



**HAL**  
open science

# Représentations analogiques et représentations symboliques des quantités : leurs relations entre quatre et six ans

Guy Chazoule

► **To cite this version:**

Guy Chazoule. Représentations analogiques et représentations symboliques des quantités : leurs relations entre quatre et six ans. Psychologie. Université Blaise Pascal - Clermont-Ferrand II, 2012. Français. NNT : 2012CLF20025 . tel-01063654

**HAL Id: tel-01063654**

**<https://theses.hal.science/tel-01063654>**

Submitted on 12 Sep 2014

**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.

**Université Blaise Pascal – Clermont-Ferrand**  
Département de Psychologie, Sciences sociales et Sciences de l'Éducation  
Laboratoire de Psychologie Sociale et Cognitive  
LAPSCO - UMR CNRS 6024



Représentations analogiques et représentations  
symboliques des quantités.  
Leurs relations entre 4 et 6 ans.

Thèse de Doctorat - Mention Psychologie

Présentée par **Guy CHAZOULE**

**Sous la direction de Michel FAYOL et Catherine THEVENOT**

Membres du jury :

Pierre BARROUILLET, Professeur, Université de Genève

Michel FAYOL, Professeur, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand

Marie IZAUTE, Professeure, Université Blaise Pascal, Clermont-Ferrand

Catherine THEVENOT, Maître d'Enseignement et de Recherche, Université de Genève

Bruno VILETTE, Professeur, Université de Lille 3

Décembre 2012

## Résumé

Le modèle du triple code a été proposé par Dehaene (1992 ; Dehaene & Cohen, 2000) sur la base d'arguments neuro-anatomiques et neuropsychologiques pour rendre compte du traitement des nombres et des quantités. Le modèle postule l'existence de trois types de représentations correspondant chacune à un format de l'information numérique : une représentation analogique approximative préverbale, et deux représentations symboliques, l'une verbale, l'autre arabe. Si des études ont pu être mises en évidence les caractéristiques de la dimension analogique tant chez le nouveau-né que chez l'adulte, la question de la « greffe » chez l'enfant des représentations symboliques sur la représentation analogique reste posée. L'objectif de cette thèse est de rechercher en suivant le développement comment s'effectue cette mise en relation. Nous avons élaboré un ensemble d'épreuves de comparaisons testant chacune une des représentations du modèle du triple code afin de déterminer chez des enfants dès 4 ans des indices de cette mise en relation. Si le lien entre dimensions analogique et symbolique est présent, un effet de rapport, « signature » de ce lien, est attendu tant avec les comparaisons analogiques que symboliques. Cinq expérimentations ont été menées : avec des adultes, des enfants de 4 et 5 ans tout-venant, des enfants prématurés et des enfants atteints du syndrome de Down. Les résultats montrent que, dans toutes les populations, l'effet de rapport est présent avec la dimension analogique. Ensuite, entre 4 et 5 ans, avec l'acquisition du code verbal et indo-arabe la représentation symbolique change de nature. Enfin, les populations qui présentent des troubles du traitement du nombre sont affectées essentiellement sur la dimension verbale. Ces résultats sont discutés en regard de deux conceptions alternatives.

Mots-clés : nombre ; développement ; modèle du triple code ; représentation analogique ; représentation symbolique ; prématurés ; Syndrome de Down.

## Summary

The triple code model was proposed by Dehaene (1992 ; Dehaene & Cohen, 2000) on the basis of neuro anatomical and neuropsychological arguments in order to account for number and quantity processing. This model postulates the existence of three types of representations, a preverbal and approximate analogical representation, and an Arabic and verbal symbolic representations. If researchers have extendedly studied the characteristics of the analogic dimension in the new born as well as the grown up, the issue of the « graft » of symbolic representations for the child on analogical representation remains an open debate in the current literature. The aim of this thesis is to explore how this connection operates with regard to development. We set out a series of comparing tests to try each representation of the triple code model in order to find signs of this connection in children as young as four year old. If a relationship between the analogical and symbolical dimensions is found then, a signature of this connection is expected to be found in the analogical comparisons as well as in the symbolical. Five different experiments were carried out on adults and four-five year-old children from all walks of life, including prematured and Down Syndrom children. The results show that in all the samples, a ratio effect is found in the analogical dimension. Then between four and five year old, the acquisition of the Indo Arabic and verbal code, the nature of the symbolic representation changes. Finally, populations showing troubles with numbers are mainly affected on the verbal dimension. These results are assessed with regard to two alternative conceptions.

Keywords : number, development, triple code model, analogical representation, symbolical representation, prematured children, Down Syndrom.

## TABLE DES MATIERES

Résumé.....	1
Summary .....	2
TABLE DES MATIERES .....	3
TABLE DES ILLUSTRATIONS .....	5
<b><u>INTRODUCTION</u></b> .....	<b>7</b>
<b>1<sup>IERE</sup> PARTIE : PARTIE THEORIQUE</b> .....	<b>12</b>
<b>CHAPITRE I - APPROCHE DE LA COGNITION NUMERIQUE</b> .....	<b>13</b>
<b>I - Apport du modèle du triple code dans la cognition numérique</b> .....	<b>13</b>
I - 1 - Le modèle de McCloskey .....	13
I - 2 - Le modèle du triple code .....	15
I - 2 - 1 . Le modèle du triple code et les représentations associées .....	16
I-2-1-1. La représentation préverbale (analogique) .....	18
I-2-1-2. La représentation auditive verbale. ....	25
I-2-1-3. La représentation visuelle arabe (ou indo-arabe). ....	28
I-2-2 - Les relations entre les représentations. ....	30
I-2-2.1.Relation représentation préverbale et représentation verbale .....	32
I-2-2-2.Relation représentation préverbale et représentation arabe .....	34
I-2-2.3.Relation entre représentation arabe et représentation verbale .....	36
<b>II –L’enfant et le développement des habiletés numériques</b> .....	<b>37</b>
II -1 - Rappel de l’importance du modèle piagétien. ....	38
II - 2 - Les tout débuts. Une nouvelle perspective : une compétence numérique précoce chez les nouveau-nés et les très jeunes enfants ?.....	40
II-2-1- Le traitement numérique des petites quantités par les très jeunes enfants : est-il uniquement basé sur le sens du nombre? .....	40
II - 2 - 2 . En présence de collections d’objets, les jeunes enfants ne se comportent peut-être pas comme des calculateurs en herbe. ....	45
II - 2 - 3 . Le traitement numérique des grandes quantités par les très jeunes enfants : l’effet de distance. ....	50
II - 3 - La cognition numérique du bébé à l’enfant. ....	53
II - 3 - 1 . L’effet de distance : une précision qui s’accroît au fil du temps .....	53
II - 3 - 2. L’acquisition des symboles numériques .....	58
II - 3 - 2 - 1. L’acquisition du code verbal.....	59
II - 3 - 2 - 2. La quantification. ....	66
II - 3 - 2 - 3 . L’acquisition du code arabe (ou indo-arabe). ....	69
II - 3 - 2 - 4 . L’articulation entre représentations analogique et symbolique. La ligne numérique. ....	70
<b>CHAPITRE II : PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESE</b> .....	<b>77</b>
<b>2<sup>IEME</sup> PARTIE : PARTIE EMPIRIQUE</b> .....	<b>84</b>
<b>CHAPITRE I - PRESENTATION DU TRAVAIL DE RECHERCHE</b> .....	<b>85</b>
I - 1 - Introduction .....	85
I - 2 - Présentation de la méthode : matériel et procédure .....	86
I - 2 - 1 - Epreuve 1 : mesure du temps de réaction simple (TRS) .....	87
I-2-2 - Epreuve 2 : comparaisons de réglettes.....	88
I - 2 - 3 - Epreuve 3 : comparaisons de cercles .....	89
I - 2 - 4 - Epreuve 4 : comparaisons d’ensembles de jetons .....	92
I - 2 - 5 - Epreuve 5 : comparaisons de surfaces rectangles. ....	93
I - 2 - 6 - Epreuve 6 : comparaisons de quantités présentées sous forme de numéraux oraux.....	94

I - 2 - 7 - Epreuve 7 : comparaisons de quantités présentées en chiffres arabes (évaluation de la représentation visuelle arabe).....	97
<b>CHAPITRE II - EXPERIENCE 1 - Le traitement des codes analogiques et symboliques par les adultes..</b>	<b>99</b>
II - 1 - Méthode .....	99
II - 2 - Résultats .....	100
II - 3 - Discussion .....	108
<b>CHAPITRE III - EXPERIENCES 2 et 3 : le traitement du nombre par les enfants de 4 et 5 ans.....</b>	<b>111</b>
III - 1 - Introduction .....	111
III - 2 - EXPERIENCE 2 : le traitement du nombre par l'enfant de 4 ans.....	113
III - 2 - 1 - Méthode .....	113
III - 2 - 2 - Résultats .....	118
III - 2 - 3- Discussion de l'expérience 2 .....	139
III - 3 - EXPERIENCE 3 - Le traitement du nombre par l'enfant de 5 ans. ....	143
III - 3 - 1 - Méthode .....	144
III - 3 - 2- Résultats .....	145
III - 3 -3. Discussion de l'expérience 3.....	163
III - 4 - Discussion générale .....	168
<b>CHAPITRE IV - EXPERIENCE 4 - Traitement du nombre et prématurité. ....</b>	<b>172</b>
IV- 1 - Méthode .....	177
IV- 2 - Résultats .....	178
IV - 3 - Discussion .....	195
<b>CHAPITRE V - EXPERIENCE 5 - Traitement du nombre et syndrome de Down. ....</b>	<b>200</b>
V- 1 - Méthode .....	204
V- 2 - Résultats.....	211
V - A - Analyses des performances en T1.....	212
V - B - Résumé des performances en T2.....	217
V - C - Analyses des performances en T3.....	218
V - 3 - Discussion.....	229
<b>DISCUSSION GENERALE.....</b>	<b>233</b>
Résumé des résultats .....	236
Limites et perspectives.....	240
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>243</b>
ANNEXES.....	251
Protocole (enfants/adultes) .....	252

## TABLE DES ILLUSTRATIONS

<b>Figure 1.</b> Schématisation du modèle de McCloskey (Mc Closkey, 1992). .....	15
<b>Figure 2.</b> Schéma du modèle du triple code de Dehaene et Cohen (d'après Lemer, 2003) ....	18
<b>Figure 3.</b> Illustration de l'effet de taille. Pour être renforcés, des rats doivent appuyer un nombre déterminé de fois (4, 8, 12 ou 16) sur un levier. Les courbes montrent que l'imprécision augmente en fonction du nombre de référence (d'après Dehaene et al., 1998).	22
<b>Figure 4.</b> Implémentation schématique des représentations du triple code dans le cerveau. ..	24
<b>Figure 5.</b> Régions du sillon intrapariétal qui répondent à un changement du nombre (d'après Piazza et al., 2004). .....	25
<b>Figure 6.</b> Modification de l'effet de distance en fonction du type de stimuli : non symboliques (à gauche) ou symboliques (à droite). Avec des entrées symboliques, la précision augmente bien que l'effet de distance demeure (d'après Verguts et Fias, 2004).. .....	32
<b>Figure 7.</b> Schématisation de l'effet de distance extraite de Dehaene (2010). Lorsque des participants doivent décider si des nombres sont plus grands ou plus petits que 65, leurs temps de réponse augmentent quand le nombre s'approche de la référence. ....	35
<b>Figure 8.</b> Collections présentées par Starkey et Cooper (1980). .....	41
<b>Figure 9.</b> Procédure utilisée par Wynn (1992). .....	43
<b>Figure 10.</b> Cartes utilisées par Houdé (1997) pour évaluer l'interférence longueur entre longueur et nombre. ....	44
<b>Figure 11.</b> Les nouveaux-nés ont un temps de fixation significativement plus long lorsqu'il y a congruence entre les stimuli auditifs et visuels. Ils peuvent discriminer lorsque le ratio est de 3 pour 1 mais pas 2 pour 1 (d'après Izard et al., 2009). .....	49
<b>Figure 12.</b> Exemple de stimulus utilisé par McCrink et Wynn (2007). En phase d'habituation, le rapport est ici de 1/4. ....	51
<b>Figure 13.</b> Exemple d'item de comparaison (« Qui a le plus ? ») proposé par Halberda et al. (2008). .....	54
<b>Figure 14.</b> Exemple de la différence de résultats entre adultes Mundurucus et américains pour l'épreuve de pointage sur une ligne numérique à partir d'ensembles de points. Pour les Mundurucus, la représentation est logarithmique, pour les américains, linéaire (d'après Dehaene et al., 2008). .....	56
<b>Figure 15.</b> Exemple de stimuli utilisés pour déterminer si l'enfant est capable de désigner le nombre d'items demandé par l'expérimentateur (d'après Wynn, 1992). .....	59

<b>Figure 16.</b> Progression du comptage oral chez les enfants chinois et américains. A partir de 4 ans, les courbes se séparent significativement (d'après Miller et al., 1995). .....	64
<b>Figure 17.</b> Exemples de stimuli symboliques et non symboliques utilisés par de Hevia et Spelke (2008). .....	76
<b>Figure 18.</b> Présentation d'une étoile au centre de l'écran. ....	87
<b>Figure 19.</b> Présentation de deux réglettes sur l'écran. ....	88
<b>Figure 20.</b> Présentation de deux cercles de surface différente. ....	89
<b>Figure 21.</b> Les deux personnages supports des comparaisons. ....	90
<b>Figure 22.</b> Exemple d'item pour les comparaisons de jetons. ....	92
<b>Figure 23.</b> Exemple d'item pour les comparaisons avec contrôle des surfaces. ....	93
<b>Figure 25.</b> Exemple d'item (non utilisé durant l'épreuve) de comparaison avec chiffres arabes. ....	97



## INTRODUCTION

Selon le dictionnaire Larousse, le nombre se définit comme « une notion fondamentale des mathématiques qui permet de dénombrer, de classer les objets ou de mesurer les grandeurs mais qui ne peut faire l'objet d'une définition stricte ». L'importance de l'intuition numérique peut être comprise dans une perspective évolutionniste comme un mécanisme adaptatif indispensable à la survie des espèces et elle concerne autant les animaux que les êtres humains (Dehaene & Brannon, 2010). Par exemple, à partir d'une recherche menée avec des singes, Cantlon et Brannon (2007) ont mis en évidence l'habileté des primates à réaliser des « additions » à partir d'un matériel non verbal d'une façon qui ressemble beaucoup à celle utilisée par les humains. Pour Cohen, le nombre « *est une propriété très abstraite d'un groupe d'objets, qui ne change pas, qu'on déplace les objets, qu'on change leur couleur, leur forme, qu'on les voit ou qu'on les entend* » (2012 ; p.125). Pesenti, Seron et Noël apportent la précision suivante concernant notre sujet d'étude : « *Au niveau le plus élémentaire, le nombre est une propriété d'une collection d'objets du monde extérieur (la numérosité) qui doit être reconnue (opération de quantification) et représentée mentalement* » (2000 ; p. 362).

La présente recherche porte donc sur cette notion fondamentale qu'est le nombre en se situant dans le domaine d'étude du développement de l'arithmétique cognitive. Elle vise, dans le cadre théorique de la psychologie cognitive, à déterminer comment se développe ce concept qui est, selon Guedj (1996) « *l'aboutissement d'un long travail d'abstraction de la pensée* ».

D'une manière générale, l'utilisation des connaissances arithmétiques vise trois objectifs rappelés par Fayol, Chazoule et Fanget (2006) :

- quantifier de manière précise certaines dimensions du réel (e.g., la longueur, le nombre, etc.) en utilisant des représentations symboliques ;

- opérer sur les quantifications en manipulant les représentations symboliques (e.g., additionner, soustraire, etc.) ;
- comparer le résultat de ces calculs à ceux qui pourraient être obtenus en manipulant le réel.

Tout au long de ce travail, nous nous appuyerons sur le modèle du triple code élaboré par Dehaene (1992 ; Dehaene & Cohen, 2000). Ce modèle postule l'existence chez l'adulte tout-venant de trois types de représentations mentales (analogique, auditive verbale et visuelle arabe) sensées intervenir lors du traitement des quantités :

- La représentation analogique correspond à la dimension quantitative de la magnitude et serait porteuse du «sens» du nombre. Elle est supposée indépendante du langage. Elle est présente chez l'animal et chez l'homme dès le plus jeune âge. Elle permet l'estimation, les comparaisons et les calculs approximatifs sans recourir à des symboles.
- La représentation auditive verbale est de nature symbolique. Elle intègre les dimensions auditive et verbale du nombre. Elle implique donc un traitement linguistique du nombre. Elle, supporterait la connaissance des faits arithmétiques (tables d'addition et de multiplication).
- La représentation visuelle arabe est aussi de nature symbolique. Elle est la base du traitement visuo-spatial du nombre. Elle serait recrutée pour les calculs écrits et les jugements de parité.

Pour établir ce modèle de la cognition numérique, Dehaene s'est appuyé sur les résultats d'études neuropsychologiques, de recherches sur le nouveau-né et de données recueillies à partir de travaux d'imagerie conduits auprès d'adultes.

Ce modèle vise à fournir une conception synthétique susceptible de rendre compte de l'essentiel de nos connaissances en ce domaine. Toutefois, il n'aborde jamais les questions

relatives à la mise en place de ces représentations. Dehaene ne s'attache qu'aux performances des nouveau-nés et à celles des adultes, les deux bornes extrêmes du développement. Il ne traite jamais de la mise en place des représentations symboliques, représentation verbale ou indo-arabe. L'objectif de notre travail est précisément de contribuer à combler cette lacune.

Dans un premier temps, nous nous proposons d'examiner pendant la période allant de 4 à 6 ans la mise en place de ces deux types de représentation symbolique, et notamment la question de leur articulation avec la représentation initiale préverbale (i.e. analogique approximative). En effet, Dehaene défend l'idée que la représentation préverbale constitue la sémantique du nombre et permet seule d'interpréter les notations symboliques. Il s'ensuit que les représentations symboliques ne sont interprétables qu'en relation avec cette représentation préverbale. Si tel est le cas, l'établissement des relations entre représentations symboliques, relativement tardives à apparaître dans le développement, et représentation préverbale, supposée disponible chez le nouveau-né, s'avère fondamental pour comprendre les difficultés rapportées dans la littérature lors de l'acquisition des conduites numériques élémentaires et les difficultés ou les troubles qui subsistent dans certaines sous-populations.

Pour étudier la mise en place des relations entre représentations symboliques et représentation préverbale, nous avons conçu un ensemble d'épreuves. Ces épreuves peuvent être proposées à un large éventail de participants (des jeunes enfants aux adultes). Elles permettent d'évaluer l'organisation des types de représentations dans une perspective développementale d'une part, et, en fonction de caractéristiques particulières (e.g., prématurité), d'autre part. Elles sont destinées à permettre d'observer l'installation de l'articulation entre l'analogique et le symbolique.

