5	4	2	1	1	1	1	1
22	20	4	5	20	0,5	8	7	1	1	1	1	1
23	20	5	5	20	0	8	3	1	1	1	1	1
24	20	5	4	20	0,5	8	4	1	1	1	1	1
25	20	5	5	20	0	8	4	1	1	1	1	1
26	20	5	5	20	0	8	3	1	1	1	1	1
27	20	5	5	11	0	7	3	1	1	1	1	1
28	20	3	4	12	0,5	4	4	1	1	1	1	1
29	20	4	5	20	0	8	2	1	1	1	1	1
30	20	3	5	20	2,5	7	1	1	1	1	1	1

Tableau 15 : résultats aux épreuves de caractéristiques cognitives et profils individuels des réussites aux épreuves de comparaisons chez les enfants de GSM

La plupart des participants de GSM atteignent le seuil de réussite à toutes les épreuves de comparaisons. Les codes symboliques semblent assez maîtrisés par ces enfants pour faire l'objet de comparaisons.

Seuls 2 enfants (n°9 et 12) échouent aux comparaisons arabes, ils réussissent toutes les autres épreuves de comparaisons. Cette difficulté pourrait être expliquée par leurs résultats, inférieurs à la moyenne de l'échantillon, dans les épreuves d'écriture (score = 9 ; moy (GSM) = 14,23) et de lecture (score = 4 ; moy (GSM) = 6) de chiffres arabes. Ce résultat est conforme à l'hypothèse stipulant que le code arabe se met en place après le code verbal. De plus, les différences interindividuelles montrent que ce code symbolique n'est pas maîtrisé de la même façon par tous les enfants, surtout lors de cette période d'acquisition.

L'enfant n°20 présente des résultats non conformes au profil de réussite attendu, en réussissant les 2 épreuves de comparaisons symboliques sans réussir 2 tâches analogiques : les jetons et les surfaces. Ce résultat suggère alors que le symbolique pourrait dépasser l'analogique.

VIII.2. Profils des réussites aux comparaisons en fonction des rapports en GSM

GSM	Cercles			Jetons			Surf. rect.			Verbal			Arabe		
Id	**1/2**	**2/3**	**3/4**	**1/2**	**2/3**	**3/4**	**1/2**	**2/3**	**3/4**	**1/2**	**2/3**	**3/4**	**1/2**	**2/3**	**3/4**
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1
16	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
20	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1
25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	1
28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
29	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1

Tableau 16 : profils individuels des réussites aux épreuves de comparaisons selon les rapports (1/2, 2/3 et 3/4) chez les enfants de GSM

Les profils des réussites établis en fonction des rapports nous permettent d'observer plus précisément certaines difficultés rencontrées par les enfants de GSM. Les comparaisons de cercles sont les seules qui n'occasionnent pas d'échec, quel que soit le rapport. À l'inverse, les comparaisons de surfaces selon le rapport 3/4 sont celles qui engendrent le plus d'échecs : 6 enfants (n°2, 15, 20, 23, 24, 27) n'atteignent pas le seuil de réussite. Ce résultat concorde avec la difficulté créée par le contrôle de la surface et avec l'effet de rapport présent pour l'analogique.

Pour les comparaisons de jetons, 3 enfants (n°16, 20 et 29) ne réussissent pas avec le rapport 3/4. Cela est conforme au pattern de l'effet de rapport : 1/2 > 2/3 > 3/4. Cependant, ces participants réussissent les comparaisons symboliques avec tous les rapports, et 2 d'entre eux (n°16 et 29) réussissent également les comparaisons de surfaces, contrairement à ce qui est attendu.

Pour les comparaisons arabes, le rapport 1/2 est réussi par tous les enfants et le rapport 2/3 est plus échoué que le rapport 3/4. 5 enfants (n°12, 13, 17, 19 et 27) échouent au rapport 2/3, alors que 3 d'entre eux (n°12, 17 et 27) réussissent avec le rapport 3/4. Cela pourrait s'expliquer par une éventuelle difficulté pour la comparaison « 6 vs 9 », correspondant au rapport 2/3. La discrimination des symboles pourrait être difficile, surtout à cet âge auquel le problème de l'écriture en miroir est fréquent. Cependant, pour le rapport 2/3, les enfants de GSM réussissent mieux les comparaisons arabes « 6 vs 9 » (moy (BR) = 0,90) que « 4 vs 6 » (moy (BR) = 0,87). De même, la moyenne des résultats des enfants n°12, 17 et 27 (qui réussissent le rapport 3/4 mais pas le rapport 2/3) est plus élevée pour « 6 vs 9 » (moy (BR) = 0,66) que pour « 4 vs 6 » (moy (BR) = 0,58) ou « 2 vs 3 » (moy (BR) = 0,58). Donc les comparaisons « 6 vs 9 » ne semblent pas expliquer la plus grande difficulté au rapport 2/3.

Au niveau des comparaisons verbales, les observations sont semblables. Le rapport 1/2 est réussi par tous les enfants et le rapport 2/3 est plus échoué que le rapport 3/4 : 4 enfants (n°14, 15, 28 et 30) échouent au rapport 2/3, 2 d'entre eux (n°28 et 30) réussissent le rapport 3/4.

De plus, ceux qui échouent aux comparaisons verbales réussissent les comparaisons arabes. Cela n'est pas cohérent avec notre hypothèse stipulant que le code arabe, acquis plus tardivement, est inférieur au verbal.

En outre, dans les comparaisons symboliques, certains profils pourraient évoquer un effet du rapport semblable à celui de l'analogique (1/2 > 2/3 > 3/4). En effet, certains enfants ne réussissent qu'avec le rapport 1/2 (verbal : n°14 et 15 ; arabe : n°13 et 19), ou n'échouent qu'au rapport 3/4 (verbal : n°24 ; arabe : n°9).

VIII.3. Profils des réussites des enfants de CP aux épreuves de comparaisons

CP	Caractéristiques cognitives							Comparaisons				
Id	**Chaîne verbale**	**Compt.**	**Collect.**	**Ecriture chiffres**	**Lignes num.**	**Lecture chiffres**	**Langage**	**Cercles**	**Jetons**	**Surf. rect.**	**Verbal**	**Arabe**
1	20	5	5	20	0	8	3	1	1	1	1	1
2	20	4	4	20	3,5	8	4	1	1	1	1	1
3	20	3	5	20	0	8	4	1	1	1	1	1
4	20	4	5	20	2	8	3	1	1	1	1	1
5	20	3	5	20	1	8	3	1	1	1	1	1
6	20	5	4	20	1	8	4	1	1	1	1	1
7	20	3	5	20	0,5	8	2	1	1	1	1	1
8	20	2	5	20	2	8	5	1	1	1	1	1
9	15	3	4	17	1	7	2	1	1	0	1	1
10	20	4	4	20	1	8	5	1	1	1	1	1
11	20	5	5	20	0	8	4	1	1	1	1	1
12	20	5	5	20	0	8	4	1	1	1	1	1
13	20	4	5	20	0	8	3	1	1	1	1	1
14	20	4	5	20	0	8	3	1	1	1	1	1
15	20	4	5	20	3,5	8	4	1	1	1	1	1
16	20	4	5	20	0,5	8	4	1	1	1	1	1
17	20	5	5	20	0	8	4	1	1	1	1	1
18	20	5	5	18	0,5	8	5	1	1	1	1	1
19	20	4	4	20	0	8	3	1	1	0	1	1
20	20	3	5	11	1,5	8	5	1	1	1	1	1
21	20	4	5	20	0,5	8	5	1	1	1	1	1
22	20	5	4	20	0,5	8	4	1	1	1	1	1
23	20	5	5	20	1	8	2	1	1	1	1	1
24	20	5	5	20	0,5	8	5	1	1	1	1	1
25	20	5	5	20	4	8	5	1	1	1	1	1
26	20	5	5	11	0	8	2	1	1	1	1	1
27	20	5	5	20	0	8	4	1	1	1	1	1
28	20	4	5	20	0	8	1	1	1	1	1	1
29	20	5	5	20	1	8	4	1	1	1	1	1
30	20	4	5	20	1,5	8	6	1	1	1	1	1
31	20	5	5	11	0,5	8	3	1	1	1	1	1

Tableau 17 : résultats aux épreuves de caractéristiques cognitives et profils individuels des réussites aux épreuves de comparaisons chez les enfants de CP

La plupart des participants de CP atteignent le seuil de réussite à toutes les épreuves de comparaisons. Contrairement aux enfants de GSM, tous ceux de CP réussissent l'épreuve arabe. Le code arabe est maîtrisé par davantage d'enfants en CP, en accord avec les résultats aux épreuves de caractéristiques cognitives. 2 enfants (n°9 et 19) n'atteignent pas le seuil de réussite pour les comparaisons de surfaces, conformément à l'hypothèse stipulant que le contrôle de la surface occupée occasionne une difficulté par rapport aux autres épreuves analogiques.

VIII.4. Profils des réussites aux comparaisons en fonction des rapports en CP

CP	Cercles			Jetons			Surf. rect.			Verbal			Arabes		
Id	**1/2**	**2/3**	**3/4**	**1/2**	**2/3**	**3/4**	**1/2**	**2/3**	**3/4**	**1/2**	**2/3**	**3/4**	**1/2**	**2/3**	**3/4**
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
6	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
16	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
17	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
18	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
19	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
21	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
24	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
25	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
26	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
27	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
28	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1
29	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
30	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
31	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Tableau 18 : profils individuels des réussites aux épreuves de comparaisons selon les rapports (1/2, 2/3 et 3/4) chez les enfants de CP

L'analyse des profils selon les rapports montre globalement plus de réussites en CP qu'en GSM. Les comparaisons de surfaces avec le rapport 3/4 sont encore celles qui sont les moins réussies. Toutefois, tous les enfants de CP atteignent le seuil de réussite pour les rapports 1/2 et 2/3, donc le contrôle de la surface les gêne seulement quand le rapport entre les quantités diminue. Les comparaisons symboliques sont réussies avec les 3 rapports par tous les enfants de CP sauf un (n°28) qui n'atteint pas le seuil de réussite aux comparaisons verbales avec le rapport 2/3. Ce rapport était également le moins réussi par les enfants de GSM dans les épreuves symboliques. Le score très faible de cet enfant en langage pourrait expliquer cette difficulté. De plus, il réussit les comparaisons arabes selon les 3 rapports, contrairement à l'hypothèse de la supériorité du code verbal par rapport au code arabe, acquis plus tardivement.

Le profil de l'enfant n°7 n'est pas conforme à nos attentes. Il n'atteint pas le seuil de réussite aux comparaisons de cercles et de jetons pour le rapport 3/4, alors qu'il réussit tous les rapports pour les comparaisons de surfaces et les comparaisons symboliques, supposées moins réussies.

VIII.5. Conclusion

L'analyse des profils individuels met en évidence une meilleure maîtrise des codes symboliques par les enfants de CP, comparativement à ceux de GSM. De plus, plusieurs profils sont conformes à nos hypothèses, mais d'autres présentent des incohérences : au niveau analogique, avec un échec aux cercles et / ou aux jetons et une réussite aux surfaces (GSM : n°16 et 29 ; CP : n°7) ; au niveau symbolique, avec un échec en verbal et une réussite avec le code arabe (GSM : n°14, 15, 24, 28 et 30 ; CP : n°28) ; entre analogique et symbolique, avec un échec aux cercles et / ou aux jetons et une réussite aux épreuves symboliques (GSM : n°16 et 29 ; CP : n°7). En outre, le rapport 3/4 est le moins réussi dans les épreuves analogiques, alors que les épreuves symboliques sont davantage échouées avec le rapport 2/3, même si certains profils (GSM : n°9, 13, 14, 15, 19 et 24) semblent suivre le même effet de rapport que pour l'analogique (1/2 > 2/3 > 3/4).

IX. ÉTUDE DE CAS

Nous nous intéressons au cas de l'enfant n°32, scolarisé en CP, qui a été exclu de l'étude de groupe du fait de ses résultats atypiques. Il s'agit d'un garçon âgé de 6 ans 8 qui n'a pas de trouble connu, ou tout du moins communiqué par la famille.

Caractéristiques cognitives	moy CP	n°32	note z
Age (mois)	81	80	- 0,27
Chaîne verbale	19,84	20	0,18
Comptage	4,23	1	**- 3,8**
Constitution de collections	4,81	2	**- 7,02**
Comptage en écriture arabe	18,97	0	**- 6,95**
Lignes numériques	0,89	1	0,1
Reconnaissance chiffres arabes	7,97	8	0,17
Langage	3,71	2	- 1,47

Tableau 19 : résultats de l'enfant n°32 aux épreuves de caractéristiques cognitives et notes z le situant par rapport à la moyenne des résultats des autres enfants de CP

L'enfant n°32 récite la chaîne verbale jusqu'à 20. Mais ses scores étant très faibles en comptage et en constitution de collections, cette connaissance ne semble pas fonctionnelle. Cet enfant n'aurait peut-être pas acquis la notion de cardinalité, nécessaire pour effectuer ces 2 épreuves. Nous notons une autre dissociation, au niveau du code arabe : l'enfant n°32 lit correctement les chiffres arabes, mais il n'en écrit aucun. Même avec un score faible de 1/8 à l'épreuve des lignes numériques, l'enfant n°32 se trouve dans la moyenne des enfants de CP. Nous n'observons pas d'incohérence dans le placement des chiffres, mais ils sont globalement trop près du 0, sauf le 9 qui est placé près du 10. Enfin, cet enfant obtient un score assez faible en langage.

	moy CP BR	n°32 BR	note z BR	moy CP TR	n°32 TR	note z TR
Cercles	0,95	0,98	0,43	995	1151	0,93
Jetons	0,92	0,79	**- 2,6**	1507	1368	- 0,4
Surfaces	0,89	0,68	**- 2,62**	1827	1143	- 1,47
Verbal	0,92	0,54	**- 6,33**	1016	1174	0,28
Arabe	0,91	0,41	**- 10**	1444	1343	- 0,29

Tableau 20 : pourcentages des BR et moyennes des TR de l'enfant n°32 aux comparaisons et notes z le situant par rapport à la moyenne des résultats des autres enfants de CP

L'épreuve de comparaisons de réglettes est réussie à 80 % par l'enfant n°32, au-dessus du hasard, donc ses résultats aux épreuves de comparaisons peuvent être pris en compte.

Au niveau des BR, seuls les résultats aux comparaisons de cercles de l'enfant n°32 correspondent à la moyenne des autres enfants de CP, les autres résultats se situent nettement en dessous. L'écart à la moyenne des autres enfants de CP est plus important

pour les épreuves symboliques que pour les épreuves analogiques, et encore plus grand avec le code arabe qu'avec le code verbal, suivant l'hypothèse : analogique > verbal > arabe. Cela pourrait suggérer un retard de développement. De plus, le profil de ses résultats est le suivant : cercles > jetons > surfaces > verbal > arabe, alors que les comparaisons de surfaces sont les plus difficiles pour les autres enfants de CP et de GSM. L'enfant n°32 lit correctement les chiffres arabes et énonce bien la chaîne verbale, mais il montre beaucoup de difficultés pour les comparaisons verbales et arabes. Cela pourrait évoquer des difficultés d'accès à la quantité à partir des symboles numériques, hypothèse proposée par certains auteurs pour expliquer les MLD (Andersson et coll., 2012) [1].
En ce qui concerne les TR aux épreuves de comparaisons, l'enfant n°32 ne présente pas de profil atypique, les TR se situant dans la moyenne de ceux des autres enfants de CP. Seules les comparaisons de surfaces génèrent des TR plus importants que les autres enfants de CP, cette épreuve étant généralement la plus difficile du fait du contrôle de la surface occupée.