Concernant le choix et la conception de ces épreuves, l'idée est de s'appuyer sur une propriété majeure, commune à ces trois représentations : l'effet de distance. Cet effet est attesté, d'une part, sur la représentation préverbale chez le nouveau-né comme chez l'adulte

et, d'autre part, sur les représentations symboliques chez l'adulte. Il se résume de la façon suivante : dans une tâche de comparaison de quantités, quel que soit le format sous laquelle celles-ci sont présentées, plus la différence est importante et plus la réponse est exacte et rapide. Inversement, plus la différence est faible, et plus les erreurs sont fréquentes et les temps de réponse élevés.

Nous postulons ici que la « signature » attestant que les représentations symboliques sont reliées à la représentation préverbale est que l'effet de distance se manifeste avec ces représentations symboliques. L'installation de cette relation est mal connue. Afin de comprendre sa mise en place, qui dépend à la fois de l'ontogenèse et de l'épigenèse, nous soumettrons donc des enfants à des séries d'épreuves de comparaison portant sur des quantités présentées soit sous forme analogique (e.g., des cercles de tailles différentes) - épreuves sensées tester la représentation préverbale - soit sous forme symbolique, verbale d'une part, indo-arabe d'autre part.

Dans la première partie de ce travail, nous présenterons une approche de la cognition numérique dans laquelle nous détaillerons le modèle du triple code et ses représentations. Nous commencerons par dresser un bilan des recherches réalisées chez l'adulte avant de décrire les travaux portant sur les habiletés dans le domaine du nombre chez le nouveau-né et l'enfant. Nous verrons que, grâce à des méthodes d'observations sophistiquées et ingénieuses, les chercheurs ont pu suggérer des capacités numériques précoces.

Dans la deuxième partie, nous aborderons les études menées dans le cadre de cette thèse. La première étude a été réalisée avec des adultes, les suivantes avec des enfants : d'abord, avec des enfants tout-venant de 4 et 5 ans, ensuite avec des prématurés et enfin avec des enfants atteints du syndrome de Down.

Dans la dernière partie, nous résumerons les principaux résultats ; nous discuterons, en particulier, notre position quant à la relation entre représentation analogique et représentation

symbolique en regard d'une conception alternative. Nous évoquerons pour finir les questions qui restent en suspens et les perspectives de futures recherches.

## **1<sup>ière</sup> PARTIE : PARTIE THEORIQUE**

# **CHAPITRE I - APPROCHE DE LA COGNITION NUMERIQUE**

## **I - Apport du modèle du triple code dans la cognition numérique**

Qu'est-ce qui supporte notre capacité à manipuler quotidiennement les nombres et les quantités ? Pour tenter d'établir la structure d'ensemble sous-tendant les traitements numériques, au cours des dernières décennies, différentes architectures ont été proposées, notamment grâce à l'apport des recherches en neuropsychologie. Selon Fayol (2012), depuis les années 1980, quelques grandes idées directrices ont abouti à l'émergence de nouvelles perspectives dans le domaine de l'analyse des compétences arithmétiques :

- L'avènement d'une conception modulaire de l'esprit a permis l'analyse de la cognition numérique en de multiples composantes ce qui a contribué à battre en brèche le sentiment d'homogénéité des mathématiques (la « bosse des maths » ne reposerait pas sur une capacité unique);
- L'étude de cas pathologiques (e.g., suite à des AVC, des tumeurs ou atteintes cérébrales diverses, etc.) a permis d'inférer les caractéristiques d'un fonctionnement cognitif « sain ».

Les données ainsi recueillies ont contribué à l'élaboration d'architectures visant à décrire de manière générale les mécanismes et les structures impliquées dans le traitement du nombre. Pour saisir les apports de la démarche neurocognitive, nous présenterons deux modèles importants : d'abord le modèle de McCloskey puis celui du Triple Code élaboré par Dehaene.

### **I – 1 - Le modèle de McCloskey**

Dans le domaine de la cognition numérique, le modèle de référence a longtemps été celui de McCloskey (1992) qui a proposé une première architecture globale pour le calcul et

le traitement des nombres. Ce modèle est uniquement fonctionnel. Il postule que le traitement arithmétique se fait à partir de plusieurs modules indépendants et que toutes les manipulations mentales des nombres transitent par une représentation sémantique unique, amodale de la quantité :

- Le système de compréhension numérique permet l'encodage des nombres. Il est subdivisé en deux composantes, l'une arabe, l'autre verbale. Chacune d'elles comprend un module de traitement lexical et un module de traitement syntaxique.
- Le système de calcul comprend la mémoire des faits numériques, l'interprétation des opérateurs et des symboles écrits ainsi que les procédures d'exécution des calculs.
- Un système de production des nombres, subdivisé lui aussi en plusieurs sous composants (lexicaux, syntaxiques), convertit le code sémantique abstrait dans le format de sortie approprié et contribue à produire la forme requise (verbale, écrite ou arabe) du nombre.
- La composante centrale du modèle correspond à la représentation sémantique abstraite qui recode les stimuli numériques en un code abstrait (chaque entrée numérique quelle que soit son format étant exprimée en une puissance de dix) pour permettre les processus de calculs.

Ce modèle montre plusieurs faiblesses. D'une part, il postule un passage systématique par une représentation abstraite du nombre. D'autre part, il conçoit la représentation sémantique uniquement en termes de puissances de 10. Enfin, le traitement de quantités relevant du domaine de l'analogique (e.g. estimation de collections de jetons) n'est pas pris en compte. Il convient d'ajouter que les mécanismes étudiés dans le modèle de McCloskey sont ceux d'adultes humains, sans perspective développementale.



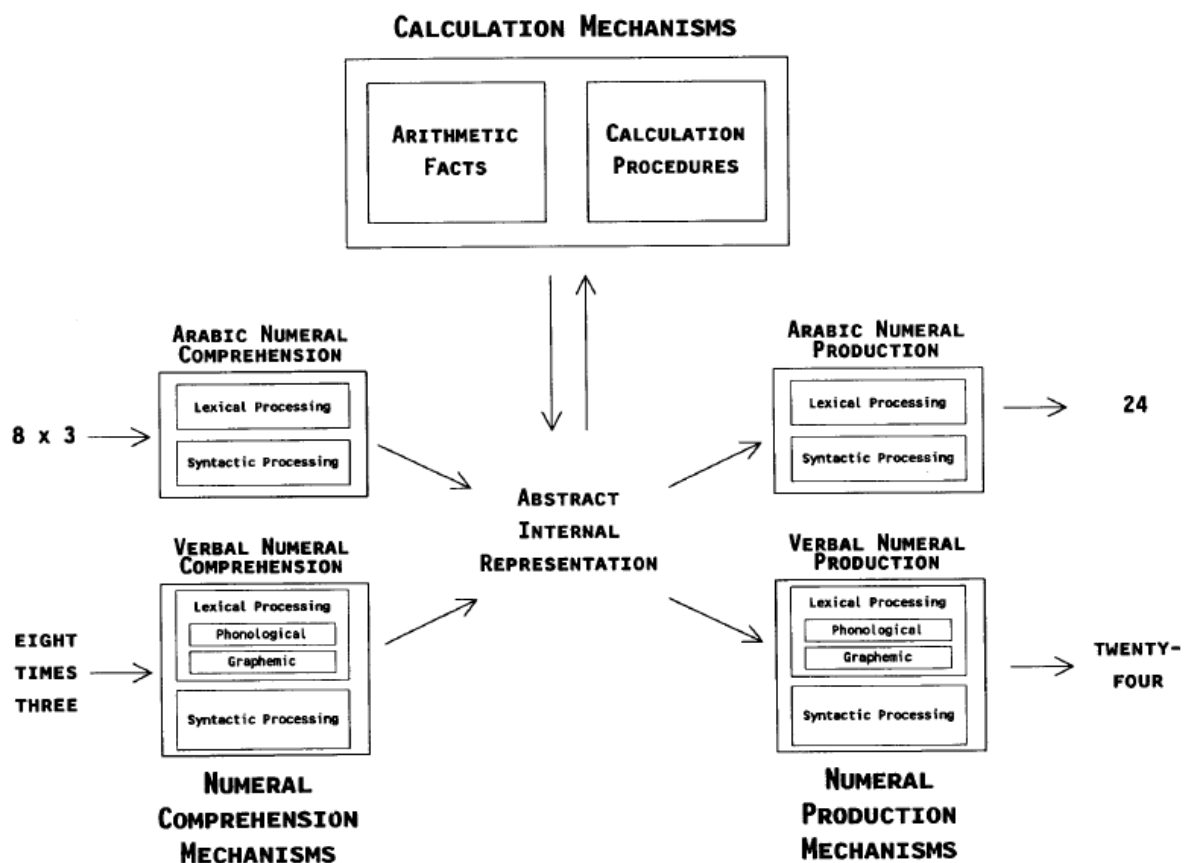


Figure 1. Schématisation du modèle de McCloskey (Mc Closkey, 1992).

## I – 2 - Le modèle du triple code

Le modèle du triple code est anatomique et fonctionnel. Il ne se contente pas d'une description des mécanismes impliqués dans la cognition numérique, mais il s'étaye sur des arguments neuro-anatomiques et des observations issues de l'imagerie cérébrale. Cette architecture alternative a été proposée par Dehaene (1992 ; Dehaene & Cohen, 2000). Selon Dehaene, la capacité à manipuler les numérosités (i.e. la capacité à déterminer la cardinalité d'un ensemble) serait à la base de l'arithmétique.

### **I - 2 - 1 . Le modèle du triple code et les représentations associées**

Ce modèle a été élaboré à partir d'arguments neuropsychologiques (e.g. études de cas, mise en évidence de doubles dissociations<sup>1</sup>), d'observations de patients cérébrolésés, de résultats de recherches chez le nouveau-né et chez l'adulte dans le domaine de la cognition numérique ainsi que de travaux issus de la neuro-imagerie (IRM, TEP). Dehaene (2010) avance l'idée de circuits cérébraux dédiés spécifiquement aux activités numériques avec, notamment, l'importance d'une zone particulière extrêmement sensible à tous les stimuli liés au traitement numérique des quantités. Cette zone est localisée dans le sillon intrapariétal et a été baptisée hIPS (« *horizontal segment of the intraparietal sulcus* »). Le rôle de cette région a été confirmé par l'analyse de données d'IRM fonctionnelle. L'utilisation de cette technique d'exploration du cerveau dans le cadre d'un paradigme d'amorçage subliminal<sup>2</sup> permet à Naccache (2006) d'affirmer que les neurones de l'hIPS codent la quantité sous un format abstrait puisque l'amorçage inconscient peut être facilitateur aussi bien avec des mots (e.g., « QUATRE ») qu'avec des chiffres arabes (e.g., « 4 »). L'idée d'identifier des aires cérébrales impliquées dans le traitement des nombres ne vise pas à la constitution d'une phrénologie moderne (Dehaene, 2001). La perspective ouverte par le modèle du triple code est de montrer en quoi des aires cérébrales permettent l'encodage de l'information numérique et se coordonnent pour traiter et produire cette information.

---

<sup>1</sup> Seron (2002) note que « l'observation d'une double dissociation des troubles est considérée par beaucoup d'auteurs comme le cas de figure le plus fiable pour éclairer le neuropsychologue sur la structure interne des architectures cognitives ». Typiquement, il s'agit de mettre en évidence que, dans un domaine donné (e.g., les opérations arithmétiques), un patient A va réussir à un type particulier d'opérations (e.g., les additions) et échouer à un autre (e.g., les multiplications) alors qu'un patient B va présenter le pattern inverse. Cela permet de supposer une indépendance des fonctions cognitives impliquées dans les deux opérations.

<sup>2</sup> Dans le domaine de l'arithmétique cognitive, il s'agit d'étudier la dissociation entre traitement conscient et inconscient des nombres et, par exemple, de savoir si l'activation d'une amorce subliminale d'un nombre compris entre 1 et 9 (à l'exception de 5) va influencer le comportement d'un sujet lors d'une tâche de comparaison avec 5. Les essais peuvent être soit congruents (l'amorce et la cible sont du même côté que 5, e.g. HUIT, et 6 respectivement) soit incongruents (l'amorce et la cible ne se situent pas du même côté que 5, e.g. DEUX et 7).

Concernant l'observation clinique de double dissociation dans le domaine de la cognition numérique, le modèle s'est enrichi de l'étude de patients acalculiques. Dans l'exemple suivant, Dehaene et Cohen (1997) ont ainsi montré deux patterns inverses :

- M. MAR, 68 ans, présentait une lésion localisée dans le lobe inférieur droit et un syndrome de Gertsman<sup>3</sup>. Ses capacités étaient préservées dans le domaine verbal (e.g., connaissance des faits arithmétiques) mais il présentait des difficultés dans les tâches nécessitant la manipulation des quantités (e.g., pour les soustractions).
- Mme BOO, 60 ans, avait un profil inverse. Elle souffrait d'une lésion sous-corticale gauche. Les résultats aux tests ont révélé des difficultés dans le domaine impliquant des routines verbales (e.g., la multiplication) alors qu'elle montrait une compréhension correcte des quantités.

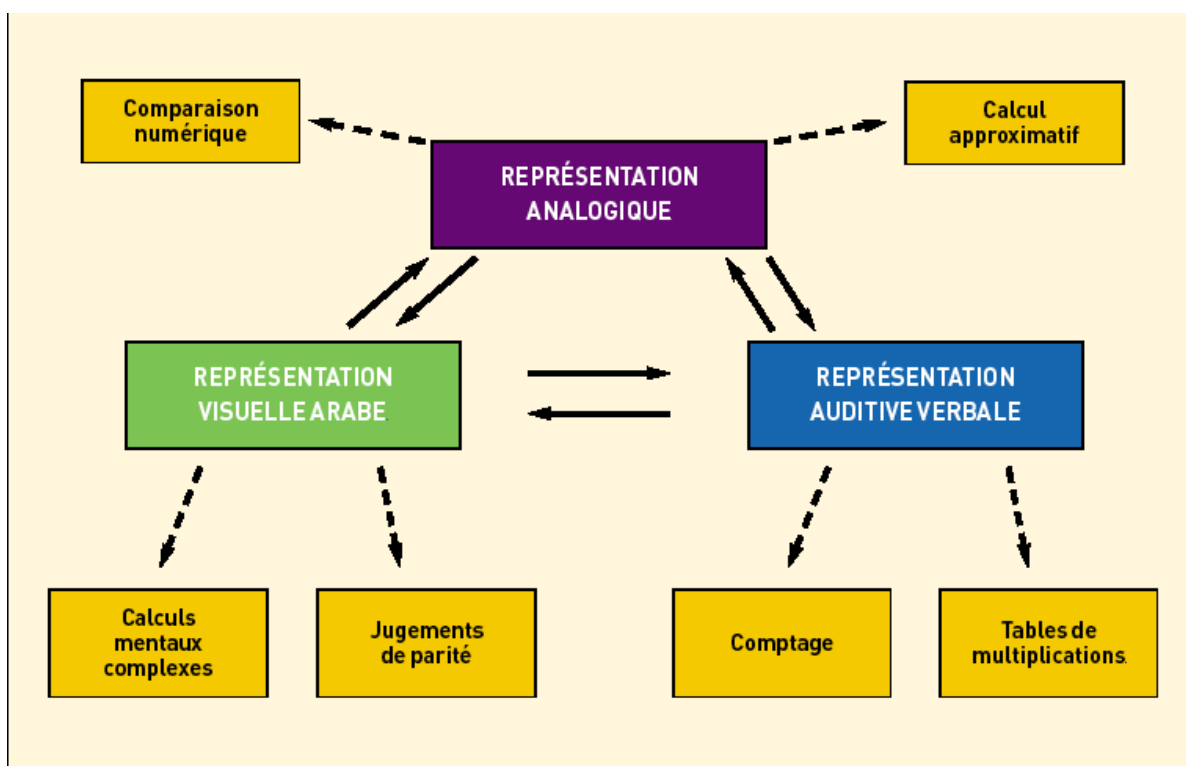
La description d'une telle dissociation apporte des éléments cliniques pour l'élaboration du modèle avec, d'une part, la discrimination entre des fonctions cognitives particulières et, d'autre part, le rôle de différents substrats neuronaux.

**Tableau I-1.** Aperçu synthétique du modèle du triple code : les trois représentations, les tâches numériques et les localisations cérébrales associées (d'après Fias et Pesenti, 2004).

Représentations	Tâches numériques	Localisations
Verbale	Traitement des noms de nombre Comptage Faits additifs simples Faits multiplicatifs simples	Aires périsylviennes gauches (gyrus frontal inférieur et temporal supérieur)
Visuelle	Traitement des nombres arabes Jugement de parité Calcul mental à plusieurs chiffres	Aires occipito-temporales gauches et droites
Analogique	Traitement des quantités analogiques Comparaison numérique Calcul approximatif	Aires pariétales inférieures gauches et droites

<sup>3</sup> Ce syndrome se caractérise par l'association de quatre symptômes : une agnosie digitale, une agraphie, une confusion droite-gauche et une acalculie.

Le modèle postule que l'appréhension cognitive du nombre et les opérations découlant de l'arithmétique élémentaire s'organisent autour de trois types de représentations – analogique, visuelle, verbale. Ces trois types de représentation sont relativement indépendants dans la mesure où ils peuvent être sélectivement atteints, mais ils sont en interaction constante (voir figure 2). C'est à partir de ce modèle que sera élaborée notre recherche et ce sont ces trois représentations qui vont être décrites maintenant.



**Figure 2.** Schéma du modèle du triple code de Dehaene et Cohen (d'après Lemer, 2003)

### **I-2-1-1. La représentation préverbale (analogique).**

La représentation préverbale (ou analogique) est probablement très primitive. Elle correspond à la dimension sémantique, porteuse de la magnitude (ou quantité), i.e. du « sens »

du nombre. La représentation des quantités peut être présentée métaphoriquement comme une ligne mentale numérique, orientée de gauche à droite et d'une compression croissante avec l'augmentation de la quantité. Elle est supposée indépendante du langage et disponible chez le nouveau-né et l'animal. Elle permet l'estimation, les comparaisons (par exemple, dans des tâches de comparaison de nuages de points) et les calculs approximatifs. Elle n'implique pas la connaissance de symboles.

La ligne numérique définit les relations de proximité entre les nombres et se caractérise par plusieurs propriétés. « *La ligne mentale représentant la numérosité ou la quantité est dite « analogique » car elle figure de manière physique la magnitude numérique par une longueur ou une position* » (Fias & Pesenti, 2004 ; p. 72). Diverses expériences basées sur des tâches de comparaison ont ainsi mis en relief l'organisation de cette ligne numérique. Plusieurs effets ont été mesurés.