Profil BR	Général	Rapport 1/2	Rapport 2/3	Rapport 3/4
Cercles	1	1	1	1
Jetons	1	1	0	0
Surfaces rectangles	0	1	0	0
Verbal	0	0	1	0
Arabe	0	0	0	0

Tableau 21 : profil individuel des réussites aux épreuves de comparaisons de l'enfant n°32

Le profil de l'enfant n°32 est conforme à plusieurs de nos hypothèses : l'analogique est supérieur au symbolique, et les comparaisons de quantités analogiques sont plus difficiles lorsque la surface occupée est contrôlée (cercles et jetons > surfaces).

En CP, on s'attend à ce que les représentations symboliques soient connues et puissent être employées lors de comparaisons. C'est ce que nous observons pour les autres enfants de CP, mais l'enfant n°32 ne maîtrise pas encore assez ces codes symboliques. Ses difficultés sont d'autant plus importantes avec le code arabe puisqu'il échoue avec les 3 rapports. Étonnamment, il réussit les comparaisons verbales seulement selon le rapport 2/3, contrairement à certains enfants (CP : n°28 ; GSM : n°28 et 30) qui n'échouent qu'avec ce rapport. Rien n'évoque un effet de rapport dans les comparaisons symboliques, dont la présence témoignerait la mise en relation automatique des codes symboliques avec la représentation analogique. Il réussit les comparaisons de cercles selon les 3 rapports, mais les autres comparaisons analogiques (jetons et surfaces) deviennent trop difficiles quand le rapport se rapproche de 1 : seul le rapport 1/2 est réussi. Ainsi, l'enfant n°32 montre également des difficultés avec le code analogique, davantage en accord avec l'hypothèse du trouble du sens du nombre (Andersson et coll., 2012) [1].

X. DISCUSSION

L'objectif de cette étude était d'observer le développement des représentations des quantités, analogiques et symboliques, et leur relation, chez les enfants de 5-7 ans.

Tout d'abord, mise à part la chaîne verbale, qui n'est pas connue jusqu'à 20 pour un seul enfant de chaque groupe, les résultats des enfants de CP sont supérieurs à ceux des enfants de GSM dans toutes les épreuves, en précision et en vitesse de réponse pour les comparaisons. **Cela valide notre quatrième hypothèse qui prévoyait de meilleures performances pour les enfants de CP comparativement aux enfants de GSM.** Cette progression, retrouvée également chez les enfants entre 4 et 5 ans par Chazoule (2012) [6], concerne le domaine analogique comme le domaine symbolique. Ces observations sont en accord avec l'acuité croissante du SNA (Lafay et coll., 2013) [33] et l'acquisition des codes symboliques (Chazoule, 2012) [6] durant cette période du développement.

Cependant, cette différence de performance n'est significative qu'avec le code arabe (lecture et écriture de chiffres arabes) parmi les épreuves de caractéristiques cognitives. Les enfants obtiennent de bons scores avec le code verbal dès la GSM, donc la différence avec les résultats des enfants de CP est moins nette. La mise en place de la représentation numérique verbale serait déjà en grande partie effectuée en GSM alors que la mise en place de la représentation numérique arabe est conséquente entre GSM et CP. Cela concorde avec le fait que l'acquisition du code arabe soit plus tardive que celle du code verbal (Chazoule, 2012) [6]. À l'inverse, dans les épreuves de comparaisons de quantités, la différence de réussite n'est significative que pour l'épreuve verbale. La prise en compte des temps de réponse permet toutefois d'observer des réponses significativement plus rapides pour les enfants de CP, par rapport aux enfants de GSM, à toutes les épreuves.

De plus, une relation entre le code verbal et le code arabe, qui ne se manifeste pas dans les résultats des enfants de GSM, apparaît dans ceux des enfants de CP : la lecture des chiffres arabes est corrélée à l'énonciation de la chaîne verbale et aux constitutions de collections, de même la réussite aux comparaisons arabes est liée à la capacité de comptage. Cela suggère un lien entre les codes symboliques. Ce lien pourrait contribuer à l'acquisition du code arabe, en accord avec le fait que cette acquisition s'effectue à travers le code verbal installé plus précocement, même si ces codes symboliques regagnent ensuite leur indépendance (Chazoule, 2012) [6]. Alors qu'une corrélation entre le langage et les comparaisons verbales était attendue, c'est un lien entre le niveau de langage et la réussite

aux comparaisons arabes qui apparaît chez les enfants de GSM, évoquant également une contribution du verbal par rapport au code arabe. De plus, chez ces enfants, le lien qu'il existe entre la lecture et l'écriture de chiffres arabes indique que la connaissance des chiffres arabes favorise leur écriture, ce qui est cohérent.

À l'image de ce lien qui existe entre les épreuves arabes, une relation apparaît également au sein des épreuves de caractéristiques cognitives mettant en jeu le code verbal. En effet, la connaissance de la chaîne verbale facilite la constitution de collections d'un nombre donné d'éléments, la corrélation entre ces deux épreuves étant retrouvée pour les deux groupes d'enfants. Ce résultat avait également été observé par Chazoule (2012) [6] avec des enfants de 4 et 5 ans. La récitation de la chaîne verbale seule ne suffit pas à évaluer la maîtrise du système verbal, et les résultats à cette épreuve sont supérieurs à ceux relevés aux constitutions de collections et au comptage, qui nécessitent d'autres compétences. En effet, ces tâches exigent la connaissance de la chaîne verbale, mais également la maîtrise du principe cardinal. Étonnamment, l'épreuve de comptage n'est pas corrélée avec les autres épreuves verbales. La composante de pointage, digital ou visuel, qui s'ajoute par rapport à la constitution de collections, ou encore la coordination entre le pointage et l'énonciation de la chaîne verbale, pourrait expliquer le recours à un traitement différent.

Concernant l'épreuve des lignes numériques, les difficultés relevées pourraient être expliquées par White et coll. (2012) [45]. Selon eux, le lien entre les nombres et l'espace se mettrait en place après le CP, contrairement à l'accès à la quantité à partir des symboles numériques qui serait réalisable plus tôt.

En ce qui concerne les épreuves de comparaisons de quantités, les enfants de GSM présentent le pattern de réussite suivant : cercles > jetons > numéraux verbaux et chiffres arabes > surfaces. Cela est conforme à la hiérarchie attendue, dominée par l'analogique (cercles et jetons), bien que la différence entre l'analogique et le symbolique ne soit significative qu'avec les cercles. Nous observons à peu près la même configuration pour la réussite des enfants de CP : cercles > jetons et numéraux verbaux > chiffres arabes > surfaces. Nous notons que le symbolique tend à rattraper l'analogique, ce qui est également remarquable au niveau de la rapidité des réponses. En effet, les enfants de GSM montrent le pattern suivant pour les TR : cercles < numéraux verbaux < jetons < chiffres arabes < surfaces, et les enfants de CP présentent le pattern suivant : cercles < numéraux verbaux < chiffres arabes < jetons < surfaces, avec une différence significative entre les cercles et les numéraux verbaux en GSM qui ne l'est plus en CP. Les enfants de CP maîtrisent suffisamment les codes symboliques pour que les performances rattrapent voire dépassent

l'analogique lors des comparaisons de quantités. Ce résultat est conforme au fait que les codes symboliques sont plus précis que l'analogique lorsqu'ils sont acquis (Roggeman et coll., 2007) [41]. **Notre deuxième hypothèse, qui prédisait une supériorité des comparaisons analogiques par rapport aux comparaisons symboliques, ne peut donc pas être confirmée.** Cela concorde avec les résultats de Chazoule (2012) [6] qui présentent des temps de réponse plus rapides pour les comparaisons arabes que pour les comparaisons analogiques chez les adultes. L'étude des profils individuels montre également que certains enfants de GSM et de CP réussissent les comparaisons symboliques selon les 3 rapports, sans atteindre le seuil de réussite pour tous les rapports dans les comparaisons analogiques. Cela soulève une incohérence par rapport au triple code qui postule que la « greffe » du symbolique sur l'analogique induit la supériorité de la dimension analogique.

De plus, notre deuxième hypothèse prévoyait de meilleures performances avec le code verbal, par rapport au code arabe. Or, même si les comparaisons verbales sont effectuées significativement plus vite que les comparaisons arabes, la différence de réussite entre ces 2 épreuves n'est pas significative pour les 2 groupes d'enfants. De plus, alors que nous observons une progression notable de la maîtrise du code arabe, rattrapant le code verbal, entre GSM et CP, dans les épreuves de caractéristiques cognitives, cela ne se constate pas dans les comparaisons, aussi bien effectuées avec les 2 codes symboliques, en GSM et CP. **Notre deuxième hypothèse prévoyait une supériorité des comparaisons verbales par rapport aux comparaisons arabes, ce que nos résultats ne confirment pas.**

Au niveau des comparaisons analogiques, l'épreuve des cercles est la mieux réussie et la plus rapide, pour les 2 groupes de participants. L'épreuve des jetons, également bien réussie, reste toujours plus difficile que l'épreuve des cercles. Comme retrouvé dans les résultats de Chazoule (2012) [6], la dimension discontinue implique un traitement plus complexe que la dimension continue. L'épreuve des surfaces rectangles correspond à la moins bonne moyenne des tâches de comparaisons, tant au niveau de la réussite que de la rapidité des réponses. **Cela confirme notre troisième hypothèse, selon laquelle les comparaisons analogiques sont plus difficiles quand la surface occupée est contrôlée,** en accord avec les données de la littérature qui soulignent l'influence d'une variable perceptive dans les tâches de comparaisons. En effet, selon Rousselle et ses collaborateurs (2004) [42], le traitement perceptif est prégnant dans les comparaisons de quantités effectuées par les jeunes enfants. Cependant, la différence de réussite entre les comparaisons de jetons et les comparaisons de surfaces, significative chez les enfants de GSM, est seulement tendancielle pour les enfants de CP. Ce résultat pourrait suggérer un

détachement progressif par rapport aux caractéristiques perceptives, même si celles-ci restent gênantes pour effectuer des comparaisons de quantités analogiques. Conformément aux données de la littérature, les capacités dans le domaine analogique s'améliorent (Lafay et coll., 2013) [33], mais restent limitées avec un contrôle de la surface (Chazoule, 2012) [6].

Selon le modèle du triple code, les représentations symboliques dépendraient des représentations analogiques, sur lesquelles elles se « greffent ». Toutefois, les données de la littérature ne retrouvent cette relation que chez les enfants (Inglis et coll., 2011) [29], suggérant une indépendance progressive des codes symboliques ensuite. Dans ce sens, plusieurs corrélations sont retrouvées entre des épreuves analogiques et des épreuves symboliques. Cependant, ces corrélations ne sont pas les mêmes en GSM et en CP, ce qui suggère un traitement cognitif différent pour ces 2 groupes d'enfants. Les comparaisons arabes sont liées aux comparaisons de jetons en GSM. De même, la lecture de chiffres arabes et les comparaisons de surfaces sont corrélées en CP. La relation semble plus prégnante avec la dimension verbale : les comparaisons verbales dépendent des comparaisons de jetons et de surfaces en CP ; la connaissance de la chaîne verbale est liée aux 3 épreuves analogiques en GSM et à 1 épreuve analogique en CP ; la capacité à constituer des collections est corrélée à 1 tâche analogique en GSM et à 2 tâches analogiques en CP ; la capacité de comptage est liée aux comparaisons de cercles en CP. De plus, l'épreuve de comparaisons de surfaces est celle qui entretient le plus de relations avec les tâches symboliques. Cette donnée suppose qu'une meilleure maîtrise des codes symboliques pourrait être liée au fait de pouvoir se détacher des caractéristiques perceptives lors des comparaisons analogiques. Ces résultats sont en faveur d'une dépendance du symbolique par rapport à l'analogique, surtout au niveau du code verbal, à 5-7 ans. Mais cette subordination du symbolique par rapport à l'analogique devrait se manifester au niveau des profils individuels, ce qui n'est pas observé. En effet, les rares enfants qui n'atteignent pas le seuil de réussite à toutes comparaisons analogiques, réussissent les comparaisons symboliques (GSM : n°20 ; CP : n°9 et 19). De même, pour ce qui est de la réussite aux comparaisons en fonction des rapports entre les quantités à comparer : 5 enfants de GSM (n°2, 16, 20, 23 et 29) et 6 enfants de CP (n°7, 9, 14, 19, 21, 22) montrent au moins un échec dans le domaine analogique, en réussissant les comparaisons symboliques selon tous les rapports. **Cela infirme notre première hypothèse qui stipulait que les performances en arithmétique symbolique dépendaient des performances en arithmétique analogique. Pour les enfants de 5-7 ans, la réussite ou l'échec aux épreuves analogiques ne conditionne pas la réussite ou**

l'échec aux épreuves symboliques. Ce résultat suggère que la dépendance du symbolique par rapport à l'analogique n'est pas absolue chez les enfants, comme l'évoquent Roggeman et ses collaborateurs (2007) [41].

Les épreuves de comparaisons de quantités permettent d'analyser l'effet de rapport. Conformément aux données de la littérature, nous nous attendons à ce que plus le rapport entre les quantités à comparer est proche de 1, plus les comparaisons analogiques sont difficiles (1/2 > 2/3 > 3/4). Cela est observé pour les jetons et les surfaces au niveau des réussites en GSM et en CP. Les TR suivent le même effet de rapport pour ces épreuves, même si la différence entre les rapports 2/3 et 3/4 n'est pas significative aux comparaisons de jetons. Étonnamment, ce profil n'est pas retrouvé pour l'effet de rapport aux comparaisons de cercles. Avec du matériel analogique continu, la rapidité des réponses suit le pattern suivant : 1/2 > 3/4 > 2/3. Il en est de même pour la réussite des enfants de CP, bien que la différence entre les rapports 2/3 et 3/4 ne soit pas significative. Pour les enfants de GSM, le pattern des réussites aux comparaisons de cercles est conforme à ce qui est attendu (1/2 > 2/3 > 3/4) mais les faibles différences entre les rapports ne peuvent faire apparaître un effet du rapport**. Nos résultats confirment une partie de l'hypothèse n°5, avec la présence de l'effet de rapport dans les épreuves analogiques. Mais celui-ci ne serait valable qu'avec du matériel analogique discontinu et apparaît plus clairement lorsque la surface est contrôlée.** Dans l'étude de Chazoule (2012) [6], pour les comparaisons de cercles, seul l'effet de distance avait été testé et était conforme à ce qui était attendu, pour les adultes et les enfants de 4 et 5 ans. Il serait intéressant d'étudier l'effet de rapport lors de comparaisons analogiques continues présentées sous diverses formes (cercles, traits…), avec des populations d'âges différents, afin de vérifier et compléter nos observations.

Contrairement aux épreuves analogiques discontinues, le taux de BR aux comparaisons symboliques en GSM et celui aux comparaisons verbales en CP ne baissent pas régulièrement quand le rapport se rapproche de 1. En effet, le profil de réussite est le suivant : 1/2 > 3/4 > 2/3, même si les différences entre les rapports ne sont pas toutes significatives. Seuls les taux de BR aux comparaisons arabes en CP suivent l'effet de rapport caractéristique de l'analogique (1/2 > 2/3 > 3/4), bien que les performances aux rapports 2/3 et 3/4 ne se différencient pas significativement. Toutefois, la prise en compte des TR apporte des informations supplémentaires, puisque le pattern 1/2 > 3/4 > 2/3 n'est valable que pour la rapidité aux comparaisons arabes en GSM. Les comparaisons verbales en GSM, de même que les 2 épreuves symboliques en CP, suivent le profil typique de

l'effet de rapport dans les tâches analogiques au niveau de la rapidité des réponses : 1/2 > 2/3 > 3/4, bien que toutes les différences entre les rapports ne soient pas significatives. Chazoule (2012) [6], qui a analysé la rapidité des réponses chez des adultes, a effectué la même constatation pour les comparaisons arabes : 1/2 > 2/3 > 3/4, sans que la différence entre les rapports 2/3 et 3/4 ne soit significative, évoquant un traitement différent de l'analogique et du symbolique. Dans son étude portant sur les enfants de 4 et 5 ans, les profils de l'effet de rapport dans les réussites aux comparaisons symboliques ne correspondent pas à l'effet de rapport typique des tâches analogiques. Cependant, les TR n'ayant pas été pris en compte pour les enfants de 4 et 5 ans, il serait intéressant d'observer s'ils occasionnent les mêmes résultats que les enfants plus âgés de notre étude, au niveau de l'effet de rapport, résultats semblables à ceux retrouvés pour les adultes. Roggeman et coll. (2007) [41] soulignent également le fait que les effets de taille et de distance sont moins importants avec les codes symboliques qu'avec les codes analogiques, ce qui leur procure une meilleure précision lorsqu'ils sont maîtrisés. De plus, nos résultats occasionnent des interprétations contradictoires. En effet, l'augmentation régulière des TR quand le rapport se rapproche de 1 signe l'articulation des codes symboliques avec l'analogique, qui serait plus précoce pour le code verbal (en GSM) que pour le code arabe (en CP), comme attendu. À ceci s'oppose la présence de cet effet de rapport dans les BR aux comparaisons arabes en CP, qui n'apparaît pas dans les BR aux comparaisons verbales. Toutefois, l'absence de significativité au niveau de la différence entre certains rapports nous conduit à être prudents quant à nos interprétations. Cette relation entre les représentations symboliques et la représentation analogique ne serait pas complètement automatisée en CP car l'effet de rapport caractéristique de l'analogique n'est pas retrouvé dans les réussites aux comparaisons verbales et la différence des BR entre les rapports 2/3 et 3/4 aux comparaisons arabes reste minime. **Nous ne pouvons donc pas confirmer notre cinquième hypothèse selon laquelle les codes symboliques sont automatiquement mis en relation avec la représentation analogique en CP.** Nos résultats suggèrent plutôt que l'articulation entre les représentations symboliques et la représentation analogique se mettrait en place pendant cette période du développement, mais que la mise en relation du symbolique avec l'analogique ne serait pas encore complètement finalisée en CP. Cela est également soutenu par l'analyse qualitative des performances à l'épreuve des lignes numériques, qui montre que le lien entre l'analogique et le symbolique se précise entre GSM et CP. Des investigations supplémentaires pourraient être conduites chez des enfants plus âgés pour établir à quel moment du

développement s'effectue l'automatisation de la mise en relation des codes symboliques avec la représentation analogique.

Enfin, des différences entre les filles et les garçons sont retrouvées dans notre étude : en GSM, les garçons sont significativement meilleurs que les filles pour la lecture et l'écriture de chiffres arabes ; en CP, les filles sont significativement meilleures que les garçons pour constituer des collections. Ces résultats pourraient suggérer une meilleure maîtrise du code verbal par les filles comparativement aux garçons, et inversement au niveau du code arabe. Cependant, aucune différence au niveau du sexe n'avait été relevée dans l'étude de Chazoule (2012) [6]. Ce résultat serait donc à explorer plus précisément à travers des études comparatives entre des filles et des garçons.

Limites de l'étude

S'il existe des différences par rapport au sexe dans le domaine arithmétique, cela peut constituer un biais pour notre étude qui comporte un nombre différent de filles et de garçons. La familiarité de l'outil informatique pourrait également créer une différence entre les enfants, influençant leur facilité de réponse aux épreuves de comparaisons informatisées, qui prennent en compte les temps de réponse. De plus, ces tâches répétitives (constituées de 44 items) imposent une rapidité de réponse qui requiert une attention particulière. Cependant, l'attention des enfants est fluctuante au cours de la journée et le fait que les passations aient lieu à des moments différents pour chaque enfant pourrait constituer un biais par rapport à leurs résultats.

Par rapport à nos épreuves, nous remarquons peu de relation entre le niveau de langage et l'acquisition des représentations symboliques. Il aurait pu être intéressant d'ajouter des tâches évaluant d'autres fonctions cognitives qui influencent l'arithmétique, telles que la mémoire et les gnosies digitales, pour étudier leur lien avec la maîtrise des différentes représentations des quantités. De plus, la cotation de l'épreuve des lignes numériques ne paraît pas adaptée pour évaluer finement les performances des enfants de 5-7 ans et pour interpréter le lien qu'ils établissent entre la représentation analogique et les représentations symboliques.

Pour mieux analyser la relation entre l'analogique et le symbolique, des analyses de régression pourraient permettre d'observer si les performances aux épreuves analogiques prédisent ou non les performances aux épreuves symboliques. Cependant, nos effectifs ne

sont pas assez importants pour que ces analyses soient pertinentes. Il serait également intéressant de proposer ces épreuves à des participants ayant des difficultés d'apprentissage en mathématiques (MLD). Cette étude pourrait notamment s'effectuer auprès d'enfants atteints d'un syndrome neurodéveloppemental qui s'accompagne souvent de MLD. En effet, l'analyse des leurs performances permettrait d'améliorer la compréhension de leurs difficultés en mathématiques, mais aussi d'accroître nos connaissances sur le développement et l'apprentissage des compétences mathématiques dans la population générale.

XI. CONCLUSION

Prenant comme cadre théorique le modèle du triple code, nous avons étudié le développement des représentations des quantités, analogiques et symboliques, chez des enfants de 5-7 ans (en GSM et en CP). Notre étude s'inscrit dans la continuité du travail de recherche de M. Chazoule (2012) [6], portant notamment sur des enfants de 4 et 5 ans.

Durant cette période du développement, les performances des enfants s'améliorent dans le domaine arithmétique, analogique et symbolique, puisque nous observons une amélioration générale des résultats entre la GSM et le CP.

En ce qui concerne les comparaisons analogiques, les résultats obtenus par notre échantillon sont moins bons quand la surface est contrôlée, en accord avec ce qui était attendu. Dans le domaine symbolique, la supériorité du code verbal par rapport au code arabe, acquis plus tard, n'est pas retrouvée dans la réussite aux comparaisons de quantités.

Nous nous sommes intéressés à l'articulation entre l'analogique et le symbolique. Selon le triple code, les représentations symboliques « se greffent » sur la représentation analogique innée. Cependant, nous observons que les performances en arithmétique symbolique rattrapent, voire dépassent, les performances en arithmétique analogique. De plus, bien que certaines corrélations soient retrouvées entre des épreuves analogiques et des épreuves symboliques, les profils individuels montrent que les résultats aux comparaisons symboliques ne dépendent pas de ceux obtenus aux comparaisons non symboliques.

L'effet de rapport, selon lequel les performances aux comparaisons baissent régulièrement quand le rapport entre les quantités se rapproche de 1, est caractéristique de la représentation analogique, selon la loi de Weber-Fechner. Nous avons retrouvé cet effet de

rapport dans les BR et les TR pour les 2 groupes de participants aux comparaisons de jetons et de surfaces, mais pas avec les quantités analogiques continues (cercles), ce qui est surprenant. Pour étudier la mise en relation automatique des codes symboliques avec la représentation analogique, nous avons analysé l'effet de rapport dans les comparaisons symboliques. Cet effet suit le profil caractéristique de l'analogique dans les TR aux comparaisons verbales en GSM, et dans les TR aux comparaisons symboliques (verbales et arabes) et les BR aux comparaisons arabes en CP. Cependant, la plupart des différences de performance entre les rapports restent très faibles. La tendance est conforme à notre hypothèse stipulant que les codes symboliques sont automatiquement mis en relation avec la représentation analogique en CP, mais l'absence de significativité au niveau de la différence entre certains rapports conduit à être prudent quant à notre conclusion. Nous supposons donc que l'articulation entre l'analogique et le symbolique se met en place durant cette période du développement, mais n'est pas encore finalisée en CP. Il serait alors intéressant de poursuivre ces investigations auprès d'enfants plus âgés, de 7-9 ans, pour étudier le développement et l'apprentissage des représentations des quantités, la relation entre l'analogique et le symbolique, et l'automatisation de cette relation.

De plus, les épreuves de comparaisons utilisées, sensibles à la mise en relation automatique des codes symboliques avec la représentation analogique, à travers l'effet de rapport, pourraient faire partie d'une évaluation des représentations des quantités. Ainsi, le dépistage de difficultés par rapport à ces représentations permettrait une remédiation plus précoce et plus spécifique pour limiter les difficultés ultérieures en mathématiques.

XII. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] ANDERSSON, U., OSTERGREN, R. (2012). Number magnitude processing and basic cognitive functions in children with mathematical learning disabilities. *Learning and Individual Differences*, 22(6), 701-714.

[2]ASHKENAZI, S., MARK-ZIGDON, N., HENIK, A. (2013). Do subitizing déficits in developmental dyscalculia involve pattern recognition weakness ? *Developmental Science*, 16(1), 35-46.

[3] BRUANDET, M., MOLKO, N., COHEN, L., DEHAENE, S. (2004). A cognitive characterization of dyscalculia in Turner syndrome. *Neuropsychologia*, 42(3), 288-298.

[4] BUTTERWORTH, B. (2005). The development of arithmetical abilities. *Journal of Child Psychology and Psychiatry*, 46(1), 3-18.

[5] BUTTERWORTH, B. (2010). Foundational numerical capacities and the origins of dyscalculia. *Trends in Cognitive Sciences*, 14(12), 534-541.

[6] CHAZOULE, G. (2012). *Représentations analogiques et représentations symboliques des quantités. Leurs relations entre 4 et 6 ans*. Thèse pour l'obtention du Doctorat psychologie sociale et cognitive de l'Université Blaise Pascal à Clermont-Ferrand.

[7] CHU, F.W., VANMARLE, K., GEARY, D.C. (2013). Quantitative deficits of preschool children at risk for mathematical learning disability. *Frontiers in Psychology*, 4, 95.

[8] DACLIN, A.H., LALLEMAND, R. (2011). *Prédire les performances arithmétiques de 4 à 6 ans : poids des compétences verbales et non-verbales*. Mémoire pour l'obtention du Certificat de Capacité d'Orthophoniste de l'Université Claude Bernard à Lyon.

[9] DAVID-CAZEILLES, D., DESMICHELLE-KERAUDY, H. (2011*). Les déterminants de la performance arithmétique de 6 ans à 8 ans.* Mémoire pour l'obtention du Certificat de Capacité d'Orthophoniste de l'Université Pierre et Marie Curie à Paris.

[10] DEHAENE, S., COHEN, L. (1991). Two mental calculation systems : a case study of severe acalculia with preserved approximation. *Neuropsychologia*, 29(11), 1045-1074.

[11] DEHAENE, S., DEHAENE-LAMBERTZ, G., COHEN, L. (1998). Abstract

representations of numbers in the animal and human brain. *Trends in Neurosciences*, 21(8), 355-361.

[12] DEHAENE, S., PIAZZA, M., PINEL, P., COHEN, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20(3-6), 487–506.

[13] DEHAENE, S., MOLKO, N., COHEN, L., WILSON, A.J. (2004). Arithmetic and the brain. *Current Opinion in Neurobiology*, 14, 218–224.

[14] DEHAENE, S., MOLKO, N., WILSON, A. (2004). Dyscalculie, le sens perdu des nombres. *La Recherche*, 379, 42-47.

[15] DEHAENE, S., IZARD, V., SPELKE, E., PICA, P. (2008). Log or linear ? Distinct intuitions of the number scale in Western and Amazonian indigene cultures. *Science*, 320, 1217-1220.

[16] DEHAENE, S. (2009a). Le concept de nombre. « Psychologie cognitive expérimentale ». *L'annuaire du Collège de France*, Paris, Collège de France, 108, 277-301.

[17] DEHAENE, S. (2009b). Le cerveau, l'arithmétique et la dyscalculie. *Recherche en tête, La revue de la Fédération pour la Recherche sur le Cerveau*, 2009, 7-10.

[18] DE SMEDT, B., SWILLEN, A., VERSCHAFFEL, L., GHESQUIERE, P. (2009). Mathematical learning disabilities in children with 22q11.2 deletion syndrome : a review. *Developmental Disabilities Research Reviews*, 15, 4-10.

[19] DE SMEDT, B., GILMORE, C.K. (2011). Defective number module or impaired access ? Numerical magnitude processing in first graders with mathematical difficulties. *Journal of Experimental Child Psychology*, 118(2), 278-292.

[20] FAYOL, M., BARROUILLET, P., MARINTHE, C. (1998). Predicting arithmetical achievement from neuro-psychological performance : a longitudinal study. *Cognition*, 68, 63-70.

[21] FAYOL, M., MARINTHE, C., BARROUILLET, P. (2004). Compter sur les doigts, une étape nécessaire. *La Recherche*, 379, 47-49.

[22] FAYOL, M., SERON, X. (2005). About numerical representations : insights from neuropsychological, experimental and developmental studies. *Handbook of Mathematical*

Cognition, Campbell J.I.D. (ed), New York: Psychology Press, 3-22.

[23] FAYOL, M. (2008). L'acquisition de l'arithmétique élémentaire. *Médecine/Sciences*, 24, 87-90.

[24] FAYOL, M. (2012). *L'acquisition du nombre*. Collection : Que sais-je ? (n°3941), Paris : Puf, 128p.

[25] FISHER, J.P. (2011). Mirror writing of digits and (capital) letters in the typically developing child. *Cortex*, 47 (6), 759-762.

[26] GAUVRIT, N. (2012). Gènes et mathématiques : La génétique peut-elle présenter un intérêt pour la didactique ? *Annales de Didactique et de Sciences Cognitives*, 17, 9-26.

[27] GEARY, D.C. (2011). Consequences, characteristics, and causes of mathematical learning disabilities and persistent low achievement in mathematics. *Journal of Developmental and Behavioral Pediatrics*, 32(3), 250-263.

[28] HYDE, D.C. (2011). Two systems of non-symbolic numerical cognition. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5, 150.