- L'effet de distance : l'effet de distance n'est pas spécifique au domaine de la cognition numérique. Il est impliqué dans des tâches de jugements psychophysiques telles que les comparaisons de longueurs, de luminosités, de surfaces ou même de durées. Mais il apparaît aussi dans le domaine de la comparaison numérique, symbolique. La découverte de cet effet, qui « signe » le caractère analogique de la ligne numérique, est due à Moyer et Landauer (1967). Ces auteurs ont suggéré que, dans les tâches de comparaison, les personnes convertissent les nombres écrits ou verbaux en grandeurs analogiques et comparent ces grandeurs comme s'il s'agissait de stimuli physiques. Ainsi, la comparaison 1-9 est plus facile que la comparaison 5-6. Lorsque des quantités à comparer sont proches l'une de l'autre, le temps de réaction pour effectuer la comparaison et le nombre des erreurs augmentent.

- L'effet de taille : la comparaison 4-5 est plus facile que la comparaison 8-9, elle-même plus facile que 14-15. A écart équivalent (ici « 1 ») entre les nombres à comparer, le temps de réaction augmente avec la grandeur des quantités à comparer. La difficulté à discriminer deux nombres, séparés par le même écart, augmente avec la taille des nombres. Dans la perspective de la métaphore de la ligne numérique, ce résultat est interprété comme une diminution subjective de l'espace entre les nombres quand les nombres deviennent de plus en plus grands.

- L'effet de rapport : la capacité à effectuer une discrimination entre deux numérosités diminue quand le rapport entre les deux numérosités se rapproche de « 1 » (e.g., la comparaison 2 vs 4 – rapport 1/2 – est plus facile à réaliser que la comparaison 8 vs 10 – rapport 4/5). L'effet de rapport covarie avec la taille et la distance.

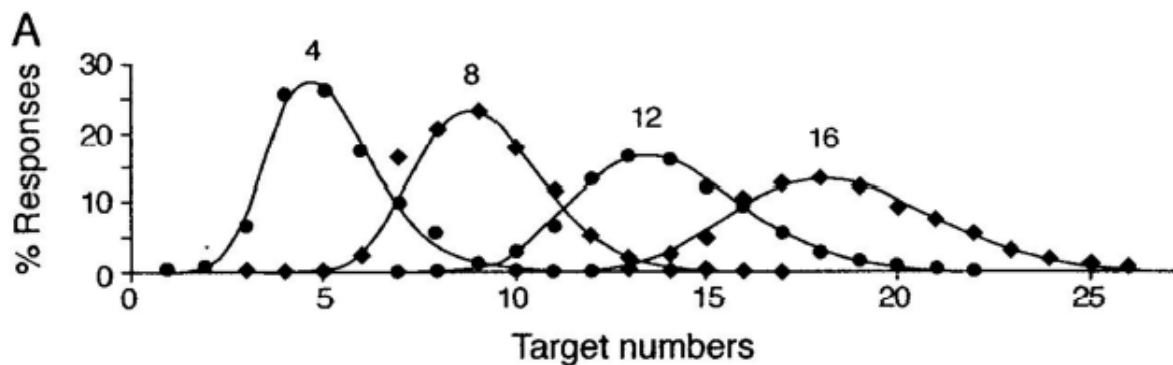
- L'effet SNARC (Spatial Numerical Association Response Code effect) : il existerait une association entre représentation numérique et espace. Les nombres se trouveraient positionnés dans l'espace selon une orientation gauche (plus petit) / droite (plus grand) correspondant au sens de l'écriture. Cet effet a été mis en évidence aussi bien chez les gauchers que chez les droitiers (Dehaene, Bossini et Giraux, 1993). Il se manifeste, par exemple, dans une tâche de comparaison où il s'agit de décider si un nombre est plus ou moins grand qu'un nombre cible. La réponse est alors plus rapide avec la main gauche qu'avec la main droite lorsque le nombre est plus petit que le nombre cible, et, inversement, la réponse est plus rapide avec la main droite lorsque le nombre est plus grand que le nombre cible. L'effet SNARC apparaît de manière automatique dans des tâches qui ne requièrent pas une manipulation explicite des quantités comme les jugements de parité (e.g., dire si un chiffre est pair ou impair).

Ces différents effets (distance, taille, rapport, SNARC) « signent » la façon dont nous traitons le nombre selon la métaphore de la « ligne numérique ». Les comparaisons supportées par la représentation analogique s'avèrent d'autant moins précises que les quantités sont importantes. Cette imprécision de l'estimation avec l'augmentation de la quantité fait référence à la Loi de Weber. Dans le domaine psychophysique, cette loi stipule que les difficultés de discrimination (e.g., de séries de points) augmentent de manière régulière et peuvent être mesurées en prenant en compte la proportionnalité entre les quantités à comparer.

La représentation analogique est-elle spécifique à l'homme ? Dans une perspective darwinienne, la capacité de traiter, même approximativement, des quantités (de nourriture, de prédateurs,...) peut constituer un avantage pour la survie de l'individu et de l'espèce. La recherche s'est donc penchée sur les compétences « numériques » des animaux. Existe-t-il une certaine continuité entre l'homme et l'animal dans le domaine de la quantification ? Les résultats de nombreuses expérimentations attestent que la représentation analogique semble présente tant chez les animaux que très tôt chez les êtres humains. Dans le domaine animal, des études ont été menées avec différentes espèces (singes, rats, corbeaux, poissons, etc.). Ainsi, Barber et Wright (2001) ont mené des expérimentations avec des vairons (*Phoxinus phoxinus*) qui se déplacent préférentiellement avec des individus familiers. Mais, pour leur survie face aux prédateurs, il est aussi important pour ces petits poissons de trouver protection dans des bancs plus larges. Les auteurs ont testé la façon dont les vairons se comportaient selon qu'ils pouvaient choisir entre des groupes de pairs familiers versus non familiers. Ils ont montré que le choix des vairons ne s'effectue pas au hasard mais qu'il est guidé par une forme d'estimation du rapport. Les poissons sont capables d'opérer des discriminations en fonction du rapport numérique existant entre les groupes et de choisir, en fonction de cette estimation, un banc de congénères plutôt qu'un autre : par exemple, dans la condition

expérimentale n°4, lorsque le rapport est de 1/4, les vairons préfèrent significativement rejoindre le groupe plus nombreux des non familiers qui est susceptible de leur assurer une meilleure protection.

Dans une revue de la littérature, Dehaene, Dehaene-Lambertz et Cohen (1998) ont présenté des données montrant les effets de taille et de distance présents dans une large variété d'espèces animales. Certains animaux, par exemple les pigeons, s'avèrent capables de discriminer des grands nombres (entre 45 et 50 coups de becs). L'effet de taille, qui est une forme de la loi de Weber, peut être observé chez les rats entraînés à presser une pédale pour obtenir une récompense : plus le nombre cible augmente, plus leurs performances diminuent.



**Figure 3.** Illustration de l'effet de taille. Pour être renforcés, des rats doivent appuyer un nombre déterminé de fois (4, 8, 12 ou 16) sur un levier. Les courbes montrent que l'imprécision augmente en fonction du nombre de référence (d'après Dehaene et al., 1998).

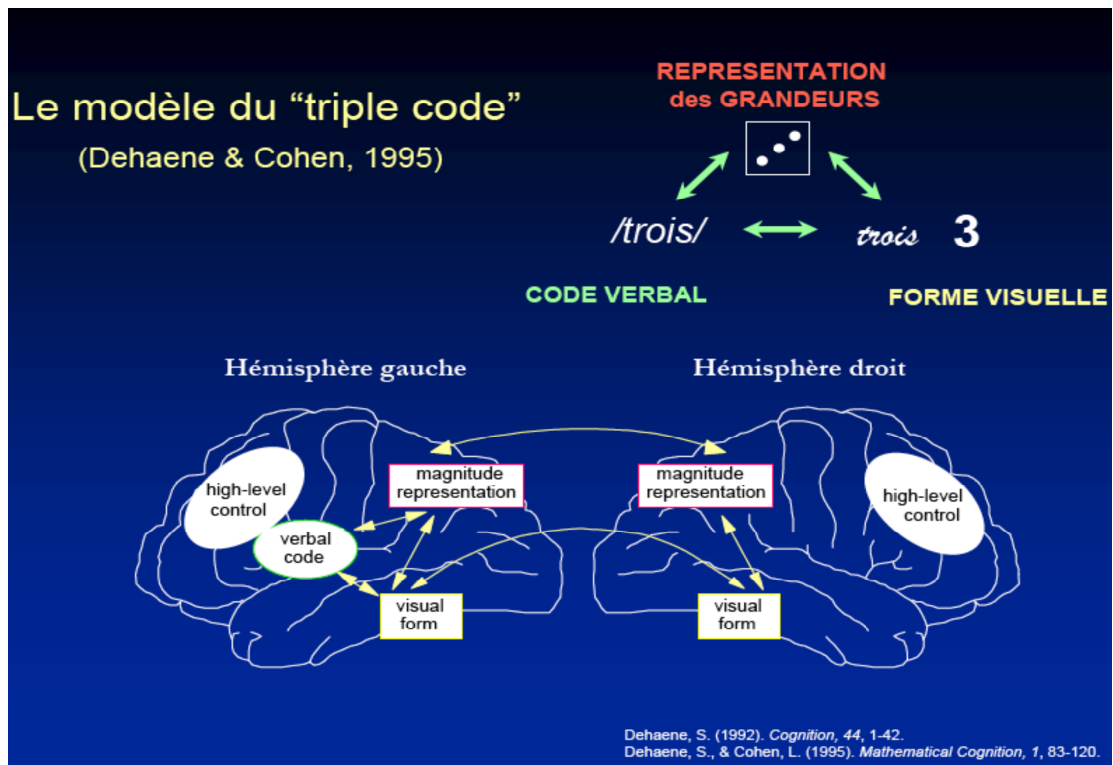
Il a été possible d'isoler chez l'animal des neurones des nombres, i.e., capables d'encoder la quantité. En 2002, Nieder, Freedman et Miller ont entraîné deux singes à juger de l'égalité de quantités présentées successivement sur des écrans (les items comprenaient de 1 à 5 points). Ils ont ensuite enregistré des neurones du cortex préfrontal. Ils ont montré que certains neurones codaient préférentiellement pour une quantité spécifique, avec un pic d'activité pour cette quantité, puis une chute systématique de l'activité quand le nombre d'items s'éloignait de la valeur « préférée ». Ils mettent en évidence des courbes d'adaptation



de ces neurones qui permettent une estimation de la numérosité selon un pattern de réponses qui décroît en fonction de l'éloignement de la distance préférée. Dans ce même article, les auteurs relèvent un effet de distance numérique : les singes font plus d'erreurs de jugement quand les quantités se rapprochent de la quantité cible et améliorent leur performance lorsque la distance numérique entre les deux quantités présentées augmente. Ainsi, les animaux semblent posséder, selon l'expression de Gallistel et Gelman (2005), une « machinerie mentale » de représentation de la magnitude.

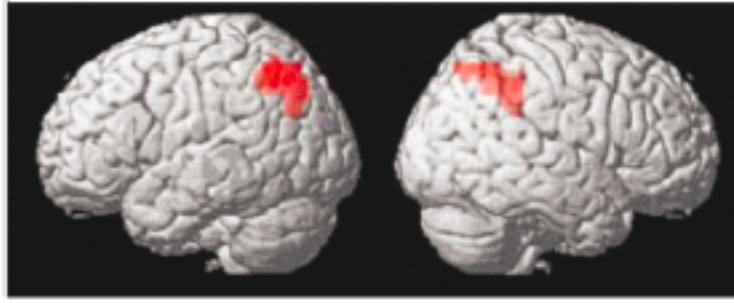
En ce qui concerne les adultes humains, Whalen, Gallistel et Gelman (1999) ont voulu vérifier l'hypothèse que les processus d'estimation des quantités numériques présentaient des similitudes entre les animaux et les hommes. Ces chercheurs ont imaginé des dispositifs expérimentaux destinés à tester les capacités d'évaluation tout en prévenant chez leurs participants des stratégies de comptage verbal. La mise en place de telles procédures entraîne une évaluation analogique de la quantité et des réponses en conformité avec la loi de Weber. Ceci est constaté tant en production (les sujets doivent frapper un nombre déterminé de coups en effectuant une séquence articulatoire) qu'en perception (les sujets doivent effectuer une évaluation globale devant un écran). Le taux d'erreurs s'accroît en proportion des quantités à traiter. Les auteurs ont conclu de leurs travaux que la représentation non verbale du nombre est quantitativement et qualitativement similaire à celle observée chez les animaux et les nouveau-nés.

La localisation neuro-anatomique de la représentation analogique (Figure 4) se situerait dans les aires pariétales gauche et droite. En utilisant des techniques d'imagerie (IRMf), Dehaene, Piazza, Pinel et Cohen (2003) ont mis en évidence le rôle d'une région particulière du sillon intrapariétal, le hIPS (horizontal segment of intraparietal sulcus). Cette région semble être impliquée dans la compréhension du « sens » du nombre. Elle est systématiquement requise pour les tâches d'arithmétique mentale, son activation augmente en fonction des quantités à manipuler et ne dépend pas du format de présentation des nombres.



**Figure 4.** Implémentation schématique des représentations du triple code dans le cerveau.

En 2004, Piazza, Izard, Pinel, Le Bihan et Dehaene ont scanné le cerveau (IRMf) de participants adultes. Dans un premier temps, les chercheurs ont habitué leurs sujets avec des séries de 16 points ; dans un second temps, ils ont fait varier, de manière inattendue, le nombre des objets présentés (entre 8 et 32 points). Ils ont enregistré, dans le sillon intrapariétal des deux hémisphères (Figure 5), une récupération d'autant plus forte du signal d'IRM que le nombre des objets présentés s'éloignaient de 16 (obtention d'une courbe gaussienne autour de 16). Leurs résultats montrent aussi que la région hIPS est sensible au nombre et ne réagit pas à d'autres changements comme la modification de la forme des stimuli.



**Figure 5.** Régions du sillon intrapariétal qui répondent à un changement du nombre (d'après Piazza et al., 2004).

### **I-2-1-2. La représentation auditive verbale.**

La représentation verbale n'est pas universellement présente. Tous les langages ne comportent pas de système de comptage élaboré. Des recherches ont été menées en Amazonie avec des tribus dont les systèmes linguistiques ne comportaient pas ou très peu de noms de nombres (Pica, Lemer, Izard et Dehaene, 2004 ; Gordon, 2004). Gordon (2004) a étudié la cognition numérique avec les Pirahãs qui ne disposent comme système de comptage oral que des mots désignant « un », « deux » ou « plusieurs ». A l'issue d'une série d'expérimentations, Gordon conclut que, d'une part, la pauvreté du système linguistique des Pirahãs constitue une limite au dénombrement exact de quantités quand les ensembles dépassent deux ou trois items et que, d'autre part, ceux-ci s'appuient sur un processus d'estimation analogique.

Il se trouve donc des cultures sans systèmes verbaux d'étiquetage des quantités. Pour les sociétés où existe un code verbal, le modèle du triple code postule que, dans cette modalité, « *les nombres sont représentés comme des séquences de mots syntaxiquement organisés* » (Dehaene & Cohen, 2000). Cette représentation symbolique verbale serait asémantique, impliquée dans le traitement des noms de nombres, le comptage et les faits arithmétiques<sup>4</sup>.

---

<sup>4</sup> Les faits arithmétiques correspondent à des faits additifs (e.g., 6+6) ou multiplicatifs simples (e.g., 3x5) qui ont pu faire l'objet d'un apprentissage systématique (e.g., tables de multiplication) et dont la récupération en mémoire se fait sans calcul.

La chaîne verbale se compose (Fayol et al., 2006) :

- d'un lexique (un, deux, trois, cent, mille, etc.) variable d'une langue à une autre, dont les items se suivent selon un ordre strict ;
- d'une syntaxe : les termes du lexique peuvent se combiner pour fabriquer à l'infini des nombres à travers des combinaisons additives (quarante deux) ou multiplicatives (quatre cents) ;
- de bases : en français, la base 10 structure le système mais il reste des traces d'une base 60 et d'une base 20.

L'acquisition de la représentation numérique verbale implique la nécessité d'une maîtrise progressive du code symbolique inhérent à chaque culture. Les systèmes verbaux sont très divers et leur acquisition se fait de façon essentiellement implicite au cours des interactions avec l'environnement. L'organisation des systèmes linguistiques présente des particularités dont l'impact peut se faire sentir sur les apprentissages numériques. Comme il est montré sur le tableau I-2, comparativement au système chinois, le système français apparaît comme moins régulier (Fayol, 2012) avec, par exemple, une opacité dans la combinatoire entre dix et dix-sept qui est absente de la chaîne numérique chinoise.

**Tableau I-2.** Comparaison des systèmes français et chinois concernant la dénomination des nombres (d'après Fayol, 2012).

	<i>Français</i>	<i>Chinois</i>
1	Un	Yi
2	Deux	Er
10	Dix	Shi
11	Onze	Shi yi
12	Douze	Shi er
20	Vingt	Er shi
21	Vingt et un	Er shi yi
22	Vingt-deux	Er shi er

Quel est le degré d'indépendance de la représentation verbale par rapport à la manipulation des quantités ? Chochon, Cohen, van de Moortele et Dehaene ont réalisé en 1999 une étude avec l'IRMf afin d'observer les régions cérébrales impliquées dans les traitements numériques. Ils ont proposé à huit participants adultes d'effectuer différentes tâches (dénominations, comparaisons, soustractions et multiplications) en faisant des hypothèses basées sur le modèle du triple code. Les expérimentateurs avaient choisi des épreuves contrastées, certaines d'entre elles nécessitant la manipulation de quantités (e.g., les soustractions qui n'ont bénéficié d'aucun apprentissage par cœur, dans des tables) tandis que d'autres pouvaient être résolues grâce à la mémoire verbale (e.g., les multiplications dont les adultes connaissent les routines verbales). Les auteurs ont ainsi trouvé des patterns d'activations différentiels selon les opérations :

- la multiplication est associée à l'aire intrapariétale gauche ;

- la soustraction implique une activation bilatérale du sillon intrapariétal.

L'idée que la représentation verbale sous-tend les faits arithmétiques, appris par cœur, stockés et récupérés en mémoire sans procédure de calcul (e.g., les tables de multiplication), a été étayée par une étude de Lemer, Dehaene, Spelke et Cohen (2003). Ces auteurs ont décrit une double dissociation. Un premier patient (LEC) présentait un déficit dans l'estimation des quantités avec une multiplication relativement préservée contrairement à la soustraction ; le second (BRI) avait le profil inverse : il présentait un déficit langagier avec de meilleures performances en soustraction qu'en multiplication.