[29] INGLIS, M., ATTRIDGE, N., BATCHELOR, S., GILMORE, C. (2011). Non-verbal number acuity correlates with symbolic mathematics achievement : but only in children. *Psychonomic Bulletin & Review*, 18(6), 1222-1229.

[30] KARMILOFF-SMITH, A., D'SOUZA, D., DEKKER, T.M., VAN HERWEGEN, J., XU, F., RODIC, M., ANSARI, D. (2012). Genetic and environmental vulnerabilities in children with neurodevelopmental disorders. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109, supplément 2, 17261-17265.

[31] KAUFMANN, L., MAZZOCCO, M.M., DOWKER, A., VON ASTER, M., GOBEL, S.M., GRABNER, R.H., HENIK, A., JORDAN, N.C., KARMILOFF-SMITH, A.D., KUCIAN, K., RUBINSTEN, O., SZUCS, D., SHALEV, R., NUERK, H.C (2013). Dyscalculia from a developmental and differential perspective. *Frontiers in Psychology*, 4, 516.

[32] KUCIAN, K., SCHWIZER ASHKENAZI, S., HANGGI, J., ROTZER, S., JANCKE, L., MARTIN, E., VON ASTER, M. (2013). Developmental dyscalculia : a dysconnection syndrome ? *Brain Structure & Function (2013)*, doi: 10.1007/s00429-013-0597-4.

[33] LAFAY, A., SAINT-PIERRE, M.C., MACOIR, J. (2013). Développement des systèmes numériques non symboliques et prédicteurs de réussite mathématique. *Glossa*, 112, 1-17.

[34] LEROY-MALHERBE, V. (2005). Symposium A. VAN HOUT : le calcul Bruxelles, 29 octobre 2004. *Motricité Cérébrale*, 26(3), 106-110.

[35] MAZZOCCO, M.M. (2009). Mathematical learning disability in girls with Turner syndrome : a challenge to defining MLD and its subtypes. *Developmental Disabilities Research Reviews,* 15(1), 35-44.

[36] MURPHY, M.M. (2009). A review of mathematical learning disabilities in children with fragile X syndrome. *Developmental Disabilities Research Reviews,* 15, 21-27.

[37] NOEL, M.P., ROUSSELLE, L. (2011). Developmental changes in the profiles of dyscalculia : an explanation based on a double exact-and-approximate number representation model. *Frontiers in Human Neuroscience*, 5, 165.

[38] O'HEARN, K., LUNA, B. (2009). Mathematical skills in Williams syndrome : insight into the importance of underlying representations. *Developmental Disabilities Research Reviews*, 15(1), 11-20.

[39] PIAGET, J., SZEMINSKA, A. (1980). *La genèse du nombre chez l'enfant*. Neuchâtel, Paris : Delachaux & Niestlé, 317p.

[40] PIAZZA, M. (2010). Neurocognitive start-up tools for symbolic number representations. *Trends in Cognitive Sciences,* 14(12), 542-551.

[41] ROGGEMAN, C., VERGUTS, T., FIAS, W. (2007). Priming reveals differential coding of symbolic and non-symbolic quantities. *Cognition,* 105(2), 380–394.

[42] ROUSSELLE, L., PALMERS, E., NOEL, M.P. (2004). Magnitude comparison in preschoolers : What counts ? Influence of perceptual variables. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87, 57-84.

[43] ROUSSELLE, L., NOEL, M.P. (2007). Basic numerical skills in children with mathematics learning disabilities : A comparison of symbolic vs non symbolic number magnitude processing. *Cognition*, 102, 361-395.

[44] SOPHIAN, C. (2009). Les connaissances numériques des jeunes enfants.

Encyclopédie sur le développement des jeunes enfants, 1-7. http://www.enfant-encyclopedie.com/documents/SophianFRxp.pdf

[45] WHITE, S.L.J., SZUCS, D., SOLTESZ, F. (2012). Symbolic number : the integration of magnitude and spatial representations in children aged 6 to 8 years. *Frontiers in Psychology*, 2, 392.

XIII. ANNEXES

XIII.1. Annexe A : Protocole utilisé pour la passation des épreuves

Protocole

1ère séance : caractéristiques cognitives

1) Contrôle du niveau de connaissances numériques

a) Épreuve d'énonciation de la chaîne verbale : / 20

(score : dernier nombre de la suite stable ; arrêt à 20)

- Consigne : « *Montre-moi jusqu'où tu sais compter* ».

b) Épreuve de comptage / dénombrement : / 5

- Consigne : « *Compte les points et dis-moi combien il y en a sur cette carte* ».

- Ordre de passation : 3 7 9 12 18

c) Épreuve de constitution de collections : / 5

- Consigne : « *Donne-moi n petits carrés s'il te plaît* ».

- Ordre de passation : 2 4 6 9 12

d) Épreuve de comptage en écriture arabe : / 20

(score : dernier nombre de la suite stable ; arrêt à 20)

- Consigne : « *J'ai commencé ici* (écrire 1, 2), *je voudrais que tu continues en écrivant le plus loin que tu sais* ».

e) Lignes numériques : / 9

- Consigne : « *Sur cette feuille, il y a des échelles de nombres. Le premier trait ici* (le montrer) *correspond à zéro. Le second trait* (le montrer) *correspond à dix. Cette échelle de nombres va donc de 0 à 10. Je voudrais que tu indiques avec un trait où tu mettrais 3* (puis 7, 1, 5, 2, 9, 6, 4, 8) ».

f) Épreuve de reconnaissance de chiffres arabes : / 8

- Consigne : « *Voici des nombres. Peux-tu les lire tout haut ?* ».

- Ordre de présentation : 3, 5, 8, 10, 13, 15, 18, 20.

2) Bilan de langage

Évaluation du niveau de performance en verbal : épreuve de vocabulaire de la Némi 2

Vocabulaire

Vingt-sept items, classés par ordre de difficulté croissante, évaluent la capacité de l'enfant à connaître et à définir des mots.

Matériel

Cahier de passation

Règle de départ

L'épreuve débute avec deux items d'essai cotés.

Age	Item de départ	Items d'essai
De 4 à 5 ans 11 mois	1	1 et 2
De 6 à 7 ans 11 mois	4	4 et 5
De 8 à 9 ans 11 mois	6	6 et 7
De 10 à 11 ans 11 mois	8	8 et 9
A partir de 12 ans	10	10 et 11

Règle de retour

Si un enfant âgé de 6 ans ou plus échoue (note 0) aux **deux premiers** items administrés, revenir en arrière jusqu'à l'obtention de deux réussites consécutives.

Règle d'arrêt

Arrêt après **3 échecs** consécutifs.

Consignes d'administration

Dire : *Je vais te dire des mots et te demander ce qu'ils veulent dire. Il y en a que tu connais bien, d'autres qui te sont moins familiers et enfin, quelques-uns que tu ne connais pas du tout.*

Le psychologue peut répéter le mot à définir mais ne doit pas l'insérer dans une phrase porteuse d'un contexte qui aiderait l'enfant.

En cas de réponses incorrectes ou incomplètes au premier item d'essai, donner la bonne réponse et passer à l'item d'essai suivant.

Cotation

Les deux premiers items que l'on propose à l'enfant sont considérés comme des items d'essai. Si l'enfant donne une réponse incorrecte à l'un ou l'autre, attribuer 0 point et donner la bonne réponse.

Les cinq premiers items sont cotés 0 ou 1 point, tandis que les vingt-deux suivants reçoivent une cotation ternaire 0, 1 ou 2 points.

La réponse est considérée comme correcte :

- si elle correspond exactement aux réponses proposées dans ce manuel,
- si elle n'est pas prévue dans les réponses proposées dans ce manuel mais, à l'évidence ou après recherche, elle apparaît comme pertinente.

Les enfants, âgés de 6 ans ou plus, obtiennent les points correspondants aux items précédents, non administrés, lorsqu'ils ont obtenu 1 point à au moins un des deux items d'essai.

ATTENTION : Les problèmes d'articulation du langage n'entrent pas en jeu pour la cotation de cette épreuve.

Très souvent, il est nécessaire de demander à l'enfant de préciser sa réponse. Le signe (?), après un exemple de réponse, indique qu'il faut demander des précisions.

Description des items

1. Chaise

Qu'est-ce que c'est une chaise ?

1 point : «Pour s'asseoir». «Pour monter dessus».

0 point : L'enfant montre une chaise. «Pour manger».

2. Fourchette

Qu'est-ce c'est une fourchette ?

2 points : «Pour manger». «Pour piquer». «Pour prendre la viande». «Les pâtes». «Les saucisses», etc.

0 point : «Pour piquer». «Pour prendre» (?).

3. Bottes

Qu'est-ce que c'est des bottes ?

1 point : «Pour marcher». «Pour se promener». «Pour aller dans l'eau». «Dans la forêt». «Pour aller dehors». «Pour ne pas se mouiller les pieds».

0 point : «Qu'on met aux pieds» (?).

6/7ans

4. Cheval

Qu'est-ce que c'est un cheval ?

1 point : Un animal. «Pour monter dessus». «Pour galoper». «Pour se promener sur son dos». «Pour faire des courses».

0 point : «Pour se promener» (?). «Pour courir». L'enfant mime le cheval au galop ou reproduit son hennissement.

5. Toboggan

Qu'est-ce que c'est un toboggan ?

1 point : «Pour glisser». «Pour descendre vite». «Tu te lances dessus et tu te laisses emporter».

0 point : «Un jeu» (?). «Pour jouer». «Pour descendre». «C'est un portique».

6. Carotte

Qu'est-ce que c'est une carotte ?

2 points : Plante, légume, plante cultivée pour sa racine comestible.

1 point : «Pour les lapins» (?).«C'est un aliment». «Cela se mange». «Pour faire la soupe». «C'est dans le jardin».

0 point : «C'est bon pour les yeux» (?). «C'est au marché» (?). «C'est rouge». «C'est orange». «C'est un triangle avec une plante dessus».

7. Masque

Qu'est-ce que c'est un masque ?

2 points : «Pour se déguiser». «Pour se cacher le visage». «Pour se protéger le visage».

1 point : «Pour se mettre sur la tête, la figure». «Pour se cacher». «Pour changer de tête». «Pour ne pas qu'on nous reconnaisse». «Pour se protéger».

Exemples de masques : masque de carnaval, masque de plongée, «pour aller sous l'eau», masque à oxygène.

0 point : «Pour la fête». «Pour le carnaval». «Pour Halloween». «On le porte quand c'est carnaval».

8. Hiver

Qu'est-ce que c'est que l'hiver ?

2 points : Saison, période qui succède à l'automne et précède le printemps, saison la plus froide.

1 point : «Quand il fait froid». «Quand tombe la neige». «Période froide».

0 point : «Période de l'année». «Un temps». «Pour faire un bonhomme de neige, une bataille de boules de neige».

9. Voiture

Qu'est-ce que c'est une voiture ?

2 points : Véhicule, automobile : «auto».

1 point : «Pour rouler». «Moyen de transport». «Pour transporter des gens». «Pour se déplacer». «Pour voyager».

0 point : «Pour nous conduire». «Pour se promener». «Pour aller en ville, à l'école, etc.» (?). «Cela sert à aller quelque part».

10. Marteau

Qu'est-ce que c'est un marteau ?

2 points : Outil, masse.

Description de l'objet : outil de percussion formé d'une tête en acier dur et d'un manche. Battant métallique servant de heurtoir à une porte. Pièce d'horlogerie qui frappe les heures sur un timbre. Pièce garnie de feutre qui frappe la corde d'un piano. Sphère métallique munie d'un fil d'acier et d'une poignée, que lancent les athlètes.

1 point : «Pour taper». «Pour enfoncer les pointes». «Maillet». «Pour clouer».

0 point : «Pour faire du bricolage» (?). «Pour travailler». «Pour réparer».

11. Trottoir

Qu'est-ce que c'est un trottoir ?

2 points : Partie latérale d'une rue, réservée aux piétons. Voie réservée aux piétons. «Pour que les piétons marchent en sécurité dans la rue». «Pour les piétons». «Un aménagement pour les piétons».

1 point : «Pour ne pas se faire écraser par les voitures». «Le côté de la route». «Pour éviter de marcher sur la route». «C'est exprès pour marcher».

0 point : «Pour rouler». «C'est sur les côtés». «C'est interdit aux voitures».

12. Réfléchir

Que veut dire réfléchir ?

2 points : Penser, examiner longuement. Se poser une question à soi-même et chercher la réponse. Méditer, se concentrer. «Essayer de s'expliquer quelque chose dans la tête». «Essayer de résoudre dans sa tête». «Penser à quelque chose».

Renvoyer la lumière, renvoyer une image.

1 point : «Faire un problème». «Quand on cherche une réponse». «Essayer de trouver (le mot qu'on ne sait pas, la solution, etc.)».

0 point : «Dans sa tête».

13. Autorisation

Qu'est-ce que c'est une autorisation ?

2 points : Permission. Accord.

1 point : «Quand on a le droit». «Si on peut le faire». «Quand on nous permet de faire quelque chose». «Quand les parents sont d'accord». «C'est permis». «Obtenir quelque chose». «Quand je demande à maman de regarder la télé et si j'ai été gentil, elle me donne l'autorisation».

0 point : «Il faut demander». «Interdit». «Obéir».

14. Paresseux

Que veut dire paresseux ?

2 points : Qui répugne au travail, à l'effort, fainéant. Qui n'aime pas se fatiguer. Qui ne veut rien faire. «Qui ne veut pas travailler». «Flemmard».

Mammifère (arboricole et végétarien) aux mouvements très lents.

1 point : «Lent, endormi, mou» ; «Qui ne veut pas se lever». «Qui ne veut pas faire quelque chose». «Un singe qui dort».

0 point : «Qui ne travaille pas» (?). «Qui n'ose pas trop demander». «Qui dort tout le temps». «Qui est toujours assis».

15. Calendrier

Qu'est-ce que c'est un calendrier ?

2 points : Système de division du temps. Tableau des jours de l'année. Programme précis échelonné dans le temps.

1 point : «Les jours de l'année, les mois». «Pour savoir quel jour on est». «Où on sait quand c'est le (9, le 6, etc.)».

0 point : «Calendrier de la poste». «Calendrier de l'Avent». «Y'a les dates dessus».

16. Roman

Qu'est-ce que c'est un roman ?

2 points : Oeuvre littéraire, récit en prose assez long. Longue histoire compliquée, riche en épisodes imprévus. «Un livre imaginaire qui raconte des histoires».

1 point : «Une histoire». «Un livre».

0 point : «Une lecture». «Une lecture spéciale». «Un conte».

17. Germer

Que veut dire germer ?

2 points : Idée d'un commencement. Développer son germe, en parlant d'une graine, d'une pomme de terre. Commencer à se développer. Naître pour une idée.

1 point : «La graine se développe». «On plante et après, la graine elle fleurit».

0 point : Pousser, fleurir, éclore. «Le bourgeon s'ouvre». «La fleur pousse».

18. Courage

Qu'est-ce que le courage ?

2 points : Force de caractère, force morale, fermeté devant le danger, bravoure, vaillance, audace. Ardeur, zèle pour entreprendre. «Quand on affronte les dangers qui nous font peur». «Etre audacieux».

1 point : «Ne pas avoir peur, oser faire les choses même s'il y a du danger.» «Quelque chose est très difficile et on y va quand même».