La localisation neuro-anatomique de la représentation verbale se situerait dans les aires périsylviennes gauches impliquées dans le traitement du langage (tableau I-1). Dehaene (2009) affirme qu'il existe une latéralisation conjointe pour le langage et l'arithmétique dans l'hémisphère gauche pour les adultes droitiers.

### **I-2-1-3. La représentation visuelle arabe (ou indo-arabe).**

Elle correspond à la forme visuelle des nombres transcrits en chiffres arabes. Présente dans la plupart des cultures, elle repose sur l'utilisation de la base 10 et serait indépendante du langage puisqu'elle est utilisée avec des langues très différentes. Elle serait impliquée dans le traitement des nombres arabes et les calculs écrits.

S'approprier le système indo-arabe nécessite d'être capable de manipuler un lexique restreint comprenant les chiffres de 1 à 9, ce qui ne pose généralement pas de problème. Le cas du 0 apparaît comme plus complexe. Lochy et Censabella (2005) notent qu'il peut avoir plusieurs statuts :

- un statut lexical lorsqu'il fait partie d'une dizaine (e.g., 20) pouvant faire partie de la chaîne des numéraux (e.g., 20300)
- un statut syntaxique lorsqu'il participe des règles positionnelles (e.g., 201316).

Le système des numéraux arabes est organisé en base dix. Il est positionnel, i.e., la valeur d'un chiffre change selon la position occupée dans le nombre.

Chez l'adulte, lorsque cette représentation est organisée, l'effet de distance s'avère particulièrement robuste, même avec des scientifiques et des mathématiciens (Dehaene, 2010) et l'entraînement ne suffit pas à le faire disparaître. Banks, Fujii et Kayra-Stuart (1976) ont étudié l'effet de distance à partir de la notation arabe ; des participants, à qui l'on montre une paire de chiffres arabes et qui doivent choisir le plus grand des deux, répondent d'autant plus rapidement que la distance entre les chiffres est grande.

La voie d'accès à la représentation visuelle arabe peut être sélectivement touchée. Cipolotti (1995) a décrit le cas d'un patient (S.F.) atteint d'une probable démence de type Alzheimer et présentant d'importantes difficultés pour lire à voix haute des numéraux arabes. Par contre, la lecture à partir de supports alphabétiques était préservée tout comme certaines capacités cognitives et l'habileté à produire des numéraux verbaux. Le patient S.F. présentait donc une altération spécifique pour la lecture des chiffres arabes tout en ayant conservé l'accès au système sémantique et à la représentation verbale.

La localisation neuro-anatomique de la représentation visuelle arabe se situerait dans les aires occipito-temporales gauches et droites impliquées dans la formation visuelle des mots (cf. tableau I-1 et figure 4). Dans l'élaboration du modèle du triple code, Dehaene et Cohen (1995) ont proposé que le traitement de la forme visuelle des nombres repose anatomiquement sur les aires des deux hémisphères dédiées à la reconnaissance visuelle. Une atteinte spécifique de cette région devrait provoquer des troubles de la lecture des chiffres et des calculs présentés à l'écrit tout en préservant le traitement verbal des mots de nombre et les capacités à effectuer des comparaisons à partir de stimuli autres que visuels. Les auteurs citent le cas de deux patients présentant des lésions de cette région occipito-temporale inférieure gauche et souffrant d'alexie pure : tous deux montraient des troubles importants de la lecture

de mots et de nombres, même pour le déchiffrement de chiffres simples. Ils avaient pourtant conservé des capacités à effectuer des comparaisons et à résoudre des tâches arithmétiques sous format verbal. Ainsi, le traitement du nombre par ces deux patients pouvait se faire grâce au système visuel resté intact, mais ne pouvait plus recevoir d'informations de la zone lésée dédiée à l'identification des numéraux arabes.

### **I-2-2 - Les relations entre les représentations.**

Selon le modèle du triple code, les trois représentations impliquées dans le traitement du nombre sont en interrelation constante. Dehaene (2001) rappelle que, d'un point de vue fonctionnel, les procédures de transcoding permettent une traduction directe d'un code à un autre.

Comment s'organisent ces relations entre les représentations postulées dans le modèle du triple code ? Que sait-on de l'articulation entre dimension symbolique et analogique ? Est-elle réservée à l'espèce humaine ? De manière intéressante, Diester et Nieder (2007) ont testé le comportement de singes rhésus entraînés à associer des quantités avec des « symboles » numériques (« meaningless visual shapes »). Après plusieurs mois d'apprentissage, les animaux se sont révélés capables de réussir l'association aussi bien sous forme symbolique (« shapes ») que sous forme non symbolique (« dots »). Les chercheurs ont par ailleurs enregistré l'activité de neurones dans le cortex préfrontal (PFC) et dans le sillon intra pariétal (IPS). Ils ont mis en évidence :

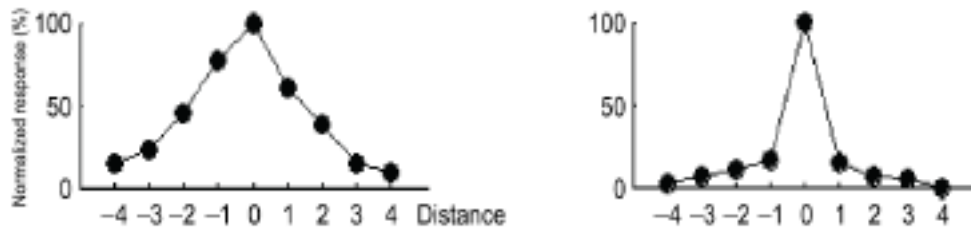
- D'une part, l'impact de l'apprentissage avec des courbes de réponses quasi semblables pour les jugements numériques non symboliques et « symboliques »
- D'autre part, dans le cortex préfrontal, le rôle de neurones d'association qui semblent encoder les valeurs numériques sans tenir compte du format de présentation.

Ces résultats permettent aux auteurs de faire l'hypothèse qu'il existerait chez le singe un précurseur de notre représentation symbolique. Mais il existe des différences entre



l'homme et l'animal. Si, lorsqu'il s'agit de représenter des quantités tant symboliques que non symboliques, les adultes humains utilisent le réseau constitué par les deux structures cérébrales, PFC et IPS, les singes ne l'utilisent que pour les représentations non symboliques. Lorsque les animaux peuvent associer, après de longs entraînements, des symboles (« shapes ») à des quantités, ils n'engagent que la partie préfrontale.

Comme le constatent Verguts et Fias (2004), cette capacité humaine à utiliser des systèmes symboliques sophistiqués constitue une différence importante entre cognition numérique animale et humaine. Ces auteurs ont investigué, à partir de simulations de réseaux de neurones, le lien tissé entre système de représentations symbolique et non symbolique dans le traitement du nombre. Leurs recherches vont dans le sens d'un enracinement des symboles numériques dans les circuits cérébraux initialement dévolus au traitement préverbal des numérosités. Dans ces circuits, des neurones sont initialement dédiés à la détection d'une numérosité (ils vont répondre de manière maximale lorsqu'ils sont en présence de cette numérosité et de moins en moins lorsque la distance avec cette numérosité augmente). Cette capacité va pouvoir être transférée au traitement symbolique (ce qui explique la persistance de l'effet de distance de l'analogique au symbolique). Mais la dimension symbolique ne se calque pas totalement sur la représentation analogique dans la mesure où elle permet un codage plus précis. Verguts et Fias expliquent ainsi le fait que l'on puisse retrouver les effets de taille et de distance à un niveau symbolique. Le lien qui se crée entre les deux ensembles de représentation ne contribue pas à les rendre totalement superposables. Le nombre exprimé au travers des symboles numériques acquiert ainsi plus de précision, même si cette précision n'est pas absolue. Le changement qui découle de cette mise en relation se retrouve dans l'effet de distance : avec des entrées non symboliques, la précision est augmentée, l'effet de distance est « plus étroit » qu'avec des entrées symboliques (figure 6).



**Figure 6.** Modification de l'effet de distance en fonction du type de stimuli : non symboliques (à gauche) ou symboliques (à droite). Avec des entrées symboliques, la précision augmente bien que l'effet de distance demeure (d'après Verguts et Fias, 2004)..

Dans la lignée de ces études, nous allons maintenant présenter de manière plus précise les connaissances portant sur les relations réciproques entre représentations analogique, verbale et visuelle arabe dans le cadre du modèle du triple code. Nous examinerons successivement les relations entre :

- Représentation préverbale et représentation verbale ;
- Représentation préverbale et représentation arabe ;
- Représentation arabe et représentation verbale

### **I-2-2.1.Relation représentation préverbale et représentation verbale**

Comparativement aux animaux, les êtres humains peuvent de manière générale s'appuyer sur des codes symboliques permettant des évaluations précises des quantités. Le comptage (récitation de la suite des nombres) et le dénombrement (détermination du cardinal) permettent de savoir que telle collection comporte exactement 19 éléments et non simplement une vingtaine. Fayol note qu'il « *ressort très clairement des données recueillies que le comptage joue un rôle fondamental dans toutes les activités d'estimation des quantités numériques* » (1990 ; p.73).

Les liens entre langage et nombre ne sont pas simples à déterminer ; selon les dires de certains grands mathématiciens comme Einstein ou Poincaré, il semble bien exister une pensée mathématique qui ne nécessite pas de s'appuyer sur le langage. Le neurologue Laplane

(2005) - faisant, entre autres, référence aux travaux de Dehaene – affirme que le domaine mathématique est le domaine par excellence où il est possible de mettre en évidence une pensée sans langage. Cette hypothèse s'est trouvée renforcée par une étude réalisée par Pica et al. (2004) auprès d'indiens d'Amazonie, les Mundurucus. Ces derniers ont la particularité de ne posséder qu'un lexique de noms de nombres très restreint (jusqu'à 5 environ). Des groupes de Mundurucus ont participé à des séries de tests arithmétiques incluant des opérations précises (e.g.,  $6 - 4$ ) et des tâches d'approximation. Les indiens se trouvent en difficulté lorsqu'il s'agit d'effectuer des calculs exacts alors que leurs capacités d'approximations et de comparaisons de quantités s'avèrent aussi performantes que celles d'individus évoluant dans la culture occidentale dotée d'un lexique de nombres. Pour Pica et al., il serait possible de postuler, chez l'être humain, une capacité d'approximation numérique indépendante du langage.

L'autonomie de la représentation verbale par rapport au « sens » du nombre peut aussi être examinée à partir de la description d'une double dissociation par Butterworth (1999) :

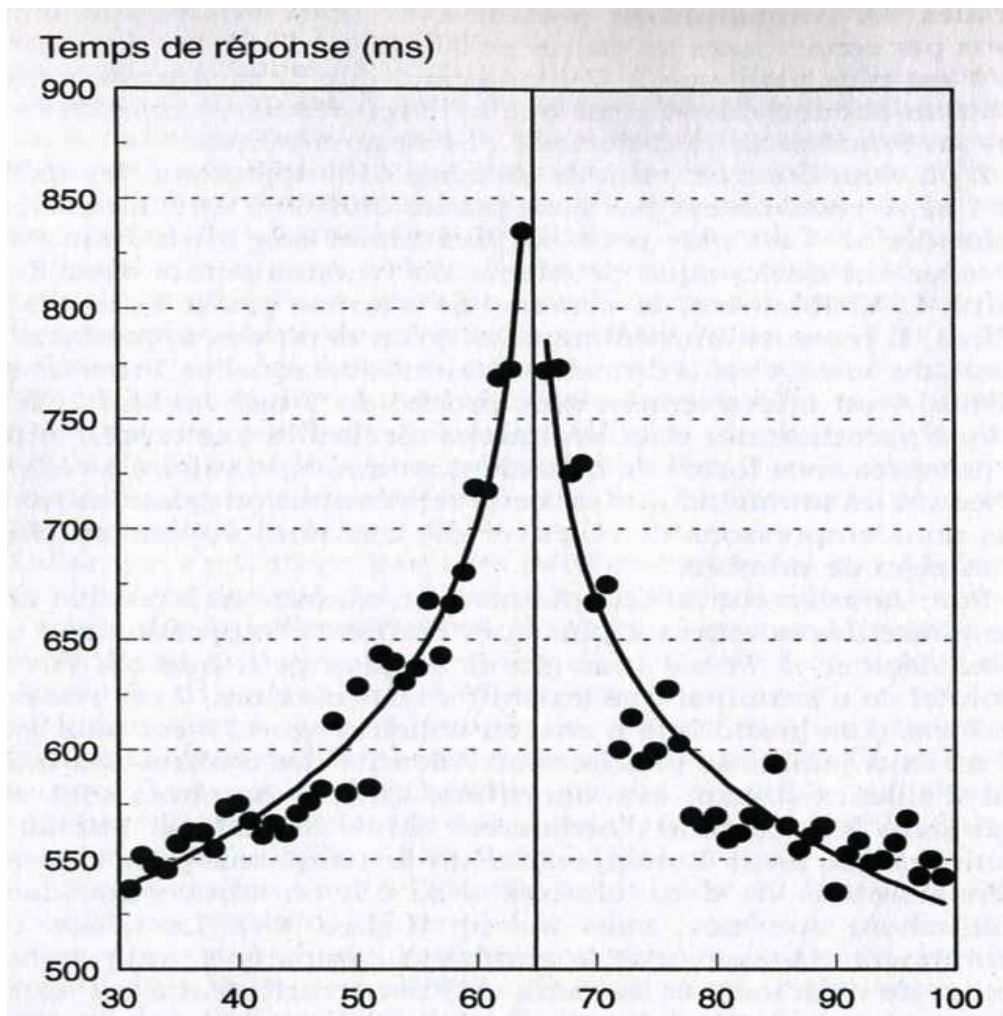
- Suite à une attaque ayant lésé le lobe pariétal gauche de son cerveau, Signora Gaddi, âgée de 59 ans, a vu ses performances numériques se détériorer de manière spectaculaire au point de ne pouvoir ni compter, ni manipuler des quantités au-delà de 4. Elle conservait néanmoins intactes ses capacités langagières, sa mémoire et son raisonnement ;
- A l'inverse, Mr Bell, souffrant d'une affection neurologique dégénérative - la maladie de Pick - avait vu son langage presque complètement disparaître alors qu'il demeurait capable d'effectuer certains calculs et de mettre en place des stratégies adaptées de résolution d'opérations. Le lobe pariétal gauche semblait avoir été épargné. La représentation numérique verbale paraît donc avoir une certaine autonomie par rapport

au traitement des quantités. Les observations de ces deux patients sont en accord avec l'idée d'une autonomie du traitement des quantités par rapport au langage.

### **1-2-2-2.Relation représentation préverbale et représentation arabe**

Dans le modèle du triple code, la représentation analogique de la quantité a un rôle critique car elle supporte l'intuition numérique avec pour conséquence que l'on trouve « *la quantité derrière les symboles* » selon Dehaene (2010). Même en expérimentant avec des adultes habitués à manier des nombres, Dehaene a pu mettre en évidence que, pour ces sujets, la comparaison de 2 et 9 est plus rapide que la comparaison entre 5 et 6. Les chiffres arabes, symboles pourtant bien maîtrisés, ne peuvent s'abstraire de la quantité qu'ils représentent.

Dans les tâches de comparaisons de nombres à deux chiffres (e.g. 65 vs 71 ou 65 vs 69), Dehaene (2010) montre que la présence d'un changement de dizaine (6 et 7), qui pourrait faciliter la comparaison, n'empêche pas l'effet de distance de se produire. Il faut un peu plus de temps pour décider que 69 est plus grand que 65 que pour décider que 71 est plus grand que 65. Pour Dehaene, Dupoux et Mehler (1990), le code indo-arabe est converti de manière rapide en quantité interne analogique. La comparaison va s'effectuer à partir de cette représentation analogique en fonction de la distance plus ou moins proche sur la ligne numérique. La forme même du chiffre des dizaines (7 ou 6) n'interfère pas, d'où la présence d'un effet de distance. Pour les nombres à plusieurs chiffres, les comparaisons se font de manière séquentielle par la prise en compte des différents chiffres.



**Figure 7.** Schématisation de l'effet de distance extraite de Dehaene (2010). Lorsque des participants doivent décider si des nombres sont plus grands ou plus petits que 65, leurs temps de réponse augmentent quand le nombre s'approche de la référence.

En utilisant un paradigme de type Stroop, Dehaene et Akhavein (1995) ont voulu vérifier que la magnitude d'un nombre est automatiquement activée, même si la tâche ne le requiert pas. Ils ont proposé à des participants de désigner dans des paires de chiffres arabes le plus grand soit selon un critère de taille physique (e. g. 5 vs 2) soit selon la valeur numérique. Les résultats montrent un effet de congruence de la taille et suggèrent une activation automatique de l'information numérique ; quand les participants jugent la taille physique des nombres, ils ne peuvent ignorer leurs valeurs numériques.

### **I-2-2.3.Relation entre représentation arabe et représentation verbale**

Quels sont les rapports de ces deux représentations dont les localisations cérébrales diffèrent (i.e., comme le résume le tableau I-1, les aires périsylviennes de l'hémisphère gauche pour la représentation verbale et les aires occipito-temporales gauche et droite pour la représentation arabe) ?

Ces deux représentations semblent chez l'adulte posséder une certaine autonomie comme en témoignent les cas de double dissociation : Butterworth (1999) rapporte que, dès 1892, Déjerine avait publié le cas d'un patient qui, suite à un problème cérébral, était devenu incapable de lire les mots tout en restant capable de lire les nombres. Inversement, Cipolotti, Warrington et Butterworth (1995) ont décrit un déficit sélectif de lecture des chiffres avec préservation de la lecture des mots. Leur patient, B.A.L., présentait une malformation dans la région pariétale gauche ayant occasionné des accidents vasculaires cérébraux. L'investigation neuropsychologique a montré une dissociation entre traitement numérique verbal et arabe :

- Ses capacités étaient relativement préservées dans des tâches faisant appel à des stimuli verbaux (e.g., lire à haute voix des noms de nombres écrits, donner oralement le nombre qui suit, résoudre des additions ou des soustractions simples) ;
- Inversement, il échouait systématiquement dans les épreuves impliquant des chiffres arabes (e.g., incapacité de lire à haute voix des numéraux arabes avec principalement des erreurs lexicales – « 7 » lu « onze »).

Les auteurs ont conclu à l'importance des caractéristiques de présentation des nombres et suggèrent deux voies fonctionnelles distinctes, l'une pour l'accès aux numéraux verbaux, l'autre pour les numéraux arabes.

Dans notre objectif de comprendre la cognition numérique, nous venons de présenter un ensemble de données concernant essentiellement les adultes humains. Nous avons effectué un détour par le monde animal puisque de nombreuses recherches ont mis en évidence que

des espèces, parfois bien éloignées de l'homme comme les poissons, possédaient un système de traitement analogique des quantités. Cette représentation, certes approximative, permet des estimations utiles en milieu naturel.

En étudiant les caractéristiques du modèle du triple code élaboré par Dehaene, il est apparu que, chez l'être humain, la compétence numérique comportait une composante analogique - tout comme chez l'animal - mais aussi une composante symbolique, constituée de codes verbaux et visuels, dépendante de la culture et permettant un traitement précis des quantités. Pour les adultes vivant dans les sociétés occidentales et ayant reçu une éducation, les codes symboliques viennent se lier à la représentation analogique ce que révèle la mise en évidence de l'effet de distance numérique.

La question se pose maintenant de l'acquisition de ce savoir sur le nombre. Nous allons maintenant examiner des données développementales. Du nouveau-né à l'enfant et à l'adolescent, que sait-on de la façon dont la cognition numérique va s'organiser au fil du temps ?

## **II –L'enfant et le développement des habiletés numériques**

Au cours du développement, les enfants vont progressivement acquérir les codes verbaux et écrits qui vont leur permettre de se représenter et manipuler symboliquement les quantités. Geary (2006) rappelle la perspective néonativiste selon laquelle, chez l'enfant humain, la compréhension de l'arithmétique évoluerait à partir d'un premier système biologique ou inné de traitements et de manipulations des quantités pour acquérir ensuite le savoir mathématique et arithmétique spécifique à une culture, celui-ci étant appris de manière plus ou moins formelle. La question se trouve donc posée de l'articulation entre dimension symbolique et analogique, d'un enracinement des représentations auditives et visuelles du nombre dans les processus précoces de quantification.

Comme cela a été le cas précédemment, nous établirons lorsque ce sera possible des liens avec le modèle du triple code de Dehaene. Cette architecture visant à modéliser le traitement du nombre a été élaborée à partir de données recueillies non chez les enfants mais chez les adultes. Nous verrons ainsi que l'effet de distance s'avère robuste avec les bébés et les très jeunes enfants dans la dimension analogique. Il conviendra d'examiner son évolution et sa généralisation à la dimension symbolique au moment où l'enfant acquiert les premiers outils mathématiques de sa culture.

## **II -1 - Rappel de l'importance du modèle piagétien.**

Concernant le développement du nombre chez l'enfant, le modèle dominant a été, durant plusieurs décennies, celui élaboré par Piaget. Ses travaux ont concerné essentiellement l'épistémologie génétique, i.e. l'analyse du développement de la connaissance scientifique en général. Piaget visait à répondre à la question de la construction des connaissances. Il a mené différentes recherches pour étudier l'intelligence de l'enfant et a défendu l'idée que celle-ci se construit progressivement en passant par différents stades. Dans la perspective de Piaget (1992), trois conditions doivent être remplies pour que l'on puisse parler de stades dans le domaine du développement de l'intelligence :

- Les stades se succèdent dans un ordre constant ;
- Ils se définissent par une structure d'ensemble caractéristique ;
- Lors du passage d'un stade à un autre, chaque structure se trouve intégrée à la suivante qui la dépasse.

La genèse de la notion de nombre tient une place majeure dans la théorie piagétienne. Pour Piaget et Inhelder (1966), le sens que l'enfant attribue au nombre est lié au développement de ses compétences logiques. C'est aux alentours de 6-7 ans, au stade des « opérations concrètes », que l'enfant accède au concept de nombre. Dans cette perspective, les périodes qui précèdent peuvent être considérées comme des périodes d'organisation et de



préparation des opérations concrètes. L'enfant devient alors capable de coordonner les opérations de classification et de sériation et de construire le nombre avec ses caractéristiques d'invariance et d'abstraction. Il a construit la réversibilité des actions et devient alors en mesure de réussir la tâche de conservation numérique des quantités<sup>5</sup>, indice de l'accession au concept de nombre. Selon Piaget (1966), « *on ne saurait naturellement parler de nombres opératoires avant que se soit constitué une conservation des ensembles numériques indépendamment des arrangements spatiaux* ». (La psychologie de l'enfant ; p. 82)

Les apports théoriques de Jean Piaget ont été abondamment retravaillés et discutés notamment grâce à l'utilisation de nouveaux paradigmes dans l'observation de l'enfant. Ainsi, Houdé (2011) rapporte une étude menée grâce à la technique d'imagerie par résonance magnétique fonctionnelle (IRMf) afin d'investiguer la tâche de conservation du nombre élaborée par Piaget. Des enfants de 5 à 10 ans, ont réalisé cette tâche tout en étant placés dans un appareil d'IRM. Ce protocole expérimental a permis d'effectuer des cartographies de leur cerveau et d'identifier les circuits neuronaux impliqués dans la résolution de la tâche piagétienne. Les analyses montrent que seuls les enfants les plus âgés « conservants » activent un réseau pariéto-frontal qui leur permet d'inhiber les données perceptives pour fournir une réponse correcte (« Il y a le même nombre même si c'est plus long »).

Comme nous allons maintenant le voir, dans les dernières décennies, de nombreuses recherches ont mis en évidence des capacités numériques à un âge plus précoce que celui avancé dans les recherches piagésiennes.

---

<sup>5</sup> L'épreuve de conservation des quantités consiste à disposer deux rangées de même longueur et de même nombre de jetons devant l'enfant, de lui faire constater l'égalité puis d'entreprendre des changements spatiaux en modifiant la longueur des rangées. L'expérimentateur questionne ensuite l'enfant sur le maintien de l'égalité. Selon la théorie piagésienne, l'enfant avant 6-7 ans, qui n'a pas acquis la notion de nombre, répond de manière erronée (« Il y en a plus là parce que c'est plus long ») car il ne peut réaliser les opérations mentales lui permettant de se détacher des contingences perceptives.

## **II - 2 - Les tout débuts. Une nouvelle perspective : une compétence numérique précoce chez les nouveau-nés et les très jeunes enfants ?**

Comme pour les adultes, des progrès dans la connaissance de la cognition numérique ont pu être réalisés chez les très jeunes enfants grâce à l'emploi de méthodes et de moyens techniques de plus en plus sophistiqués permettant des observations précises. Ainsi, en 2008, pour étudier les bases neurales de la sensibilité au nombre, Izard et al. ont travaillé avec des bébés de trois mois en utilisant des techniques d'électroencéphalographie. Les chercheurs ont placé sur la tête des participants un filet d'électrodes et ont enregistré l'activité électrique à la surface du scalp pendant que les enfants visionnaient des ensembles d'objets (au fil des présentations, les expérimentateurs faisaient varier soit l'identité des objets, soit leur nombre). Le cerveau des enfants a ensuite pu être reconstitué en trois dimensions ce qui a permis de mettre en évidence la topographie de deux circuits cérébraux distincts : l'un dédié aux objets au niveau occipito-temporal, l'autre aux nombres au niveau du cortex pariétal droit<sup>6</sup>.

Cet exemple montre que, chez le très jeune enfant, des moyens d'investigation sophistiqués peuvent être mis au service de la recherche.

### **II-2-1- Le traitement numérique des petites quantités par les très jeunes enfants : est-il uniquement basé sur le sens du nombre?**

En utilisant le paradigme d'habituation à la nouveauté<sup>7</sup>, Starkey et Cooper (1980) ont présenté à de très jeunes enfants (autour de 5 mois) des images comprenant entre 2 et 6 ronds

---

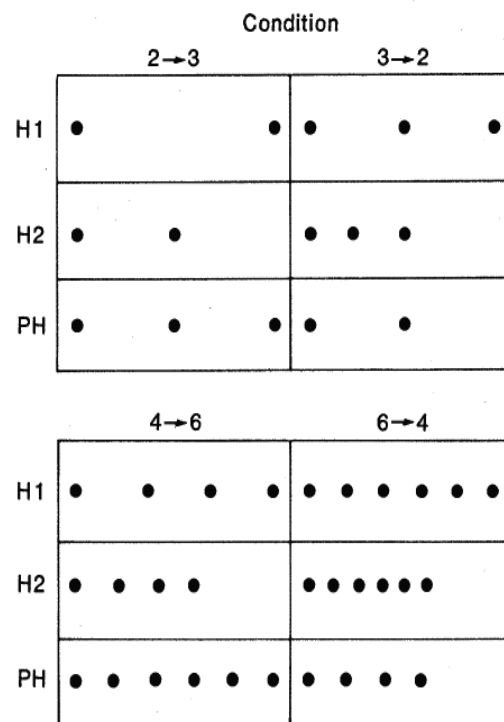
<sup>6</sup> Nous avons vu que, chez l'adulte, le sillon intrapariétal constitue une zone centrale dans le traitement des tâches numériques.

<sup>7</sup> Définition : c'est la diminution graduelle et relativement permanente de l'intensité ou de la fréquence d'apparition d'une réponse spontanée ou d'un comportement, par suite de la présentation répétée d'un stimulus spécifique. Ce phénomène est utilisé au sein de la méthode expérimentale d'habituation/réaction à la nouveauté qui se déroule en deux phases :

**Phase d'accoutumance :** lors de la présentation répétée d'un même stimulus, on observe une diminution progressive de la réponse attentionnelle : dans le cas d'une habituation visuelle par exemple, l'enfant regardera de moins en moins longtemps le stimulus (ceci n'étant pas lié à une fatigue physiologique). Le stimulus perd de son intérêt : on dit que le bébé est habitué.

noirs (figure 8). Ces chercheurs ont montré que les bébés étaient capables de discriminer les numérosités 2 et 3 et donc de se représenter, de petites quantités.

En 1983, Antell et Keating ont obtenu le même type de résultats avec des nouveau-nés âgés de quelques jours. Ces chercheuses ont utilisé un dispositif expérimental permettant de cibler les phases d'éveil durant lesquelles elles ont montré les stimuli visuels (séries de points). Comme avec les enfants de quelques mois, ceux âgés de moins d'une semaine peuvent discriminer des petites numérosités (2 vs 3) mais échouent avec des quantités plus grandes (4 vs 6).



**Figure 8.** Collections présentées par Starkey et Cooper (1980).

Le paradigme de « réaction à l'événement impossible » consiste à présenter à un enfant très jeune deux événements, l'un possible, l'autre impossible. Confronté à un

---

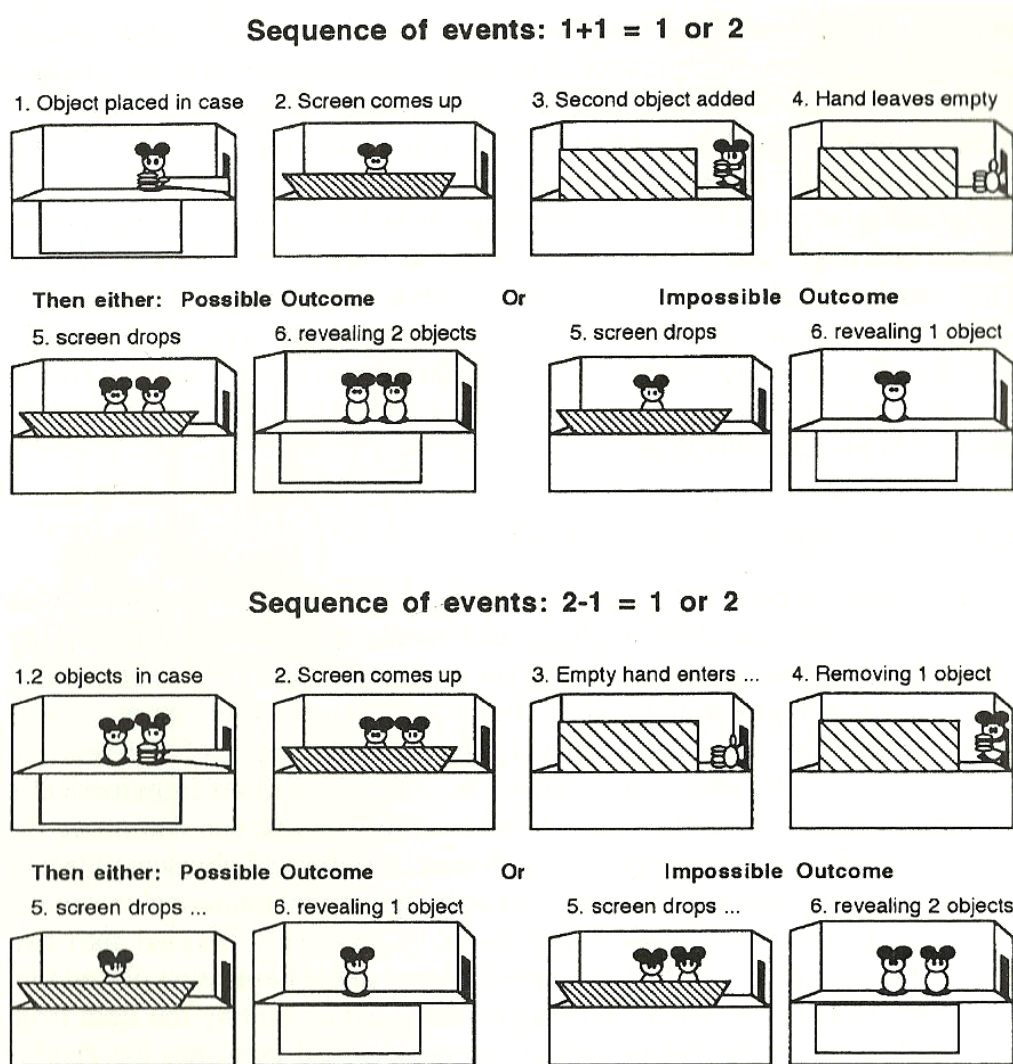
**Phase de réaction à la nouveauté :** suite à cette phase d'accoutumance, si on présente un nouvel objet, la réponse attentionnelle réapparaît.

événement qu'il juge impossible et qui le surprend car il viole ses attentes, le bébé fixe plus longuement la situation intrigante.

C'est en utilisant ce paradigme que Wynn (1992a) a avancé que les bébés, dès 5 mois, sont capables de calculer avec précision les résultats d'opérations simples portant sur de petites numérosités. La procédure utilisée par Wynn (figure 9) consistait – pour tester l'addition  $1+1$  – à présenter un objet initial – un Mickey – sur une scène de théâtre (étape 1), puis à monter un écran devant la scène (étape 2). L'expérimentateur ajoutait de manière bien visible pour le bébé un deuxième objet identique au 1<sup>er</sup> (étape 3 et 4) ; enfin, il abaissait l'écran (étape 5) et dévoilait soit 2 (événement possible), soit un seul objet (événement impossible), soit encore 3 objets (autre événement impossible). Pour la soustraction  $2-1$ , la procédure était analogue : on enlevait ostensiblement 1 des 2 objets cachés par l'écran après qu'ils aient été vus par le bébé et on lui faisait découvrir 1 objet (événement possible) ou 2 objets (événement impossible).

L'intérêt portait sur la durée de fixation de la scène, une fois le résultat dévoilé, la surprise du bébé - lorsque le résultat n'était pas celui qu'il attendait - le conduisant à regarder plus longtemps la scène présentant l'événement impossible. Le résultat des deux premières expériences de Wynn montre que les bébés de 5 mois fixent plus longtemps les événements impossibles : 1 (pour l'addition  $1+1$ ) et 2 (pour la soustraction  $2-1$ ) que les événements possibles respectivement correspondants. Les différences entre les temps de fixation de l'événement possible et impossible sont en moyenne d'une seconde pour  $1+1$  et de trois secondes pour  $2-1$ . Dans une troisième condition expérimentale, Wynn a montré que les bébés de 5 mois fixaient plus longtemps l'événement impossible (3 objets) que le résultat possible (2 objets) pour l'addition  $1+1$ .

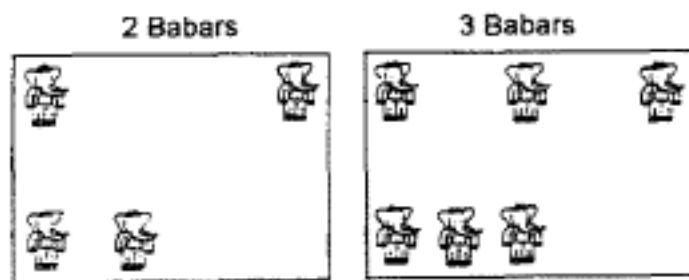
L'ensemble de ces résultats a permis à Wynn d'affirmer que les bébés de 4-5 mois, qui sont capables de calculer le résultat précis d'opérations arithmétiques simples, possèdent de véritables concepts numériques.



**Figure 9.** Procédure utilisée par Wynn (1992).

Houdé (1997) a voulu tester, au moment de l'apparition du langage, le devenir des capacités protonumériques qui se manifestent chez le bébé de quelques mois. Ce chercheur a travaillé avec des enfants de 2 et 3 ans. Il a, d'une part, adapté la procédure utilisée par Wynn (1992) en remplaçant les Mickeys par des Babars (figure 10) et a mis les participants en présence d'un problème additif. Les situations expérimentales correspondaient soit à un

événement possible ( $1+1 = 2$ ) soit à des événements impossibles ( $1+1 = 1$  ou  $1+1 = 3$ ). La mesure ne portait pas sur le temps de fixation visuelle, mais sur les réponses verbales des participants qui devaient, après chaque essai, juger de l'exactitude de l'opération (en disant : « Ca va » vs « Ca ne va pas »). Afin d'étudier l'interférence nombre/longueur, Houdé a, d'autre part, interrogé les enfants à partir d'une tâche de conservation inspirée de Piaget : une carte comportant deux rangées de Babars était présentée à l'enfant. Chaque rangée comptait le même nombre de Babars (soit deux, soit trois selon les conditions) mais sur l'une des rangées, les figures étaient espacées. Il s'agissait de demander à l'enfant laquelle des deux rangées avait le plus de Babars afin d'évaluer s'il est capable d'établir l'équivalence des collections. Les quantités présentées étaient les mêmes que celles requises par l'épreuve de Wynn.



**Figure 10.** Cartes utilisées par Houdé (1997) pour évaluer l'interférence longueur entre longueur et nombre.

Concernant l'épreuve de réaction à l'événement impossible, les résultats de Houdé confirment en partie ceux de Wynn (1992) : si les enfants dès l'âge de deux ans reconnaissent l'impossibilité de l'addition  $1+1 = 1$ , la réaction à l'opération  $1+1 = 3$  est plus tardive à se manifester. Ce décalage entre les deux situations n'était pas présent dans les réactions oculomotrices des bébés de quelques mois testés par Wynn. Pour expliquer ce paradoxe d'une réussite précoce qui s'estomperait temporairement, Houdé émet l'hypothèse d'une réorganisation, au niveau cognitif et langagier, entraînant une chute partielle des performances : la précision du langage n'est pas suffisante pour estimer correctement les quantités numériques. Un autre résultat obtenu lors de cette expérimentation porte sur la tâche

de conservation d'inspiration piagétienne et l'effet d'interférence entre longueur et nombre. Les enfants de 2 et 3 ans sont massivement en échec et n'arrivent pas à établir l'équivalence des collections. Dans cette tâche, ils ne peuvent, selon Houdé, inhiber le schème trompeur qui, à partir d'éléments visuo-spatiaux, conduit à penser que ce qui est le plus long a le plus grand nombre. Cette expérience indique qu'il est nécessaire, pour estimer les capacités numériques des jeunes enfants, d'utiliser des épreuves autres que piagésiennes.