0 point : «Etre capable de faire des choses difficiles» (?). «Etre fort».

19. Satisfaire

Que veut dire satisfaire ?

2 points : Répondre à la demande, au besoin de quelqu'un, contenter. Agir de façon à contenter, à assouvir un besoin. Remplir les conditions requises.

1 point : «Faire ce qu'on nous dit». «Faire plaisir».

0 point : Définition de satisfait. «Etre content».

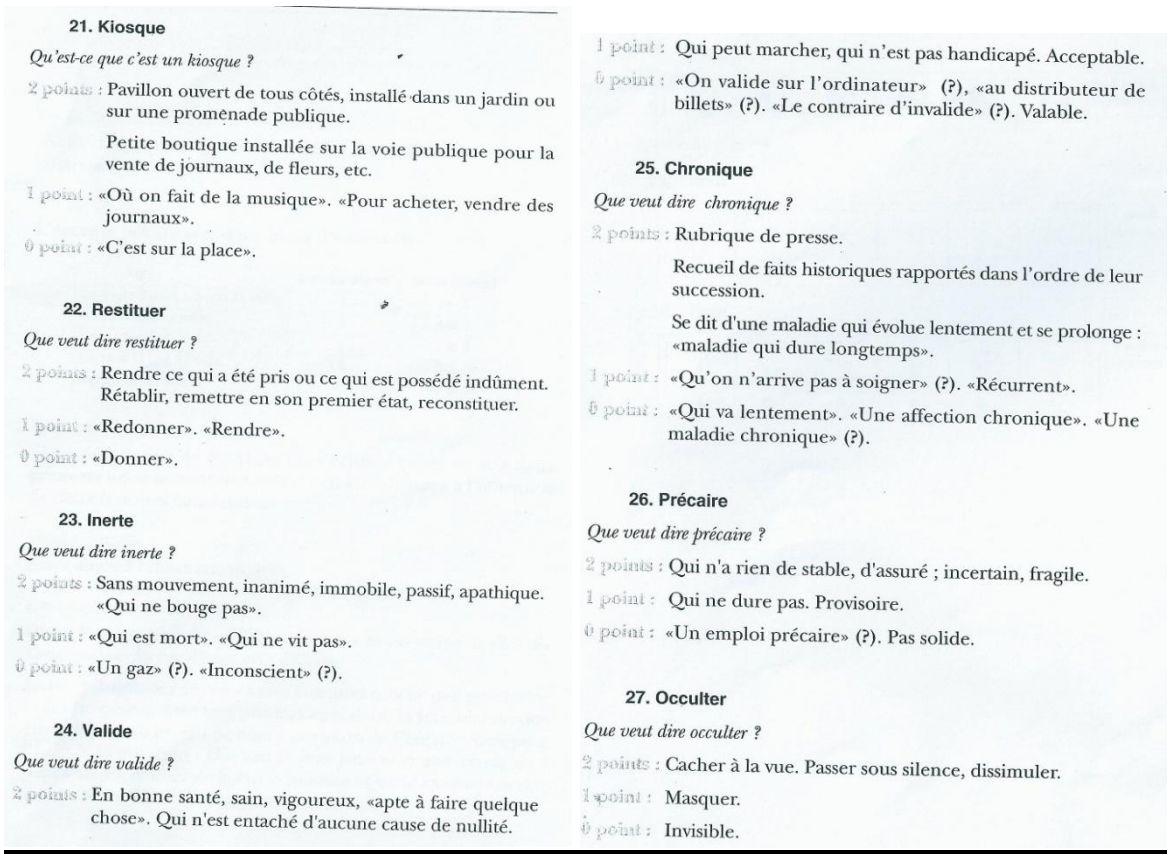
20. Injustice

Qu'est-ce qu'une injustice ?

2 points : Qui n'est pas conforme à l'équité ; arbitraire, inique.

1 point : «Qui n'est pas juste». «Qui n'est pas égal».

0 point : Egoïste. «C'est quand on n'est pas d'accord». «Ce qui est injuste». «C'est pas normal».



21. Kiosque

Qu'est-ce que c'est un kiosque ?

2 points : Pavillon ouvert de tous côtés, installé dans un jardin ou sur une promenade publique.

Petite boutique installée sur la voie publique pour la vente de journaux, de fleurs, etc.

1 point : «Où on fait de la musique». «Pour acheter, vendre des journaux».

0 point : «C'est sur la place».

22. Restituer

Que veut dire restituer ?

2 points : Rendre ce qui a été pris ou ce qui est possédé indûment. Rétablir, remettre en son premier état, reconstituer.

1 point : «Redonner». «Rendre».

0 point : «Donner».

23. Inerte

Que veut dire inerte ?

2 points : Sans mouvement, inanimé, immobile, passif, apathique. «Qui ne bouge pas».

1 point : «Qui est mort». «Qui ne vit pas».

0 point : «Un gaz» (?). «Inconscient» (?).

24. Valide

Que veut dire valide ?

2 points : En bonne santé, sain, vigoureux, «apte à faire quelque chose». Qui n'est entaché d'aucune cause de nullité.

1 point : Qui peut marcher, qui n'est pas handicapé. Acceptable.

0 point : «On valide sur l'ordinateur» (?), «au distributeur de billets» (?). «Le contraire d'invalide» (?). Valable.

25. Chronique

Que veut dire chronique ?

2 points : Rubrique de presse.

Recueil de faits historiques rapportés dans l'ordre de leur succession.

Se dit d'une maladie qui évolue lentement et se prolonge : «maladie qui dure longtemps».

1 point : «Qu'on n'arrive pas à soigner» (?). «Récurrent».

0 point : «Qui va lentement». «Une affection chronique». «Une maladie chronique» (?).

26. Précaire

Que veut dire précaire ?

2 points : Qui n'a rien de stable, d'assuré ; incertain, fragile.

1 point : Qui ne dure pas. Provisoire.

0 point : «Un emploi précaire» (?). Pas solide.

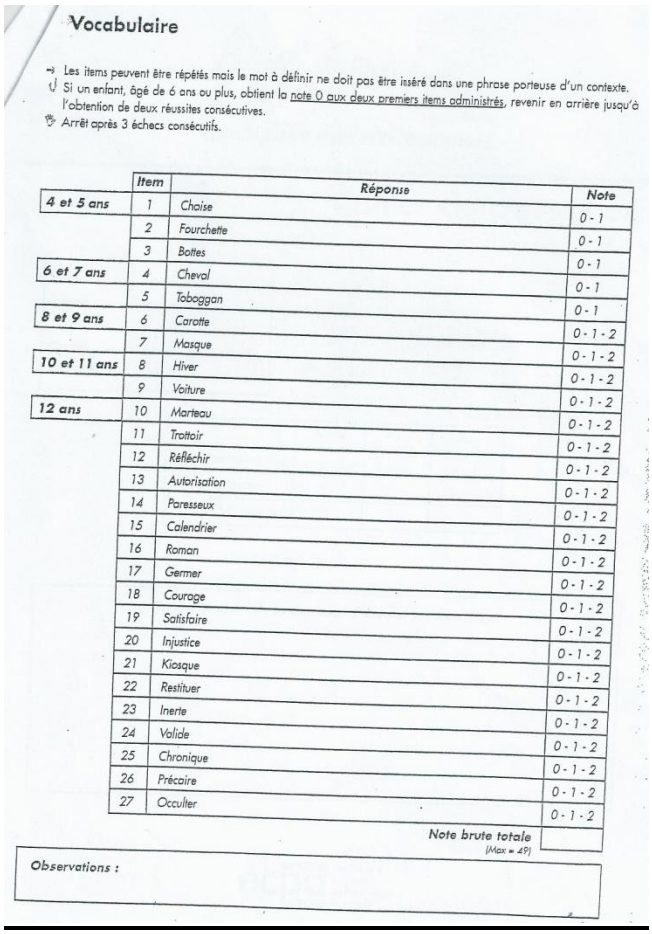
27. Occulter

Que veut dire occulter ?

2 points : Cacher à la vue. Passer sous silence, dissimuler.

1 point : Masquer.

0 point : Invisible.



Vocabulaire

→ Les items peuvent être répétés mais le mot à définir ne doit pas être inséré dans une phrase porteuse d'un contexte.
↺ Si un enfant, âgé de 6 ans ou plus, obtient la note 0 aux deux premiers items administrés, revenir en arrière jusqu'à l'obtention de deux réussites consécutives.
✋ Arrêt après 3 échecs consécutifs.

	Item	Réponse	Note
4 et 5 ans	1	Chaise	0 - 1
	2	Fourchette	0 - 1
	3	Bottes	0 - 1
6 et 7 ans	4	Cheval	0 - 1
	5	Toboggan	0 - 1
8 et 9 ans	6	Carotte	0 - 1 - 2
	7	Masque	0 - 1 - 2
10 et 11 ans	8	Hiver	0 - 1 - 2
	9	Voiture	0 - 1 - 2
12 ans	10	Marteau	0 - 1 - 2
	11	Trottoir	0 - 1 - 2
	12	Réfléchir	0 - 1 - 2
	13	Autorisation	0 - 1 - 2
	14	Paresseux	0 - 1 - 2
	15	Calendrier	0 - 1 - 2
	16	Roman	0 - 1 - 2
	17	Germer	0 - 1 - 2
	18	Courage	0 - 1 - 2
	19	Satisfaire	0 - 1 - 2
	20	Injustice	0 - 1 - 2
	21	Kiosque	0 - 1 - 2
	22	Restituer	0 - 1 - 2
	23	Inerte	0 - 1 - 2
	24	Valide	0 - 1 - 2
	25	Chronique	0 - 1 - 2
	26	Précaire	0 - 1 - 2
	27	Occulter	0 - 1 - 2
		Note brute totale (Max = 49)	

Observations :

Figures 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 et 11 : Protocole de l'épreuve de vocabulaire de la Némi 2

2e séance : comparaisons de quantités

1) Épreuve contrôle de comparaisons de réglettes : 10 items

- Consigne : *« Maintenant, tu vas voir apparaître des baguettes sur l'écran. Montre-moi quelle est la plus grande des 2 baguettes en appuyant sur l'une des 2 touches blanches du clavier. Appuie le plus vite possible sans te tromper ».*

Distance entre les réglettes : 2 cm ; P = petit ; G = grand

Image n°	**R1 PG**	**R2 PG**	**R3 PG**	**R4 PG**	**R5 PG**
PG	4 vs 6	4,5 vs 6,5	5 vs 7	5,5 vs 7,5	6 vs 8
Image n°	**R1 GP**	**R2 GP**	**R3 GP**	**R4 GP**	**R5 GP**
GP	6 vs 4	6,5 vs 4,5	7 vs 5	7,5 vs 5,5	8 vs 6

Ordre (aléatoire) de passation

1) **R1 PG**	2) **R3 GP**	3) **R4 PG**	4) **R2 PG**	5) **R5 PG**
6) **R3 PG**	7) **R2 GP**	8) **R1 GP**	9) **R4 GP**	10) **R5 GP**

2) Épreuves de comparaisons : cercles, jetons, surfaces, numéraux verbaux et chiffres arabes

Présentation des 44 items de la partie expérimentale (22PG + 22GP) valable pour les cercles et chacune des deux modalités analogiques discontinues (jetons et surfaces) et des deux modalités symboliques (numéraux verbaux et chiffres arabes).

Prise en compte du rapport et de la distance pour chacune des représentations analogiques et symboliques :

Rapport / Distance	1/2	2/3	3/4
1	1 vs 2	2 vs 3	3 vs 4
2	2 vs 4	4 vs 6	6 vs 8
3	3 vs 6	6 vs 9	9 vs 12

Les 8 premiers items de toutes les épreuves de comparaisons sont construits à partir des paires 1 vs 4 et 1 vs 3 (1 vs 4g, 4 vs 1g, 1 vs 4f, 4 vs 1f, 1 vs 3g, 3 vs 1g, 1 vs 3f, 3 vs 1f) ; ils sont considérés comme des exemples et contribuent à une familiarisation avec la tâche. Un surplus d'explication est nécessaire pour la modalité verbale.

	items en ordre G/F			items en ordre F/G	
1	1 vs 4g	4 vs 1g		1 vs 4f	4 vs 1f
2	1 vs 3g	3 vs 1g		1 vs 3f	3 vs 1f
3	1 vs 2g	2 vs 1g		1 vs 2f	2 vs 1f
4	2 vs 3g	3 vs 2g		2 vs 3f	3 vs 2f
5	3 vs 4g	4 vs 3g		3 vs 4f	4 vs 3f
6	2 vs 4g	4 vs 2g		2 vs 4f	4 vs 2f
7	4 vs 6g	6 vs 4g		4 vs 6f	6 vs 4f
8	6 vs 8g	8 vs 6g		6 vs 8f	8 vs 6f
9	3 vs 6g	6 vs 3g		3 vs 6f	6 vs 3f
10	6 vs 9g	9 vs 6g		6 vs 9f	9 vs 6f
11	9 vs 12g	12 vs 9g		9 vs 12f	12 vs 9f

Ordre de présentation des items pour chacune des modalités

1	1 vs 4g	**23**	3 vs 6f
2	1 vs 3f	**24**	6 vs 9g
3	3 vs 1f	**25**	12 vs 9g
4	1 vs 3g	**26**	8 vs 6f
5	1 vs 4f	**27**	3 vs 2f
6	4 vs 1f	**28**	2 vs 4f
7	3 vs 1g	**29**	4 vs 6g
8	4 vs 1g	**30**	4 vs 3f
9	3 vs 2g	**31**	1 vs 2g
10	2 vs 4g	**32**	6 vs 3g
11	4 vs 6f	**33**	9 vs 6g
12	4 vs 3g	**34**	9 vs 12g
13	1 vs 2f	**35**	6 vs 8f
14	6 vs 3f	**36**	2 vs 3g
15	9 vs 6f	**37**	4 vs 2g
16	9 vs 12f	**38**	6 vs 4g
17	6 vs 8g	**39**	3 vs 4g
18	2 vs 3f	**40**	2 vs 1f
19	4 vs 2f	**41**	3 vs 6g
20	6 vs 4f	**42**	6 vs 9f
21	3 vs 4f	**43**	12 vs 9f
22	2 vs 1g	**44**	8 vs 6g

a) Épreuve de comparaisons de quantités analogiques continues (cercles) : 44 items

- Présentation de l'item 1 vs 4g.

- Consigne : *« Maintenant, tu vas voir apparaître des cercles sur l'écran. Montre-moi quel est le plus grand des 2 cercles en appuyant sur l'une des 2 touches blanches du clavier. Appuie le plus vite possible sans te tromper ».*

- Présentation de la suite d'items.

b) Épreuve de comparaisons de quantités analogiques discontinues (jetons) : 44 items

- Présentation de l'item 1 vs 4g.

- Consigne : *« Voici deux enfants, un garçon et une fille ; on leur donne des bonbons : voici les bonbons du garçon et voici ceux de la fille. Peux-tu me montrer qui en a le plus en appuyant sur l'une des 2 touches blanches du clavier ? Appuie le plus vite possible sans te tromper ».*

- Présentation de la suite d'items.

c) Épreuve de comparaisons de quantités analogiques discontinues avec contrôle de la densité (surfaces rectangles) : 44 items

- Présentation de l'item 1 vs 4g.