Des résultats comme ceux rapportés par Starkey et al. (1980) ou par Antell et al. (1983) donnent à penser que lorsque de jeunes enfants sont amenés à comparer des quantités au-delà de 3 ou 4 éléments, ils peuvent utiliser leurs capacités de discrimination mais, que celles-ci diminuent au-delà de cette limite. Pourtant, cette capacité précoce à discriminer des petites quantités a été discutée. Par exemple, Lipton et Spelke (2004) ont mené une série d'expériences destinées à étudier la sensibilité à la numérosité à partir de séquences auditives comportant de 2 à 4 sons. Les expériences 5 et 6 de leurs investigations ont été menées respectivement avec des bébés de 6 et 9 mois qui devaient écouter des stimuli sonores. Elles ne trouvent aucune preuve d'une capacité de ces jeunes enfants à discriminer des séquences auditives de 2 à 4 éléments alors qu'ils sont sensibles à des séquences plus importantes (i.e., 8 vs 16) et discriminent en fonction du rapport 1/2.

### **II - 2 - 2 . En présence de collections d'objets, les jeunes enfants ne se comportent peut-être pas comme des calculateurs en herbe...**

Avec ces constatations qui supposent un traitement de la numérosité bien plus précoce que ce qui était avancé par la théorie piagétienne, la question se pose de comprendre les mécanismes cognitifs impliqués dans le traitement des quantités par les bébés et les jeunes enfants : dès le plus jeune âge, les discriminations observées signent-elles vraiment la manifestation d'habiletés spécifiquement numériques? Par exemple, Simon (1999) fait l'hypothèse que la pensée numérique n'est pas présente à la naissance. Il avance l'argument

du faible pourcentage des connexions neuronales au niveau du cortex rendant peu probable la possibilité que le cerveau puisse traiter d'emblée une représentation aussi complexe que le nombre. Selon Simon, le cerveau n'aurait donc pas initialement de câblage numérique. Les compétences manifestées par les bébés dans ce domaine reposeraient sur un système général, attentionnel et visuospatial de discrimination des objets. Celui-ci permettrait de détecter les apparitions et disparitions non cohérentes avec les attentes des enfants, donnant lieu à des comportements pouvant être interprétés « superficiellement » comme numériques. Ce n'est que progressivement que se construit la représentation du nombre grâce aux stimulations de l'environnement culturel et au développement du comptage.

Certains chercheurs ont pu montrer que des variables, autres que strictement numériques, pouvaient expliquer au moins en partie les résultats suggérant la mise en œuvre d'un sens du nombre précoce. Clearfield et Mix (1999) ont questionné les résultats obtenus par Antell et al. (1983) ou par Starkey et al. (1980). Ces chercheuses ont postulé que les discriminations de petits ensembles de points pouvaient être dues non à la mise en œuvre de compétences numériques précoces par les bébés mais plutôt à l'influence et au traitement de variables continues (e.g., la surface ou la longueur des contours des items). Dans la mesure où le nombre covarie souvent avec la surface (ou le volume, ou les longueurs...) occupée par les stimuli, il est possible que ce soit cette information perceptive qui soit prise en compte et non le nombre en tant que tel. Elles ont donc élaboré un dispositif expérimental en contrôlant particulièrement l'une des variables continues, les périmètres des carrés présentés sur l'écran. Les résultats avec des enfants de 6 mois vont dans le sens de leur hypothèse. Au moment du test, après la période d'habituation, les bébés montrent une réaction de déshabituaton uniquement lorsqu'on leur présente un changement du périmètre total, la numérosité étant demeurée constante. Les bébés ne manifestent pas une telle réaction au changement du nombre de carrés présentés si le périmètre total est maintenu constant. Dans leur conclusion,



les auteurs mettent l'accent sur l'importance de la perception dans le développement numérique des enfants.

Dans la même perspective, Feigenson, Carey et Spelke (2002) considèrent qu'en présence d'un nombre limité d'objets, les enfants ne traitent pas exclusivement la numérosité. Pour ces auteurs, ils s'appuieraient sur des « fichiers d'objets » (objet file) ; ces « fichiers d'objets » permettraient d'extraire certaines caractéristiques des objets (forme, couleur) sans nécessité d'une représentation numérique. D'autres variables que le nombre lui-même seraient prises en compte et pourraient expliquer les performances des bébés. Mix, Huttenlocher et Levine (2002) ont également montré l'importance des indices non numériques comme la longueur ou la surface couverte. Ces indices spatiaux permettraient aux jeunes enfants de traiter tant les quantités continues que discontinues en termes de quantité totale perçue.

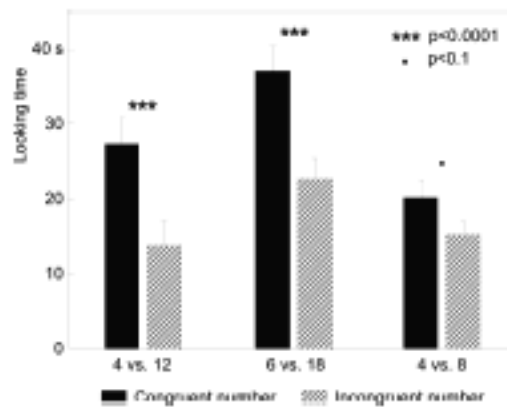
Noël et Palmers (2003) ont proposé que, dans les tâches numériques, le jugement des bébés et des jeunes enfants soit d'abord guidé par des accumulateurs codant les variables perceptives. Dans le cas d'égalisation des contours et des surfaces, les variables perceptives ne permettent pas à l'accumulateur d'établir une différence entre les collections. Par contre, lorsque l'égalisation des données perceptives n'est plus présente, le traitement de cette différence peut se faire. Elles notent que cette discrimination évolue en fonction du rapport numérique : la réussite est plus importante avec un rapport de 1/2 qu'avec un rapport de 2/3.

Pourtant, Izard, Sann, Spelke et Streri (2009) ont néanmoins voulu étayer l'hypothèse que les nouveau-nés possèdent initialement une représentation abstraite du nombre. Ces chercheuses sont parties de plusieurs constats :

- La capacité des enfants de discriminer les nombres avec une précision identique quelle que soit la modalité ;

- Le rôle du sillon intra pariétal qui chez le singe, l'enfant ou l'homme est impliqué dans la représentation des nombres sous différents formats ;
- Le constat que des informations redondantes et simultanées, dans les modalités auditives et visuelles, augmentent la précision dans la discrimination des quantités.

Izard et al. ont mené trois expériences avec des nouveaux-nés, âgés en moyenne de 49 heures, afin de montrer qu'ils sont susceptibles de détecter des correspondances numériques transmodales. Les bébés étaient familiarisés avec des séquences de 4 vs 12 syllabes (expérience 1), 6 vs 18 syllabes (expérience 2) ou 4 vs 8 syllabes (expérience 3). Leur durée de fixation était mesurée alors qu'ils regardaient des images contenant soit le même nombre d'objets que les séquences auditives (nombre congruent), soit un nombre différent (nombre incongruent). Les résultats (figure 11) vont dans le sens attendu ; les enfants regardent plus longtemps l'image ayant le même nombre d'objets que celui auquel ils avaient été familiarisés auditivement. Les auteurs ont aussi mis en évidence la sensibilité au rapport (réussite à 4 vs 12 mais pas à 4 vs 8) observée avec les enfants plus âgés et les adultes. Le caractère extrêmement précoce de ces détections et de la capacité des nouveaux-nés à abstraire le nombre indépendamment des formats permet, à Izard et al., d'envisager l'existence d'une représentation numérique présente dès après la naissance.



**Figure 11.** Les nouveaux-nés ont un temps de fixation significativement plus long lorsqu'il y a congruence entre les stimuli auditifs et visuels. Ils peuvent discriminer lorsque le ratio est de 3 pour 1 mais pas 2 pour 1 (d'après Izard et al., 2009).

Pour clore cette partie, un ensemble de données montre que le traitement des quantités chez les tout petits semble reposer sur deux mécanismes différents :

- L'un relatif aux petites quantités - peut-être un fichier d'objets à base perceptive - permet aux enfants de réussir certaines tâches numériques avec une limite relative à la mémoire à court terme de trois objets (cf. Feigenson, Carey et Spelke , 2002) ;
- L'autre concernant la discrimination de grandes quantités permet la différenciation des éléments à comparer en fonction de la taille des rapports ; le rapport entre les collections doit être suffisamment grand (e.g., 8 vs 16) pour que les très jeunes enfants puissent discriminer (cf. Lipton et Spelke, 2004).

## **II - 2 - 3 . Le traitement numérique des grandes quantités par les très jeunes enfants :**

### **l'effet de distance.**

Il est bien attesté que lorsque la taille des collections à comparer est importante, les performances des enfants, comme celles des adultes, sont sensibles à la distance numérique entre les éléments à comparer selon un effet de rapport<sup>8</sup>. Plusieurs recherches se sont attachées à établir l'évolution de cet effet au cours du développement.

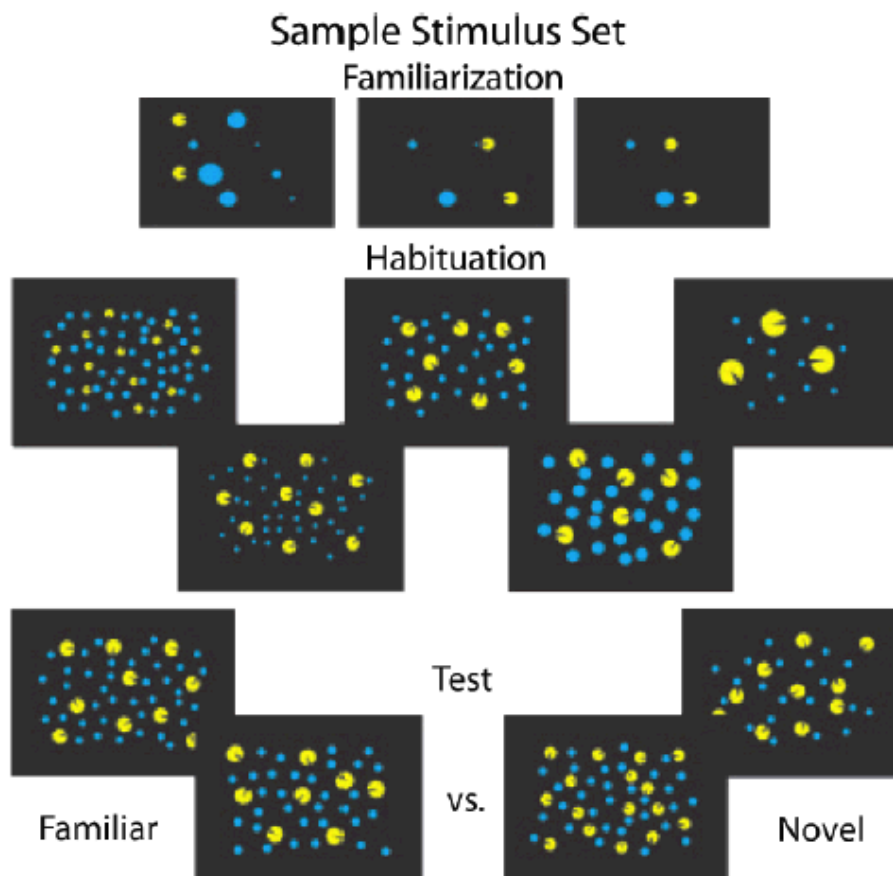
Xu et Spelke (2000) ont montré que des enfants de 6 mois discriminaient visuellement des numérosités avec un ratio de 2.0 (8 vs 16) mais échouaient avec un ratio de 1.5 (12 vs 8). Ce même effet du rapport a été retrouvé à 6 mois avec une modalité auditive par Lipton et Spelke (2003), qui ont aussi mis en évidence une augmentation de la précision à 9 mois : les enfants peuvent alors discriminer 12 de 8 mais pas encore 10 de 8. Avant l'émergence du langage et du comptage, les enfants manifestent donc une sensibilité à la distance qui sépare deux quantités.

McCrink et Wynn (2007) se sont interrogées sur la capacité des enfants de 6 mois à extraire le ratio à partir de présentations visuelles (figure 12). Elles ont habitué les participants en leur montrant des images comportant des personnages jaunes de forme ronde (des « pacmen ») et des boules bleues. Le rapport numérique entre « pacmen » et boules bleues variait selon les conditions expérimentales et la surface des figurines était contrôlée. Durant la phase d'habituation, les stimuli étaient présentés selon trois rapports : 1/2, 1/3 et 1/4. Dans la condition « rapport distant » (1), la moitié des enfants était habituée avec les images dont le rapport était 1/2 (e.g., 11/22) ; l'autre moitié 1/4 (e.g., 6/24). Dans la condition « rapport réduit » (2), l'habituation se faisait avec les rapports 1/2 ou 1/3. Les enfants étaient ensuite soumis à la phase de test : les enfants de la condition 1 voyaient de nouvelles scènes avec les rapports 1/2, et 1/4, ceux de la condition 2, avec les rapports 1/2 et 1/3. L'observation des

---

<sup>8</sup> L'effet de rapport tient compte de la taille ainsi que la distance numérique entre les collections à comparer.

temps de fixations suggère qu'avant d'avoir accès au langage, les enfants peuvent différencier les rapports - à condition qu'ils soient suffisamment larges. Les enfants habitués avec la condition «rapport distant», mais pas ceux placés dans la condition « rapport réduit », ont été sensibles à la nouveauté du rapport. Cette étude a permis aux auteurs d'avancer que les compétences des bébés de 6 mois pour abstraire les rapports étaient approximatives, et présentaient des caractéristiques semblables à celles impliquées dans le traitement des quantités (en adéquation avec la fraction de Weber).



**Figure 12.** Exemple de stimulus utilisé par McCrink et Wynn (2007). En phase d'habituation, le rapport est ici de 1/4.

Jordan, Suanda et Brannon (2008) se sont demandé si le ratio de 1/2 qui semble, dans les expériences précédentes, constituer une limite dans la perception des quantités numériques

par les bébés de 6 mois, ne pouvait pas être rendu plus précis. Elles ont fait l'hypothèse que les discriminations numériques pouvaient sous certaines conditions être réussies avec un rapport de 2/3. Celles-ci seraient facilitées si les stimuli présentés aux enfants comportaient plusieurs modalités sensorielles simultanées (auditive et visuelle). En se servant du paradigme habituation-déshabituaiton, ces auteurs ont mené une série d'expérimentations au cours desquelles ils ont présenté à des bébés de 6 mois des séquences soit de 8 soit de 12 événements.

- Dans l'expérience 1, l'information reçue par les participants était multimodale, visuelle et auditive (ils voyaient une balle tomber et rebondir et entendaient le bruit lorsqu'elle touchait le sol) ;
- Dans les deux expériences suivantes, l'information était soit visuelle (2a), soit visuelle et accompagnée d'une musique classique, i.e., ne pouvant donner d'information numérique (2b).

Avec ce dispositif, Jordan et al. ont montré que des enfants de 6 mois réussissaient à faire la différence entre 8 et 12 stimuli et donc à effectuer des discriminations avec un ratio de 2/3. Ces résultats indiquent que la sensibilité numérique des jeunes enfants est améliorée à condition qu'ils puissent s'appuyer sur des stimulations multisensorielles (visuelles et auditives).

En résumé, de nombreuses données vont dans le sens d'une représentation analogique, approximative de la quantité chez le très jeune enfant, bien avant l'émergence du langage et l'appropriation des codes verbaux et arabes. L'effet de distance se manifeste lorsque les enfants comparent des ensembles d'objets et la discrimination gagne en précision lorsque l'écart entre les collections à comparer est important.

Pour la suite de cet exposé, nous allons maintenant « quitter » le très jeune enfant pour l'enfant d'âge préscolaire puis scolaire. Dans un premier temps, nous nous attacherons à

décrire l'évolution de l'effet de distance au cours du développement. Nous avons observé cet effet dans sa dimension analogique, approximative, préverbale chez le bébé, et nous allons envisager son devenir avec l'apparition du langage et de l'écriture. Nous nous focaliserons, ensuite, sur la dimension symbolique en examinant les connaissances actuelles sur l'installation des codes verbaux et arabes. L'enfant qui grandit acquiert de nouveaux outils pour arithmétiser le réel, et il va pouvoir mettre en relation les différents codes propres à sa culture avec leur signification, et ainsi articuler dimension symbolique précise et dimension analogique approximative.

### **II - 3 - La cognition numérique du bébé à l'enfant.**

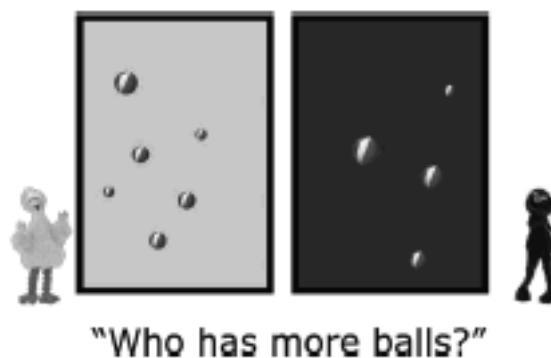
Il est possible de mettre en évidence les capacités de discrimination des quantités chez le bébé sur la dimension analogique quand celui-ci ne possède pas encore les codes symboliques. Des recherches ont été menées pour comprendre l'évolution de cette dimension analogique.

#### **II - 3 - 1 . L'effet de distance : une précision qui s'accroît au fil du temps**

Halberda et Feigenson (2008) postulent que le système d'estimation du nombre (Approximate Number System) sous-tend la capacité à produire des représentations abstraites du nombre qui vont supporter les calculs arithmétiques durant toute la vie. Reprenant les conclusions de plusieurs études, et notamment celle de Moyer et Landauer (1967), ces chercheurs retiennent l'importance du ratio dans la capacité de discrimination des quantités. Plus la distance entre les collections à comparer est importante, plus il est aisé de répondre. Inversement, lorsque les quantités sont proches, il devient difficile de porter un jugement : l'exactitude diminue et les temps de décision augmentent. La formalisation mathématique de ce rapport peut s'exprimer par la fraction de Weber qui mesure la plus petite différence perçue entre deux stimuli. Par exemple, Xu et al. (2000) ont pu constater que les bébés de 6

mois étaient capables de discriminer 8 vs 16 (ratio 1/2) mais pas 16 vs 24 (ratio 2/3). Les adultes, quant à eux, ont une sensibilité plus fine, évaluée par un ratio de d'environ 7/8.

L'idée d'Halberda et sa collègue est d'étudier le changement développemental dans le système d'approximation numérique entre ces deux bornes temporelles que sont la petite enfance et l'âge adulte. Ils ont donc mené une étude transversale avec des enfants de 3, 4, 5 et 6 ans et avec des adultes. Les participants ont été soumis à des épreuves non verbales de discrimination de quantités numériques ; ils voyaient sur un écran deux images comprenant entre 1 et 14 objets (Figure 13) et devaient répondre, sans possibilité de compter, à la question « Qui a le plus...[de balles], [gâteaux], etc.? ». Les résultats mettent en évidence une acuité croissante du système d'approximation numérique en fonction de l'âge. Du point de vue psychophysique, à 3 ans la capacité de discrimination est autour de 2/3, à 4 ans de 3/4, à 5 ans de 4/5, à 6 ans de 6/7 et à l'âge adulte de 9/10. La précision augmente de l'enfance à l'âge adulte pour atteindre le niveau le plus aigu à l'adolescence. Pour les auteurs, les explications de cette acuité de plus en plus fine au fil du développement sont plurielles : maturation neuronale, entraînement à la discrimination numérique par l'éducation, changement dans la mémoire de travail et les fonctions exécutives.



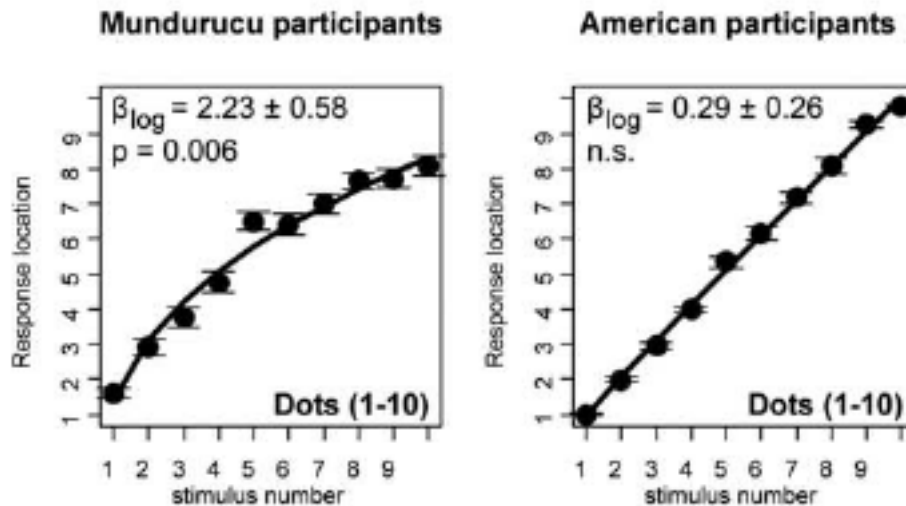
**Figure 13.** Exemple d'item de comparaison (« Qui a le plus ? ») proposé par Halberda et al. (2008).



Holloway et Ansari (2008) ont trouvé que l'effet de distance se manifestait aussi bien avec des enfants qu'avec des adultes dans des tâches de comparaisons numériques (chiffres arabes) et non numériques (carrés noirs). Ils ont observé que cet effet de distance changeait de manière significative au cours du développement. Les réponses deviennent plus rapides et la compétence à la discrimination des grandeurs des enfants s'accroît au fil du temps ce qui, selon les auteurs, reflète un changement global dans les mécanismes de comparaison. Holloway et Ansari postulent l'existence d'un processus général, supporté par une base neurale, capable de traiter la magnitude sous différentes formes (taille, nombre, intensité, etc.). D'un point de vue développemental, ils ont aussi relevé un changement plus important dans les comparaisons numériques comparativement aux comparaisons non numériques. Ils ont expliqué ce résultat par le fait que les enfants n'ont pas encore un accès automatique aux représentations des quantités par le biais des symboles numériques.

Ces données peuvent être mises en perspective avec celles obtenues par Pica et al. (2004) et par Dehaene, Izard, Spelke et Pica en 2008 avec les Mundurucus, une peuplade d'Amazonie que nous avons évoquée précédemment. Ces indiens ont un lexique de mots de nombres limité approximativement jusqu'à 5 et n'ont peu ou pas de contact avec des instruments de mesures ou des cartes. Lors des expérimentations, il leur a été demandé de désigner, sur une ligne numérique, la position d'une numérosité (présentée sous forme d'ensembles de points, de séquences sonores, de mots de nombres Mundurucus ou portugais). Les résultats montrent que les performances des Mundurucus peuvent être représentées selon une courbe logarithmique, en rapport avec la Loi de Weber. Comparativement, les mêmes épreuves effectuées par des étudiants américains donnent des résultats qui correspondent à une représentation linéaire (figure 14). De même, pour les Mundurucus ayant pu bénéficier d'un enseignement en portugais, les performances deviennent linéaires avec les mots de nombres portugais. Pour Dehaene et ses collaborateurs, ces expérimentations démontrent que

le sens du nombre est universel dans sa composante approximative, liée à l'espace, mais peut être modifié par les expériences culturelles qui, avec l'accès aux symboles, viennent modifier la forme du maillage nombre /espace (glissement d'une échelle logarithmique à une échelle linéaire).



**Figure 14.** Exemple de la différence de résultats entre adultes Mundurucus et américains pour l'épreuve de pointage sur une ligne numérique à partir d'ensembles de points. Pour les Mundurucus, la représentation est logarithmique, pour les américains, linéaire (d'après Dehaene et al., 2008).

Certains sont allés jusqu'à tenter d'établir un lien entre les performances relevées dans des tâches faisant appel au système d'approximation du nombre et la réussite ultérieure en mathématique dans le cursus scolaire. Halberda, Mazocco et Feigenson (2008) ont montré qu'il existe des différences individuelles significatives dans les aptitudes d'approximation non verbales et que ces différences individuelles sont corrélées avec la réussite en mathématiques. Ces chercheurs ont proposé à des enfants de 14 ans, dont les performances en mathématiques avaient fait l'objet d'une évaluation longitudinale depuis la période préscolaire, une tâche dans laquelle ils devaient décider s'il y avait plus de ronds jaunes ou de ronds bleus lors de présentations sur un écran d'ordinateur. Chaque item à juger apparaissait très rapidement (200 ms) de manière à prévenir tout comptage. Les résultats sont en accord avec la Loi de Weber

(la discrimination numérique s'améliore quand le rapport entre les numérosités présentées augmente) mais les auteurs ont relevé que, d'une part, il existait des variations individuelles importantes dans la précision du système d'approximation du nombre et que, d'autre part, la précision de ce système d'approximation du nombre était corrélée à la performance aux tests standardisés en mathématique.

Libertus, Feigenson et Halberda (2011) ont travaillé avec des enfants plus jeunes (de 3 à 5 ans) n'ayant reçu qu'un temps limité d'enseignement formel en mathématique. Ces chercheurs ont trouvé qu'à un âge préscolaire, la précision manifestée dans une tâche de comparaison numérique non symbolique était corrélée avec les habiletés en mathématique, évaluées par un test standardisé. Ces résultats sont confirmés par Inglis, Attridge, Batchelor et Gilmore (2011) avec des enfants de 7 à 9 ans ; par contre, ils ne constatent pas d'association entre la précision numérique non verbale et la réussite en mathématique *pour les adultes*. Selon ces chercheurs, leurs résultats vont à l'encontre d'une implication univoque du système d'approximation numérique dans les pratiques adultes de calcul. Ils suggèrent que le lien entre système d'approximation numérique et acquisition du nombre est utile dans l'enfance dans la mesure où il permet, durant cette phase du développement, que les noms de nombres (symboliques) ne soient pas uniquement des étiquettes mais puissent s'associer avec la qualité de la représentation analogique. Le fait d'accéder, avec le temps, à des concepts mathématiques de plus en plus sophistiqués, ainsi que l'importance d'autres facteurs (comme le développement de la mémoire de travail, des stratégies de choix...), entraîneraient une diminution du poids du système analogique dans les performances au fur et à mesure que les enfants grandissent .

Avant d'aborder la question de l'acquisition des symboles numériques, il est intéressant à partir d'une expérience réalisée par Gilmore, McCarthy et Spelke (2007) de voir comment analogique et symbolique peuvent se trouver « intriqués » l'un dans l'autre au cours

du développement. Les expérimentatrices ont proposé à des enfants de 5 à 6 ans, provenant de divers horizons et n'ayant pas reçu d'enseignement formel en arithmétique, de résoudre des petits problèmes d'additions, de soustractions ou de comparaisons (e.g., pour la soustraction : « Sarah a 64 bonbons », « Elle en donne 13 », « John a 34 bonbons. Qui en a le plus ? »). Les consignes étaient lues et, sur les images où les participants pouvaient voir Sarah et John, apparaissaient les nombres correspondant au problème à résoudre. Les connaissances en arithmétique des enfants ne leur permettaient pas de répondre précisément aux questions posées. Par contre, l'analyse des réponses montre qu'elles ne sont pas dûes au hasard et qu'elles varient en fonction du rapport (la précision diminue quand le ratio s'approche de 1). Les auteurs suggèrent que des enfants, dès 5 ou 6 ans, peuvent réaliser des tâches numériques symboliques grâce à leur représentation numérique non symbolique.

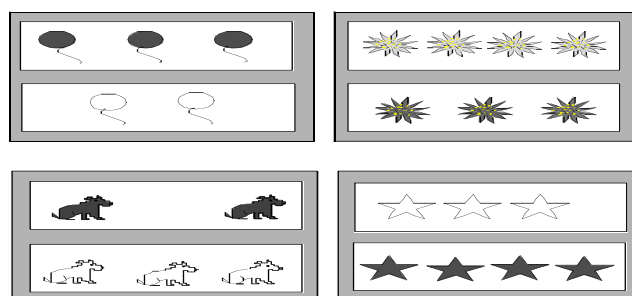
### **II - 3 - 2. L'acquisition des symboles numériques**

Afin de représenter et manipuler symboliquement les quantités, l'enfant va devoir acquérir les codes symboliques de sa culture (Fayol, 2012). Il existe une diversité de codes dont l'utilité, l'efficacité, la fréquence d'emploi et la facilité d'apprentissage varient. Les codes symboliques sont arbitraires dans la mesure où ils ne sont pas en eux-mêmes porteurs de la quantité qu'ils désignent. Par exemple, seuls les anglophones pourront déterminer que « eleven » peut désigner le cardinal d'une collection de 11 éléments. De même, rien n'indique dans le mot « vingt » qu'il désigne une quantité supérieure à celle exprimée par le mot « quinze ». Ce savoir ne deviendra possible que par l'acquisition de la signification des codes linguistiques. Dans notre approche des codes symboliques, nous étudierons le code verbal et le code arabe dont nous nous servirons dans les épreuves de comparaison proposées aux participants de nos expérimentations.

### II - 3 - 2 - 1. L'acquisition du code verbal

Le jeune enfant est très tôt confronté à la rencontre avec cette catégorie de mots que sont les noms de nombres qu'il va devoir identifier comme tels et dont il va devoir apprendre la manipulation et les contextes d'utilisation. Toutefois, d'une langue à une autre, existent des particularités linguistiques qui favorisent plus ou moins la maîtrise de la dénomination des quantités ; ainsi, le lexique verbal numérique du français (de un à seize) est plus large que celui du chinois (un à dix). Comme nous le verrons, ces différences influent sur l'acquisition des systèmes de dénomination des nombres.

La mise en évidence dans les années 80 de capacités précoces dans le domaine numérique pouvait laisser penser que l'acquisition des premiers nombres serait relativement facile. En fait, il n'en est rien. Selon Fayol (2002), « *le passage du code analogique approximatif au code verbal précis constitue une étape difficile* ». Une étude de Wynn (1992b) met en évidence ce long cheminement. Wynn a montré à des enfants de 2 ans et demi des cartes portant des paires de collections (1 vs 2 ; 1 vs 3 ; 1 vs 4 ; 2 vs 3 ; 2 vs 4 ; 3 vs 4) et leur a demandé de désigner la quantité indiquée verbalement par l'expérimentateur (figure 15).



**Figure 15.** Exemple de stimuli utilisés pour déterminer si l'enfant est capable de désigner le nombre d'items demandé par l'expérimentateur (d'après Wynn, 1992).

Les enfants ont tous été capables d'une discrimination franche entre les collections opposant un seul objet et plusieurs autres. Par contre, ils ont échoué à désigner la collection

correcte lorsqu'ils avaient le choix entre deux collections sur lesquelles se trouvaient plusieurs objets (e.g., 3 vs 4). Vers 2 ans, les enfants semblent uniquement en mesure de différencier 1 de ce qui n'est pas 1. La capacité à déterminer plus précisément le cardinal des collections présentées nécessite une année supplémentaire pour accéder à la compréhension que les mots de nombres réfèrent à la numérosité plus compliqué.

L'acquisition de la numérosité se développe progressivement selon plusieurs niveaux. Sarnecka & Carey (2008) ont étudié la façon dont les enfants de 2 à 4 ans maîtrisent la cardinalité. Ces chercheuses rappellent la distinction suivante : les enfants sont d'abord capables de réciter la comptine numérique jusqu'à un certain point (e.g., « dix ») mais n'ont qu'une compréhension réduite des nombres, pour des petits ensembles de trois ou quatre objets (*subset-knower*). Lorsqu'on demande à un enfant de ce niveau de donner N objets, il n'utilisera pas le comptage mais donnera une poignée d'objets. Par la suite, un changement important se produit et l'enfant peut générer la cardinalité exacte pour les ensembles de cinq objets et au-delà. A ce niveau, l'enfant utilise le comptage et a acquis le principe de cardinalité<sup>9</sup> (*cardinal-principle-knower* ou *CP-knower*). Sarnecka et sa collègue se sont interrogés sur ce changement et ont établi plusieurs constats :

- Quel que soit le niveau de l'enfant (*subset-knower* ou *CP-knower*), lorsque celui-ci avait assisté à une séquence de comptage réalisée par un adulte, il était capable de répondre à la question « *Combien y en a-t-il ?* » par le dernier nom de nombre énoncé par l'expérimentateur. Cette règle concernant la particularité de la dernière étiquette est donc apprise avant la compréhension du principe de cardinalité.
- Seuls les enfants qui commencent à maîtriser le principe de cardinalité sont susceptibles de réussir des tâches arithmétiques impliquant des ajouts ou des retraits.

Les auteurs avancent que la différence entre *subset-knowers* et *CP-knowers* tient à ce

---

<sup>9</sup> Le principe de cardinalité stipule que le dernier mot de nombre énoncé dans le comptage indique le nombre total d'objets de la collection.

que les seconds, contrairement aux premiers, ont perçu qu'ajouter ou soustraire un élément d'une collection a pour résultat d'avancer ou de reculer d'un pas dans la chaîne numérique.

Néanmoins, ce dernier résultat a été débattu par Davidson, Eng et Barner (2011). Ces chercheurs ont travaillé avec des participants de 3 à 5 ans identifiés comme ayant acquis le principe de cardinalité (CP-knowers). Les expérimentateurs ont voulu savoir si, à cet âge, la connaissance du principe de cardinalité s'accompagnait de la compréhension du sens du comptage. Parmi les tâches proposées, ils ont adapté une épreuve utilisée par Sarnecka et al. (2008) et destinée à évaluer si l'enfant maîtrise le principe de succession (e.g., ajouter « 1 » à un ensemble de cinq objets à pour résultat « 6 »). Bien que les enfants aient une connaissance de la comptine numérique et soient capables de dire quel nombre vient après tel autre, la majorité des enfants ne semblent pas comprendre le principe de succession : ils échouent à faire correspondre le nombre des ajouts de perles et celui des pas dans la chaîne numérique. L'ensemble des résultats recueillis amène Davidson et al. à avancer que les enfants, chez qui a été repéré le principe de cardinalité, ne réalisent pas forcément d'induction sémantique à partir du comptage : ils connaissent la liste des mots de nombre mais cela n'implique pas la compréhension du lien avec les mécanismes numériques. Selon les auteurs, il est possible que l'induction sémantique se produise plus tardivement au cours du développement que l'acquisition du principe de cardinalité.

Pour Vilette (1994), l'acquisition de la cardinalité peut être favorisée en entraînant les enfants avec des épreuves de subitizing et de comptage. Ce chercheur a d'abord évalué des enfants de maternelle (âge moyen : 3; 8 mois) lors d'un pré-test sur une épreuve de subitizing, une épreuve de comptage et une épreuve de dénombrement. Il a ensuite réparti les enfants en quatre groupes correspondant à quatre situations d'apprentissage différentes :

1. Entraînement au comptage oral en trois phases, la dernière consistant à établir une correspondance terme à terme en pointant les éléments de la collection ;
2. Entraînement au subitizing : l'enfant doit d'abord donner une réponse rapide lorsqu'on lui montre une collection de 2, 3, 4 ou 5 items ; dans un second temps, l'enfant est invité à compter la collection et l'expérimentateur lui fait constater que son résultat correspond au dernier nombre compté ;
3. Entraînement associant alternativement les deux situations précédentes ;
4. Groupe contrôle.

Après la période d'entraînement, les enfants ont été évalués avec les mêmes épreuves que celles utilisées lors du pré-test. A l'issue de cette seconde évaluation, Vilette constate que les enfants, dont les performances se sont le plus significativement améliorées, sont ceux du groupe 3, i.e. ceux qui ont reçu un entraînement associant subitizing et comptage. Pour l'auteur, la compréhension de la cardinalité ne repose pas sur la seule maîtrise du comptage mais sur la combinaison de deux connaissances, celle du comptage et celle du subitizing

Dans la mise en place de la relation entre représentation verbale et représentation préverbale, les enfants se trouvent confrontés à deux difficultés. La première concerne le fait que les noms de nombres n'entretiennent aucune relation analogique avec la quantité. Les enfants doivent apprendre à coder la quantité à partir de symboles culturels qui s'énoncent suivant un ordre précis et qui n'ont, en eux-mêmes, aucun caractère analogique (le mot « cinq » n'est pas plus grand que « quatre »). Six renvoie à une quantité plus importante que cinq parce que six vient **après** cinq dans la chaîne verbale.