- Consigne : *« Voici deux enfants, un garçon et une fille ; ils ont fait un gâteau d'anniversaire qu'ils vont pouvoir partager. Par exemple* (montrer le premier item d'exemple), *ici la fille a 8 parts et le garçon 3 parts. Je voudrais maintenant que tu me montres qui a le plus de parts en appuyant sur l'une des 2 touches blanches du clavier. Appuie le plus vite possible sans te tromper ».*

- Présentation de la suite d'items.

d) Épreuve de comparaisons de quantités présentées sous forme de numéraux oraux (évaluation de la représentation auditive verbale) : 44 items

- Ouverture de l'image.

- Utilisation de 4 items supplémentaires d'exemple (8 vs 3 ; 2 vs 9 ; 3 vs 10 ; 3 vs 8).

- Consigne énoncée pour les 2 premiers items d'exemple (8 vs 3 ; 2 vs 9) : *« Si je donne n bonbons au garçon* (le montrer) *et p bonbons à la fille* (la montrer), *peux-tu me montrer qui en aura le plus ? Montre-moi le plus vite possible sans te tromper ».*

- Pour les 2 derniers items d'exemple (3 vs 10 ; 3 vs 8), énoncer seulement les nombres, en pointant en même temps l'enfant auquel chaque nombre correspond.

- Présentation des 44 items expérimentaux enregistrés, avec une attention particulière pour les 8 premiers items d'exemple (s'assurer de la compréhension de la consigne).

e) Épreuve de comparaisons de quantités présentées en chiffres arabes (évaluation de la représentation visuelle arabe) : 44 items

- Présentation de l'item 1 vs 4g.

- Consigne : *« Voici toujours nos deux enfants. Si je donne cette quantité de bonbons* (montrer le chiffre 1) *au garçon et cette quantité de bonbons* (montrer le chiffre 4) *à la fille, peux-tu me montrer qui en a le plus en appuyant sur l'une des 2 touches blanches du clavier. Appuie le plus vite possible sans te tromper ».*

- Présentation de la suite d'items.

XIII.2. Annexe B : exemple d'item pour chaque épreuve de comparaisons de quantités

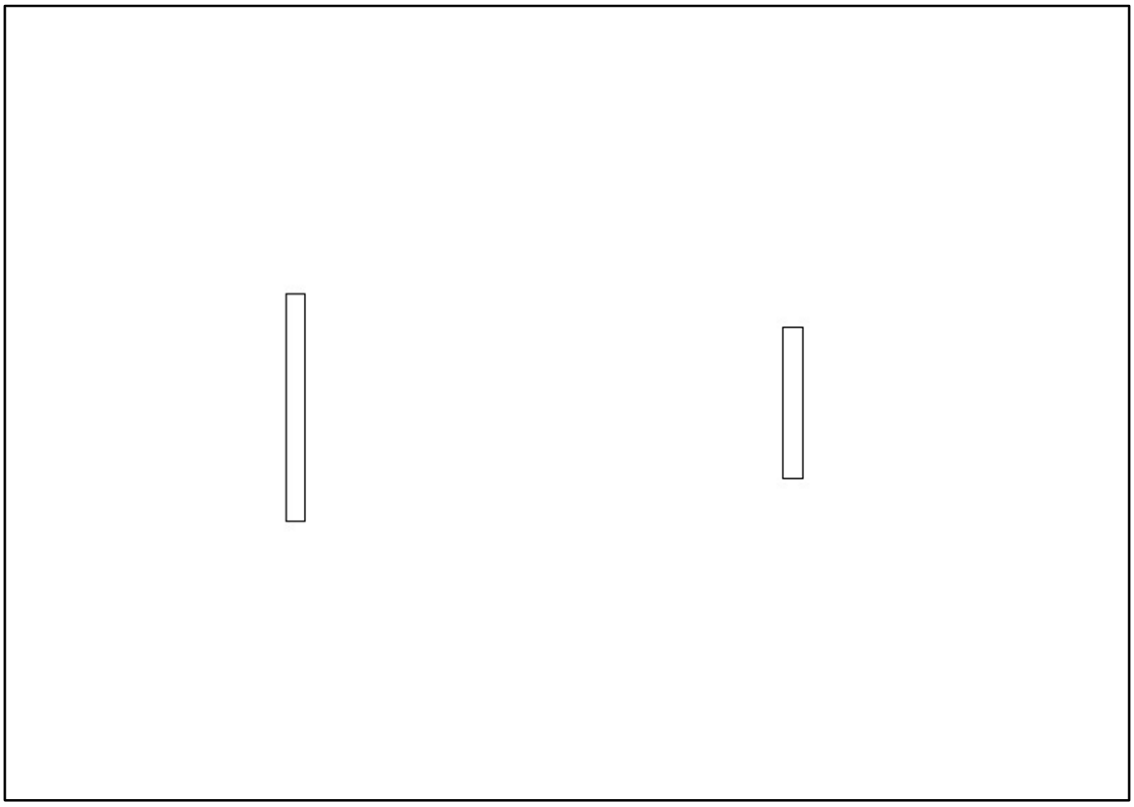


Figure 12 : exemple d'item pour les comparaisons de réglettes (R1 GP)

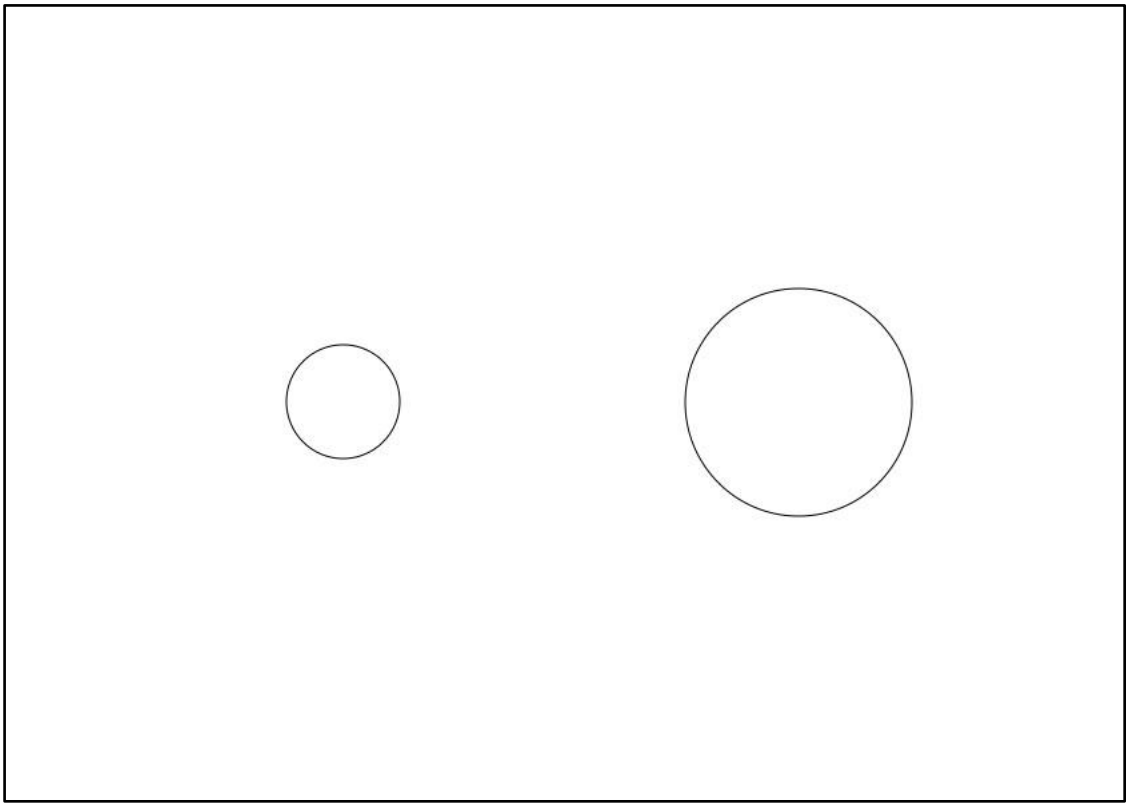


Figure 13 : exemple d'item pour les comparaisons de cercles (3 vs 6f)

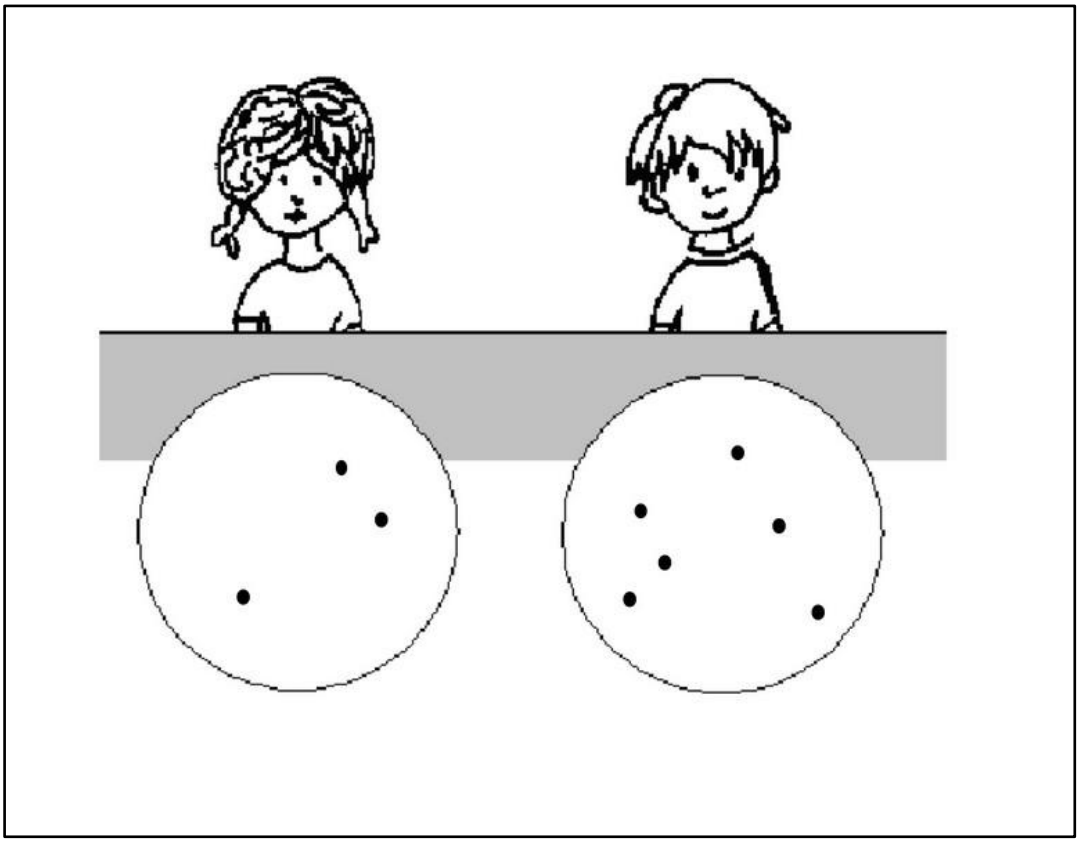


Figure 14 : exemple d'item pour les comparaisons de jetons (3 vs 6f)

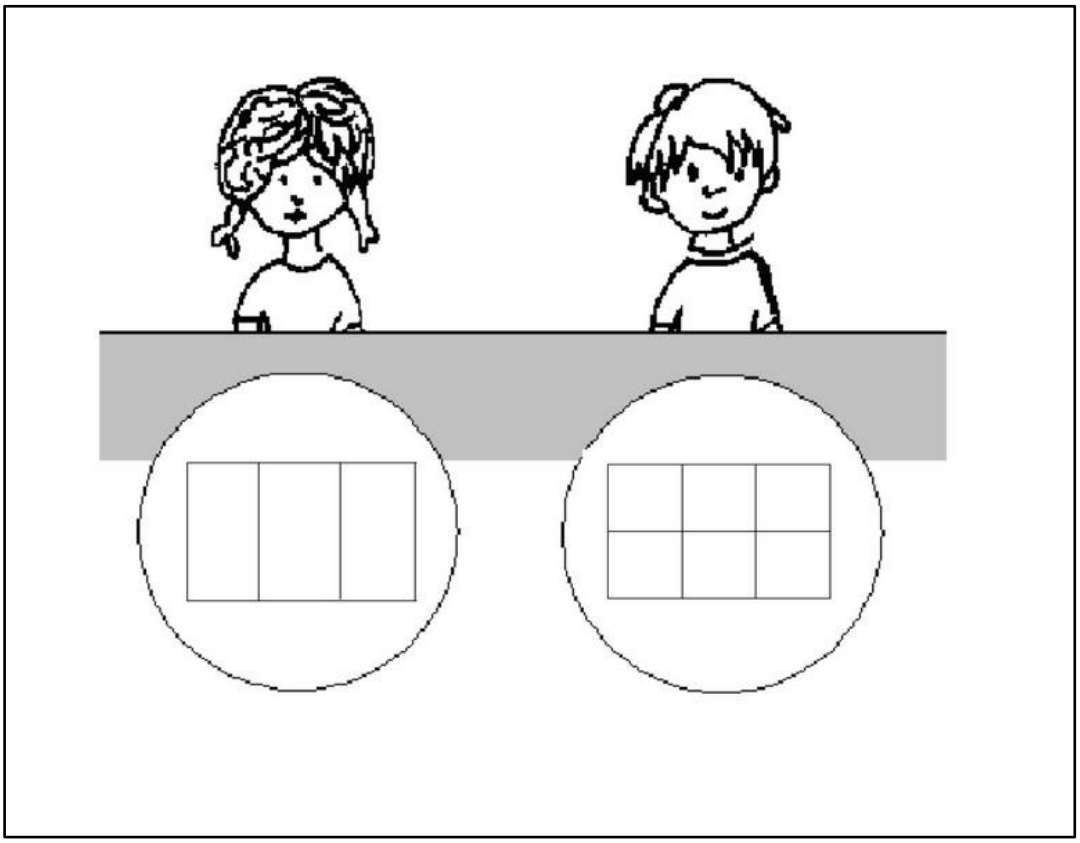


Figure 15 : exemple d'item pour les comparaisons de surfaces rectangles (3 vs 6f)

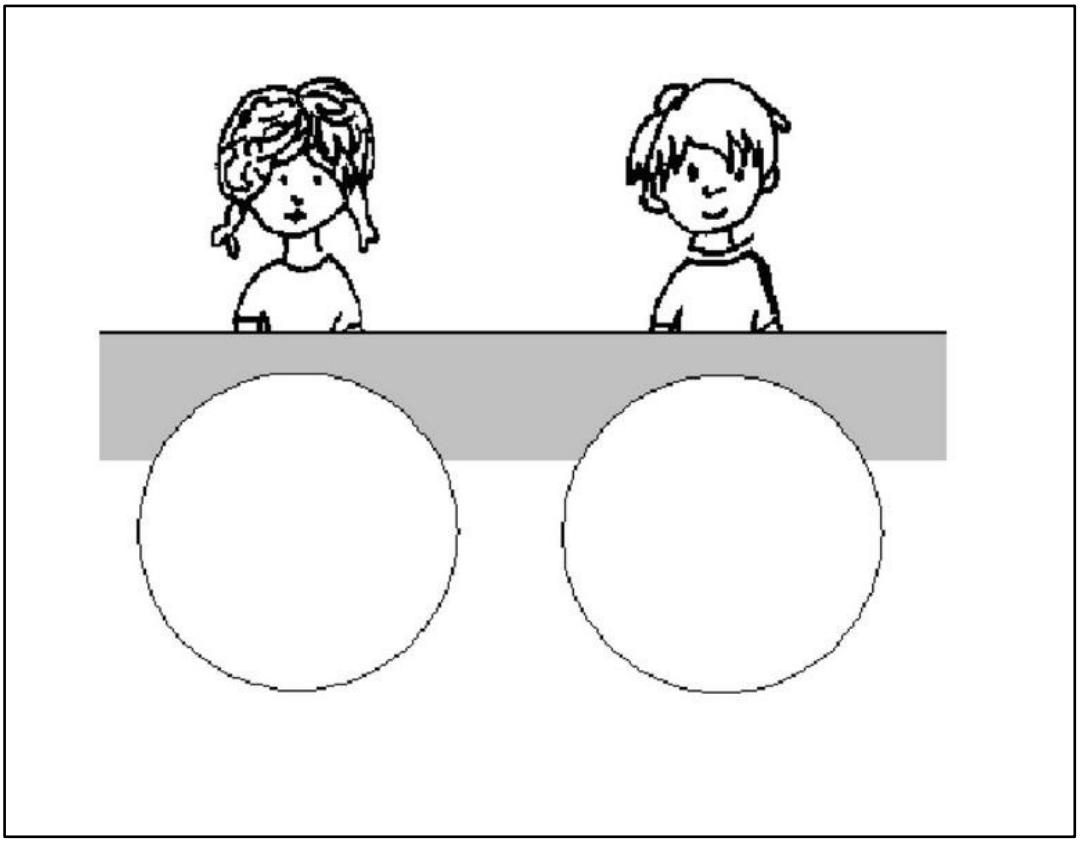


Figure 16 : image pour tous les items des comparaisons de numéraux verbaux

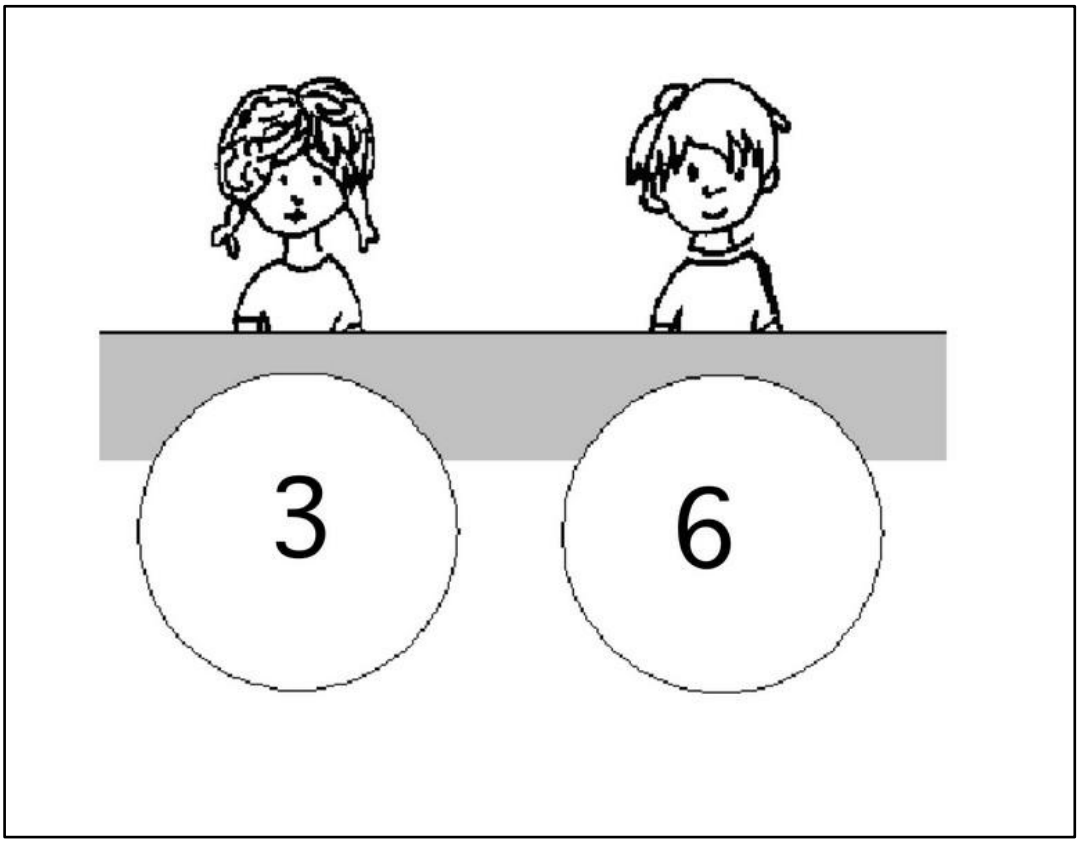


Figure 17 : exemple d'item pour les comparaisons de chiffres arabes (3 vs 6f)

XIII.3. Annexe C : exemples d'écriture en miroir à l'épreuve de comptage en écriture arabe

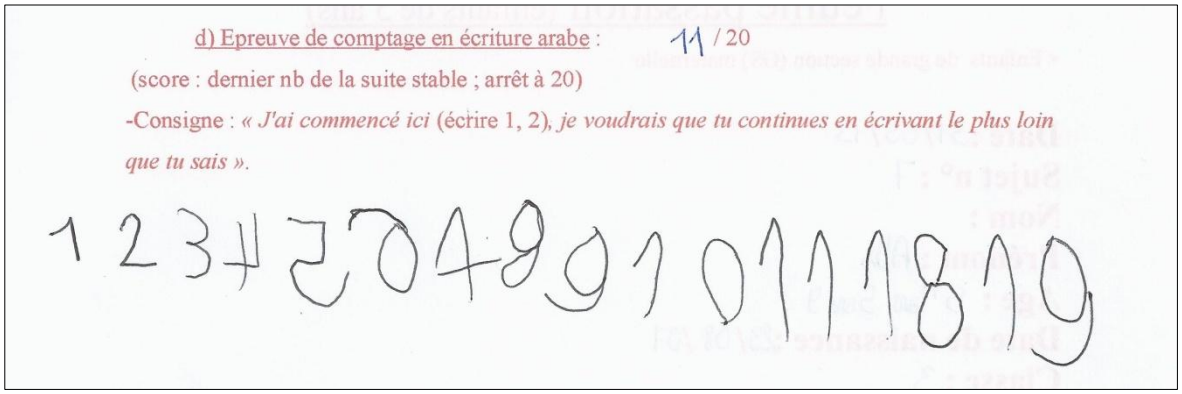


Figure 18 : production de l'enfant n°7 GSM à l'épreuve de comptage en écriture arabe (écriture en miroir des chiffres 4, 5 et 6).

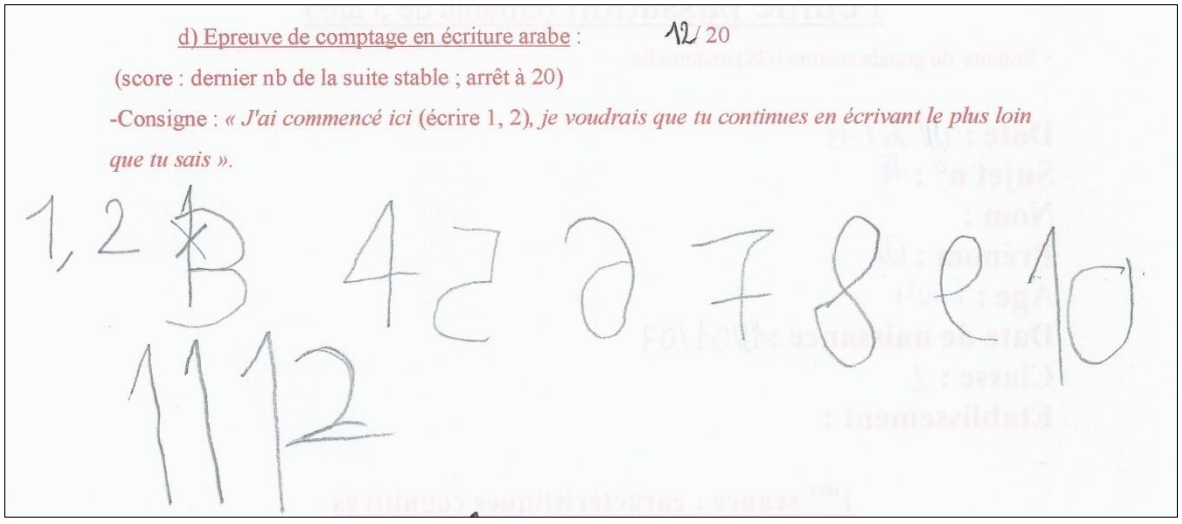


Figure 19 : production de l'enfant n°18 GSM à l'épreuve de comptage en écriture arabe (écriture en miroir des chiffres 5, 6 et 9).

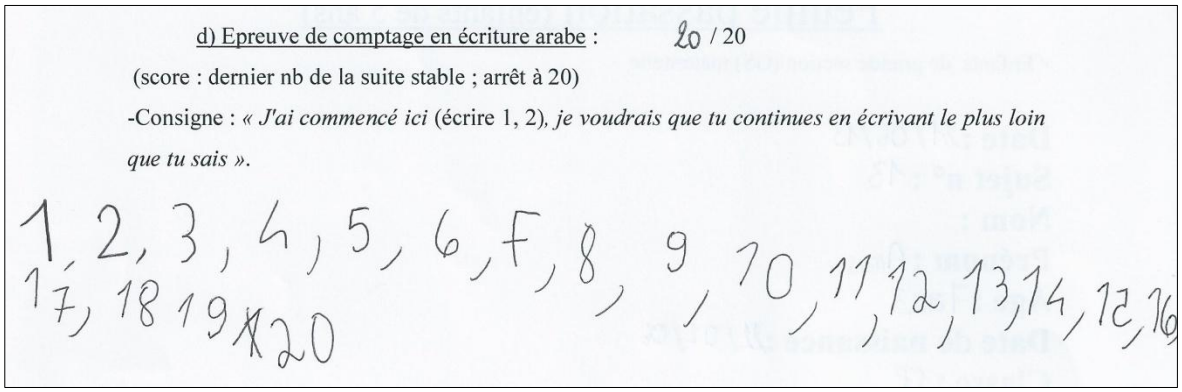
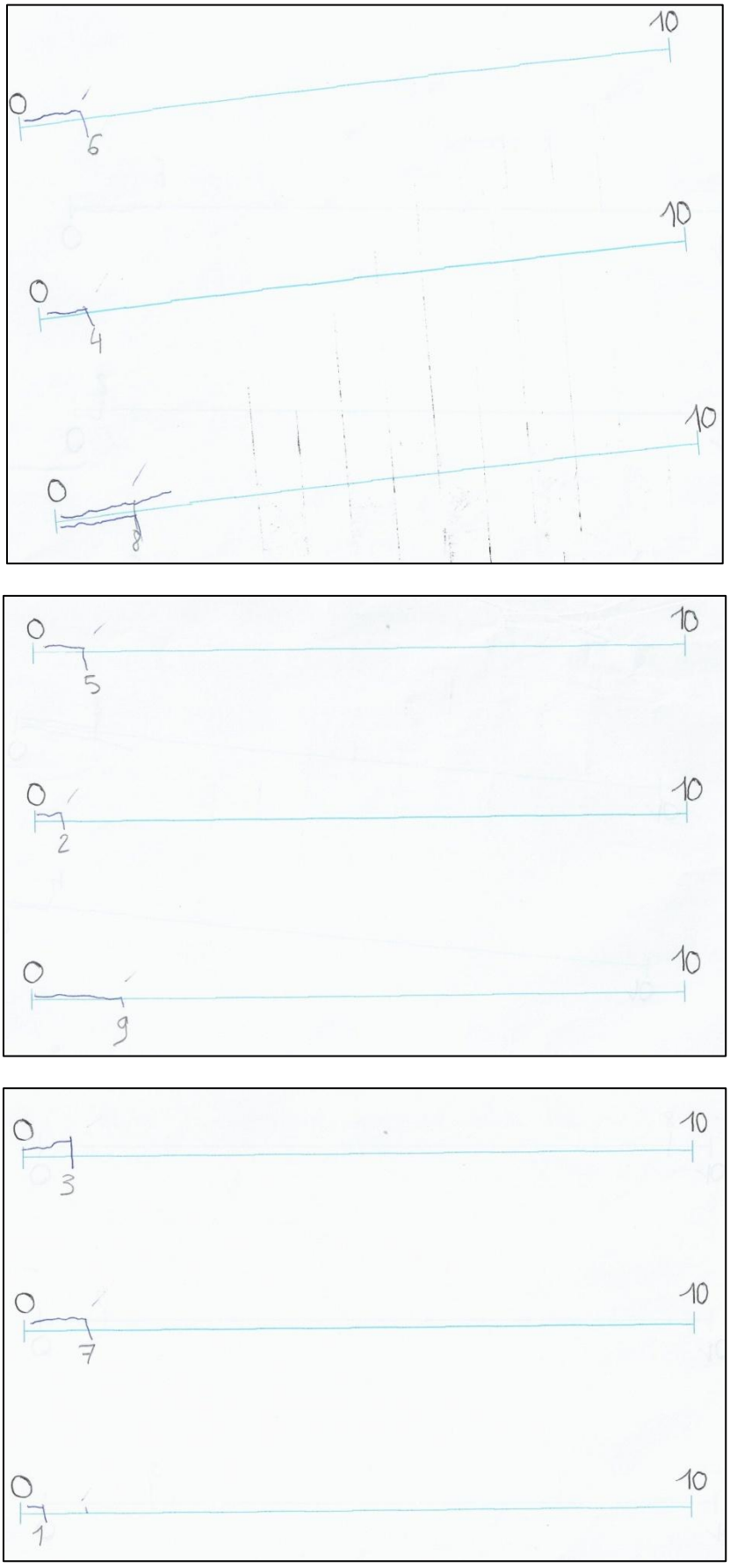
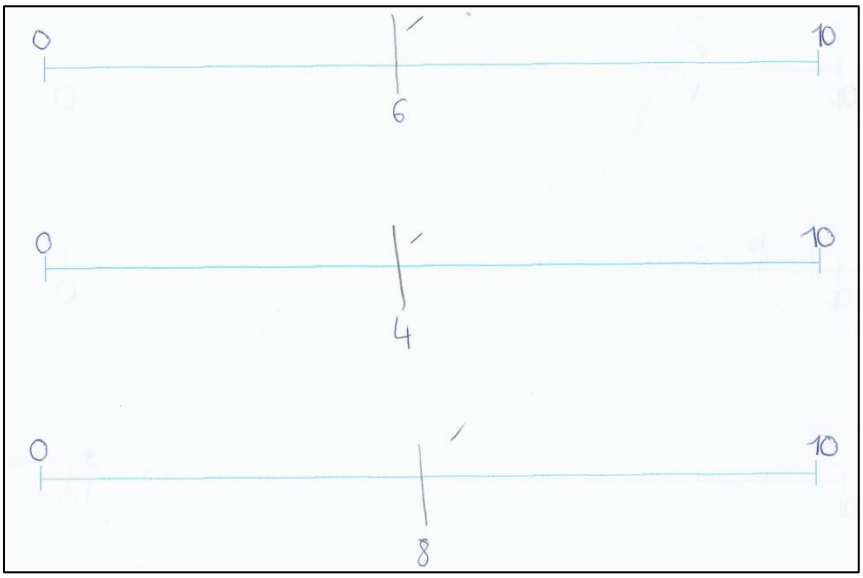


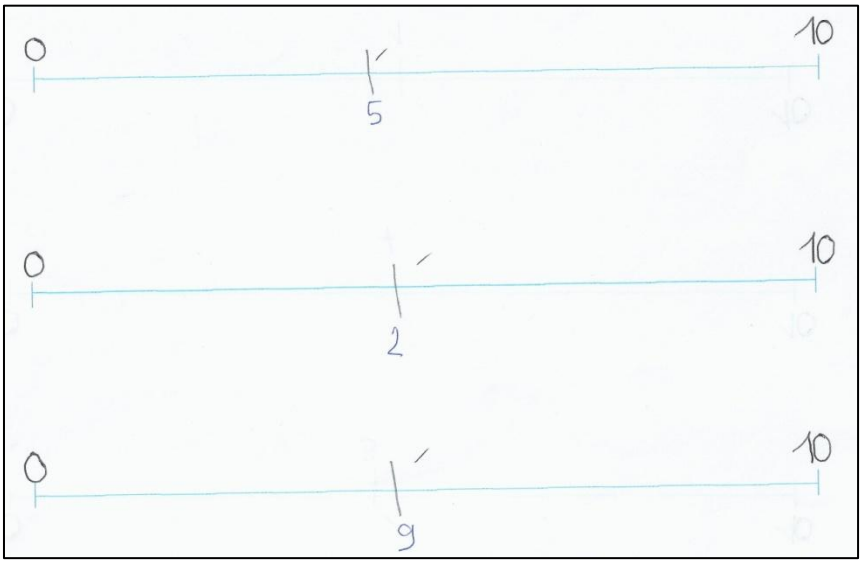
Figure 20 : production de l'enfant n°13 CP à l'épreuve de comptage en écriture arabe (écriture en miroir des chiffres 5 et 7, mais aléatoirement).

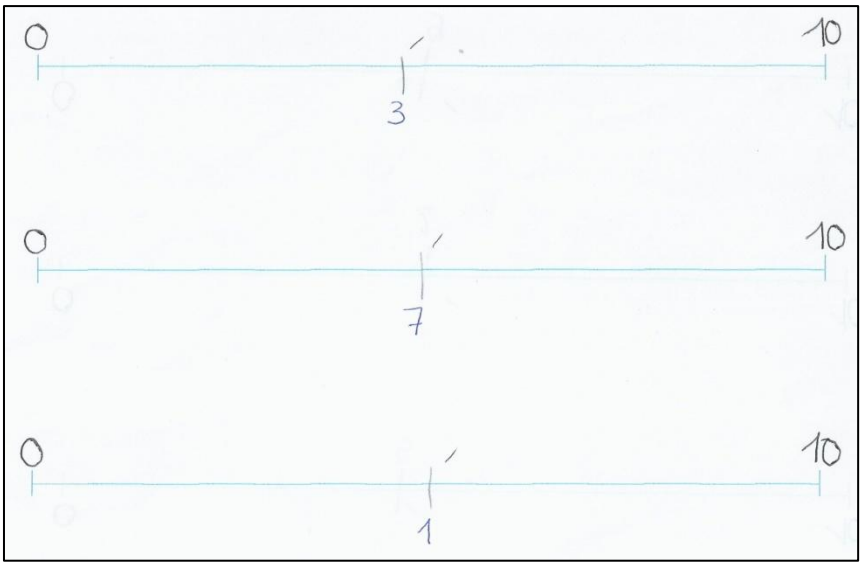
XIII.4. Annexe D : exemples de réponses à l'épreuve des lignes numériques



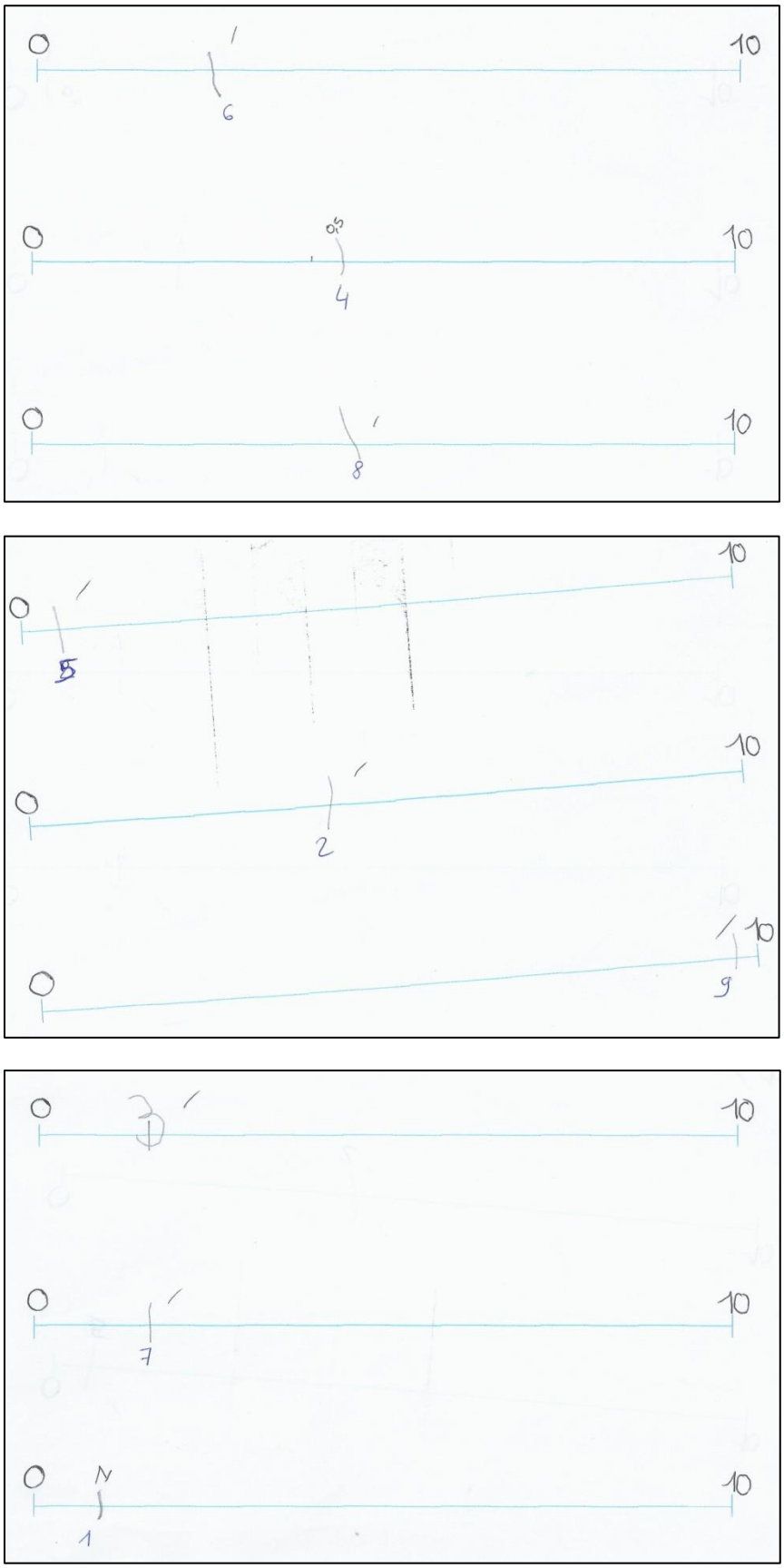
Figures 21, 22 et 23 : productions de l'enfant n° 11 GSM à l'épreuve des lignes numériques (tous les chiffres sont très proches de 0, le 10 n'est pas pris en compte).



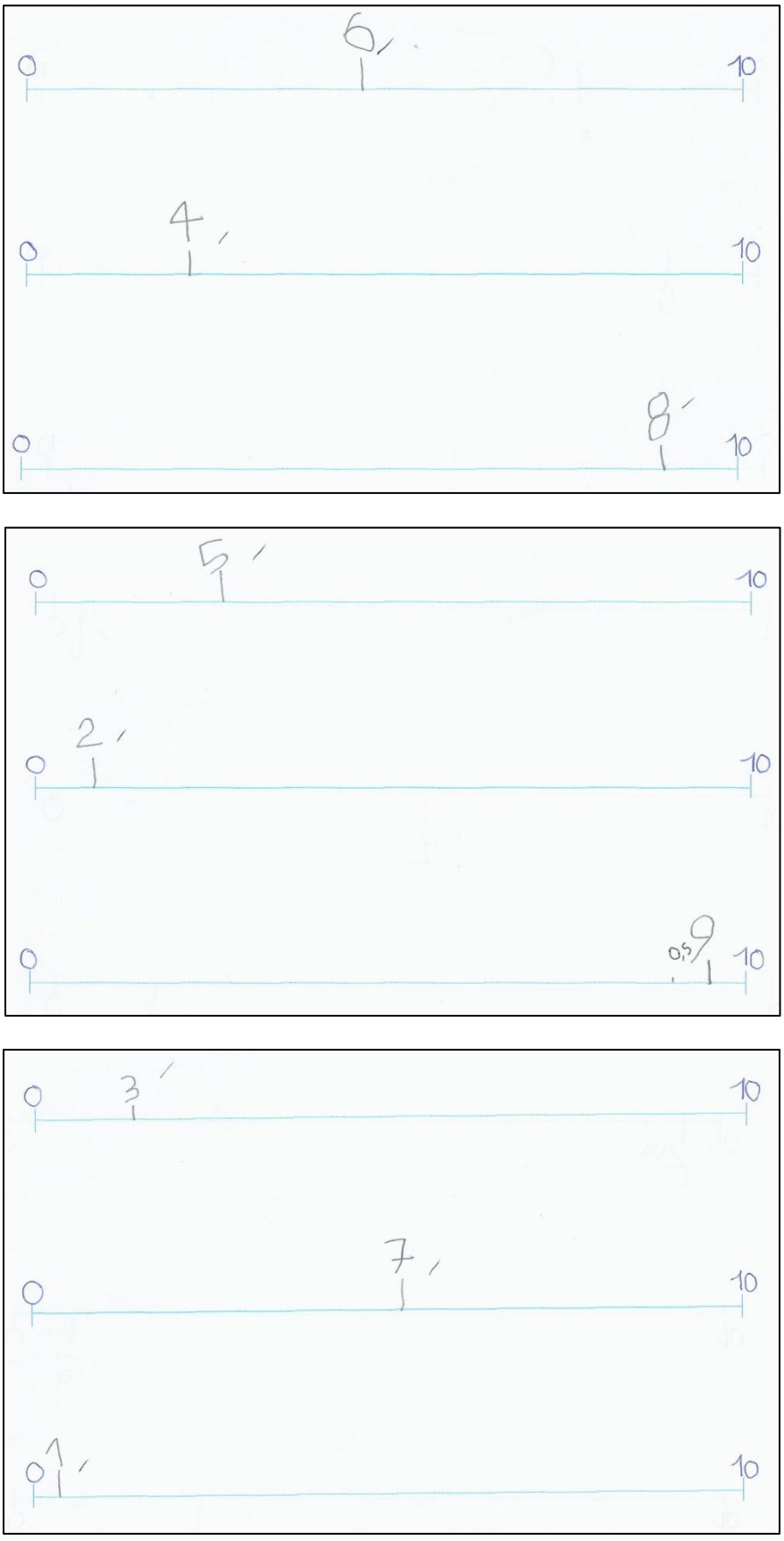




Figures 24, 25 et 26 : productions de l'enfant n° 15 GSM à l'épreuve des lignes numériques (tous les chiffres sont à peu près alignés, au milieu des lignes).



Figures 27, 28 et 29: productions de l'enfant n° 20 GSM à l'épreuve des lignes numériques (incohérences : le 2 est plus éloigné du 0 que le 5 ; le 4 est plus éloigné du 0 que le 6 ; 3 et 7 sont au même niveau sur les lignes numériques).



Figures 30, 31 et 32 : productions de l'enfant n° 22 GSM à l'épreuve des lignes numériques (placement cohérent des chiffres sur les lignes numériques, prise en compte du 10 pour le placement des plus grands chiffres, mais 0,5/8 à cause du manque de précision).

De l'arithmétique non symbolique à l'arithmétique symbolique
From non-symbolic arithmetic to symbolic arithmetic

Résumé

Le modèle du triple code propose 3 représentations des quantités : la représentation analogique innée et les représentations symboliques, verbale et arabe, qui viendraient « s'y greffer ». Plusieurs études ont mis en évidence l'existence de la représentation analogique mais peu s'intéressent à l'articulation entre l'analogique et le symbolique. C'est ce que nous avons étudié, en analysant les résultats d'enfants de GSM et de CP aux comparaisons de quantités, analogiques et symboliques. L'étude des profils individuels montre que la relation analogique / symbolique n'est pas absolue : le symbolique ne dépend pas de l'analogique et peut aboutir à de meilleurs résultats. Comme attendu, l'effet de rapport est présent dans les comparaisons analogiques, mais seulement avec les quantités discontinues. Il apparaît également dans la réussite et / ou la rapidité aux comparaisons symboliques, mais l'absence de significativité conduit à des interprétations prudentes, suggérant que la mise en place de l'articulation entre l'analogique et le symbolique s'effectue pendant cette période du développement, et que cette relation n'est pas encore automatisée en CP. Il serait intéressant de poursuivre ces recherches chez des enfants plus âgés, pour situer le moment où l'activation de l'analogique par les codes symboliques devient automatique.

Mots-clés

Nombre ; développement ; représentation analogique ; représentation symbolique ; modèle du triple code

Abstract

The triple-code model proposes three types of representations of quantities: the innate analogical representation and two symbolic representations, verbal and Arabic, which would be "grafted" on this one. Several studies have shown the existence of analogical representation but a few studies have focused on the link between analogical representation and symbolical representations. This was the purpose this research, by analyzing the children's results in analog and symbolic magnitude comparison tasks in kindergarten and in the first year of primary school. The study of individual profiles shows that the link between analogical and symbolical dimensions is not absolute: the symbolic dimension does not depend on analogic and may lead to better results. As expected, the ratio effect is present in analogic comparisons, but only with discontinuous quantities. It also appears in the success and/or in the speed in symbolic comparisons, but the lack of significance may lead to hasty interpretations, suggesting that the establishment of the relationship between analogical and symbolical dimensions occurs during this period of development and this link is not automated yet in the first year of primary school. It would be interesting to investigate this issue further with older children in order to identify when analogic activation by symbolical codes become automatic.

Keywords

Number ; development ; analogical representation ; symbolical representation ; triple-code model

60 pages ; 15 pages d'annexes ; 45 références bibliographiques