La seconde difficulté est liée au problème de la catégorisation. Pour déterminer le cardinal, les enfants doivent s'abstraire des caractéristiques perceptuelles ou de l'hétérogénéité des collections. Une étude de Mix (1999) révèle, d'une part, une mise en place progressive, chez les enfants entre 3 ans et 4 ans et demi, de la reconnaissance de

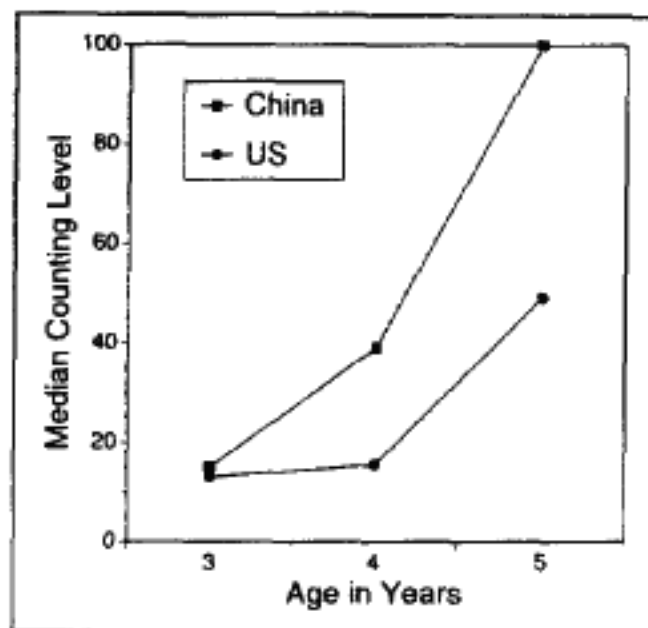


l'équivalence de collections hétérogènes et, d'autre part, un impact bénéfique de la connaissance des noms de nombres. Cet impact de la connaissance des noms de nombres est contesté par Starkey (1992). Celle-ci a proposé une étude dans laquelle les enfants se trouvaient en situation de résoudre de petites additions et soustractions à partir de boîtes de balles. Les données ont montré que de très jeunes enfants à un âge « préverbal » (i.e., 18 mois) pouvaient se représenter des quantités numériques sans l'aide du langage.

L'impact de la langue se manifeste à partir de 3 ou 4 ans avec des performances des enfants asiatiques meilleures que celles des jeunes occidentaux. Miller, Smith, Zhu et Zhang (1995) ont demandé à des enfants chinois et américains d'âge préscolaire d'effectuer diverses tâches liées aux mathématiques :

- Compter verbalement aussi loin que possible ;
- Compter des collections d'objets ;
- Résoudre de petits problèmes mathématiques.

Les résultats montrent des différences sensibles pour la première épreuve (Figure 16) : si, à 3 ans, les enfants américains et chinois présentent le même niveau de performance, l'écart se creuse de manière significative à 4 et 5 ans. Les auteurs expliquent les difficultés des jeunes américains par la structure de la langue anglaise qui rend compliquée l'acquisition des dizaines - obstacle que n'ont pas à surmonter les jeunes chinois pour lesquels la base 10 est transparente. Si Miller et ses collègues ne notent pas de différences de performance pour les deux autres tâches (comptage de collections et résolutions de problèmes), ils relèvent cependant, chez les enfants américains, un désavantage dans la compréhension du fonctionnement de la base 10 lié à la mauvaise maîtrise des noms de nombres.



**Figure 16.** Progression du comptage oral chez les enfants chinois et américains. A partir de 4 ans, les courbes se séparent significativement (d'après Miller et al., 1995).

Le fait que le système numérique verbal soit moins régulier dans certaines langues que dans d'autres a un coût perceptible en termes de lenteur d'acquisition du nom des nombres. Quoiqu'il en soit, l'enfant doit, au cours de son développement, apprendre ce lexique particulier que constitue la chaîne numérique verbale, car, selon Fayol (2005) : « *L'acquisition de la suite des noms de nombres a une incidence directe sur la capacité de manipulation des quantités. Elle permet de les évoquer, de les combiner, de les mémoriser* ».

Pour Fuson, Richards et Briars (1982), l'acquisition de cette séquence débute autour de 2 ans et se poursuit jusque vers 6 ou 7 ans. Les variations interindividuelles, concernant l'âge d'acquisition et la trajectoire, sont extrêmement importantes. Les auteurs distinguent deux grandes phases :

- Une phase initiale d'acquisition durant laquelle la séquence conventionnelle des noms de nombre est apprise et permet les premières tentatives de comptage d'objets ;
- Une phase d'élaboration avec une séquence décomposée en mots séparés et l'établissement des relations entre les éléments à compter et les noms de nombre.

Selon Fuson et al., l'enfant passe par plusieurs niveaux qui se succèdent, au cours du développement, pour acquérir la chaîne numérique :

- **Chapelet (String Level)** : les noms de nombre ne sont pas individualisés. La séquence connue est récitée comme un tout (e.g., une comptine) ;
- **Chaîne insécable (Unbreakable Chain Level)** : les mots de nombre sont individualisés mais, pour être utilisée, la séquence doit commencer dès le début ; l'énonciation ne peut se faire à partir d'un point d'entrée arbitraire ;
- **Chaîne sécable (Breakable Chain Level)** : devenue sécable, la chaîne numérique peut être énoncée à partir d'un nombre donné (« *counting up from 'a'* ») ou d'une borne à une autre (« *counting up from 'a' to 'b'* ») ;
- **Chaîne terminale (Numerable Chain Level)** : les mots de nombre de la chaîne sont devenus des unités distinctes. Ils servent à compter des ensembles d'objets dont la numérosité est comprise.

Dans leur acquisition de la chaîne verbale, les enfants doivent comprendre la syntaxe gouvernant la forme verbale des nombres. Barrouillet, Thévenot et Fayol (2010) ont voulu savoir si les enfants préscolaires avaient une connaissance de la syntaxe des grands nombres, bien avant de pouvoir compter jusqu'à ces nombres. Pour ces chercheurs, si une telle connaissance est présente, elle devrait faciliter le rappel immédiat des chaînes primitives lexicales linguistiquement correctes (e.g., « trois cent vingt six »), comparativement à celles qui ne le sont pas (e.g., « Trois six vingt cent »). Barrouillet et al. ont présenté à des enfants de 5 ans des listes comprenant de 2 à 6 primitives lexicales, la moitié pouvait être admise en français, l'autre moitié était incompatible avec le système numérique verbal français. Comme attendu, les enfants ont de meilleures performances lorsqu'il s'agit de rappeler des listes de primitives lexicales dans l'ordre syntaxiquement correct par rapport à la situation où cet ordre est violé. Les auteurs interprètent ce résultat comme une connaissance, dès 5 ans, de la

syntaxe des grands nombres. Cette connaissance, qui va au-delà de la capacité d'énonciation de la chaîne verbale, pourrait trouver son origine dans l'exposition répétée de l'enfant à la forme verbale des nombres. Les stimulations environnementales, plus ou moins explicites, permettraient à l'enfant d'acquérir, avant tout enseignement formel, une connaissance sur la façon dont les grands nombres sont construits.

### **II - 3 - 2 - 2. La quantification.**

Acquérir la maîtrise de la chaîne numérique signifie pouvoir quantifier en dénombrant. La quantification est le processus par lequel il est possible de « *répondre à la question : combien y en a-t-il ?* » (Fayol, 2012). La réponse peut être apportée grâce au subitizing, mécanisme qui permet une évaluation précise et rapide de la numérosité, mais seulement pour de petites collections de 1 à 3 ou 4 éléments (Mandler & Shebo, 1982). Avec des ensembles plus importants, la quantification peut être effectuée, de manière approximative, grâce à l'estimation.

Le dénombrement consiste à utiliser la chaîne verbale pour compter les éléments d'une collection et en déterminer le cardinal. Gelman et Gallistel (1978) ont défini un ensemble de cinq principes fondamentaux nécessaires au comptage. Il serait nécessaire que les enfants aient acquis ces principes pour associer les symboles numériques aux magnitudes analogiques (Berteletti et al., 2011). Les principes proposés par Gelman et Gallistel sont les suivants :

- Principe de correspondance terme à terme (The One-One Principle) : chaque item de la collection est désigné par un, et seulement un, pointage ;
- Principe d'ordre stable (The Stable-Order Principle) : les mots de nombres utilisés pour le comptage doivent être énoncés selon un ordre fixe, reproductible ;
- Principe cardinal (The Cardinal Principle) : la dernière étiquette de la série, le dernier mot de nombre émis lors du comptage revêt une importance particulière puisqu'il correspond aussi au nombre des éléments de l'ensemble (= le cardinal) ;

- Principe d'abstraction (The Abstraction Principle) : les trois principes précédents s'appliquent quelle que soit la collection à compter, indépendamment des caractéristiques de ses éléments ;
- Principe de non pertinence de l'ordre (The Order-Irrelevance Principle) : l'ordre de traitement (e.g. pointage) des items n'est pas pertinent pour déterminer le cardinal d'une collection qui restera le même quel que soit l'ordre d'énumération.

Gelman et Gallistel ont suggéré que les jeunes enfants possèdent une connaissance implicite des cinq principes du comptage. Mais ils peinent à exprimer ce savoir car compter les items d'une collection est une activité qui peut s'avérer coûteuse pour eux. Elle nécessite, en effet, la coordination de deux composantes : motrice (pointage, mouvements des yeux) et symbolique (e.g., énumération des noms de nombres). Il est habituel d'évaluer les performances des jeunes enfants : celles-ci mettent en évidence des erreurs dans le comptage des collections de grande taille. Mais cela ne dit rien quant à leurs compétences : l'expression de celles-ci peut être limitée par le coût de la tâche en termes d'articulation des principes.

Avec des enfants de 3 à 5 ans, Gelman et Meck (1983) ont mené une série de quatre expériences afin de montrer que les principes de comptage peuvent se manifester de manière séparée mais que les difficultés surviennent lorsque la tâche exige leur coordination. Dans leurs trois premières études, les participants devaient écouter une poupée en train d'apprendre à compter ; pour l'aider, ils devaient indiquer si la séquence de comptage était correcte ou erronée. Les enfants devaient donc détecter les erreurs, mais n'avaient pas à produire eux-mêmes le comptage. La première des trois études évaluait la connaissance du principe de correspondance terme à terme, la deuxième du principe d'ordre stable et la troisième du principe cardinal. Dans la quatrième expérience, les enfants devaient compter par eux-mêmes différents objets (dans l'une des quatre conditions, les objets se trouvaient sous une plaque de verre empêchant toute manipulation des objets).

Les résultats (Tableau II - 1) montrent que les jeunes enfants connaissent les principes du comptage pris isolément mais que les performances diminuent lorsqu'ils doivent les coordonner.

**Tableau II-1.** Récapitulatif des résultats recueillis par Gelman et Meck (d'après Fayol, 1990, page 68)

<b>Tableau 3.4: Comparaison des performances obtenues par les enfants lorsque la tâche met en jeu les "principes" pris isolément (A; B; C; d'après Gelman et Meck 1983) et lorsqu'elle nécessite leur coordination (D; d'après Gelman 1983).</b>			
<b>A) Ordre stable (p. 350)</b>			
<b>Ages</b>	<b>Essais exacts</b>	<b>Essais inexacts</b>	
3 ans	.96	.76	
4 ans	1.00	.96	
5 ans	.98	.97	
<b>B) Correspondance terme à terme (p. 348)</b>			
<b>Ages</b>	<b>Essais exacts</b>	<b>Essais inexacts</b>	
3 ans	1.00	.67	
4 ans	1.00	.83	
<b>C) Cardinalité (établi d'après p. 352)</b>			
<b>Ages</b>	<b>Essais exacts</b>	<b>Essais inexacts</b>	
3 ans	.96	.85	
4 ans	1.00	.99	
<b>D) Pourcentage de sujets appliquant correctement les trois principes A, B et C en fonction de l'âge et de la taille des collections</b>			
<b>Ages</b>	<b>3 ans</b>	<b>4 ans</b>	<b>5 ans</b>
<b>Taille des collections</b>			
n=7	.19	.47	.80
n=11	.05	.37	.47

De la même manière que nous avons développé les caractéristiques du code verbal, nous allons, dans la partie suivante, aborder celles du code arabe. L'une des épreuves que nous présenterons à nos participants comprend des comparaisons de nombres écrits en

chiffres arabes (jusqu'à 12). Il est donc important de connaître les données recueillies dans la littérature concernant l'acquisition de ce code par les enfants.

### **II - 3 - 2 - 3 . L'acquisition du code arabe (ou indo-arabe).**

D'une manière générale, les études manquent sur la façon dont les enfants peuvent acquérir ce système de notation qui exige un enseignement explicite, mais qui donne sans doute lieu désormais à un apprentissage implicite (Fayol, 2012). La représentation verbale s'installe avant la représentation arabe ; cette dernière fait donc l'objet d'un enseignement explicite via le code verbal. Les difficultés rencontrées durant la phase d'acquisition du système indo-arabe concernent essentiellement la notation positionnelle, mais pas uniquement. Le code arabe étant un code écrit, des difficultés spécifiques, liées à un problème graphique ou spatial, peuvent apparaître lors de l'apprentissage. Fisher (2011) note qu'avant de parvenir à une écriture correcte, beaucoup d'enfants de 5 ou 6 ans doivent franchir l'étape de l'écriture en miroir qui affecte non seulement les lettres mais aussi les chiffres (en particulier 1, 2, 3, 7 et 9).

Le code verbal est dominant dans un premier temps, ce qui peut expliquer des erreurs telles que la transcription sous dictée 6010 pour 70 ou 10024 pour 124 (Seron & Fayol, 1994). Ces erreurs initiales de transcodage vont dans le sens d'une médiation par le langage. Jarlegan, Fayol et Barrouillet (1996) ont mené une étude avec des enfants de 7 ans à qui ils ont proposé des tâches de transcodage entre les trois codes analogique, verbal et arabe. Les données recueillies leur ont permis de conclure qu'en accord avec le modèle du triple code, les transcodages entre code verbal et code arabe ne transitaient pas nécessairement par une représentation intermédiaire sémantique; il pourrait donc y avoir un mécanisme direct de transcodage du verbal vers l'indo-arabe.

Une certaine indépendance de la représentation arabe par rapport à la représentation verbale a pu être mise en évidence par l'étude d'enfants de troubles spécifiques du langage

(TSL). Donlan et Gourlay (1999) ont mené une recherche avec un groupe de TSL âgés de 8 ans qu'ils ont appariés avec un groupe contrôle, soit sur l'âge soit sur le niveau de compréhension de la langue. Les enfants étaient soumis à trois tâches de comparaisons de paires de stimuli : des surfaces, des chiffres et des nombres de deux chiffres. Les résultats ont révélé un effet de distance pour tous les groupes. La performance des TSL dans les jugements des nombres à deux chiffres était identique à celle de leurs pairs du même âge, et pouvait être prédite par les habiletés non verbales et non par les capacités langagières. Selon les auteurs, ces données suggèrent une autonomie des systèmes non verbaux. Avec les jeunes enfants, Miller et al. (1995) encouragent d'ailleurs, pour la langue anglaise, l'utilisation des numéraux arabes pour compenser la complexité des noms de nombre.

Nous venons d'aborder l'apprentissage des systèmes symboliques. La question se pose maintenant de la mise en relation de ces systèmes symboliques avec le système analogique. A travers l'hypothèse de la ligne numérique, nous allons analyser la façon dont s'effectue le traitement de la magnitude, à travers notamment des études comportant des comparaisons de quantités présentées sous forme symbolique ou non symbolique.

#### **II - 3 - 2 - 4 . L'articulation entre représentations analogique et symbolique. La ligne numérique.**

Nous avons évoqué la ligne numérique mentale dans la partie précédente - consacrée aux adultes. Rappelons qu'il s'agit d'une métaphore destinée à modéliser la représentation interne des numérosités et les relations de proximité entre les nombres. Cette conceptualisation a permis de rendre compte des effets de distance, de taille, de rapport ainsi que l'effet SNARC. Une idée, directement en lien avec notre problématique, suggère que les noms de nombres (symboliques) ne soient pas uniquement des étiquettes mais puissent s'associer avec la représentation analogique. Les effets constatés sur la dimension analogique



peuvent ensuite être retrouvés sur la dimension symbolique. Plusieurs études se sont intéressées à la façon dont se constituait la ligne numérique au cours de l'enfance.

A la suite de Siegler et Opfer (2003), Berteletti, Lucangeli, Piazza, Dehaene et Zorzi (2010) ont investigué le développement des représentations du nombre et l'évolution de la ligne numérique (logarithmique vs linéaire). Leur population était composée de plusieurs groupes d'enfants d'âge préscolaire. Ces chercheurs ont fait l'hypothèse que, dans une perspective génétique, le gain dans les acquisitions numériques (connaissance des mots de nombres, compréhension des principes du comptage) pourrait générer des transitions entre représentation logarithmique (compressée) et linéaire (plus précise). Dans une première expérience, ils ont demandé à trois groupes d'enfants classés en fonction de l'âge (respectivement 48, 60 et 71 mois d'âge moyen) de placer des nombres, soit sur une échelle de 1 à 10, soit sur une échelle de 0 à 100 (soit au-delà !). Dans une seconde expérience, ils ont repris sensiblement le même protocole en remplaçant l'échelle de 0 à 100 par une échelle de 1 à 20. Pour l'expérience 1, les résultats montrent que :

- La ligne numérique est de nature logarithmique pour tous les groupes avec l'échelle de 0 à 100 ;
- Par contre, avec l'échelle de 1 à 10, le positionnement est logarithmique avec le groupe des enfants les plus jeunes et linéaire avec les deux autres groupes.

Pour l'expérience 2, les résultats sont les suivants :

- Sur l'échelle de 0 à 20, les enfants les plus jeunes présentent un pattern de réponses logarithmique alors que ceux des autres groupes tendent à répondre de manière linéaire.

Dans leur conclusion, les auteurs avancent l'idée d'une coexistence de plusieurs représentations du nombre. La représentation logarithmique, signature du système d'approximation numérique, va se modifier avec les apports des contextes d'utilisation du

nombre pour parvenir à une précision affinée. Ce changement se manifeste par un glissement progressif vers une représentation de type linéaire.

Afin d'étudier le développement de la ligne numérique avec des enfants ayant de faibles performances ou présentant des troubles dans l'apprentissage des mathématiques, Geary, Hoard, Nugent et Byrd-Craven (2008) ont procédé pendant deux ans à une étude longitudinale. Parmi d'autres résultats, ils ont trouvé que les enfants avec des troubles en mathématiques étaient moins précis que les enfants tout-venant et les enfants faibles en mathématiques dans leur placement des nombres sur une ligne numérique (échelle de 0 à 100) : les dyscalculiques s'appuient plus sensiblement sur une représentation analogique de la magnitude que les deux autres groupes. Au début du cursus scolaire, les tout-venant utilisent plus fréquemment une stratégie linéaire que les faibles en calcul mais cette différence s'estompe entre la première et la deuxième année. Si les dyscalculiques montrent aussi, au fil du temps, une amélioration dans la précision du placement et l'utilisation de la stratégie linéaire, ces évolutions restent limitées par rapport à celles des autres groupes. Pour ces chercheurs, la ligne numérique est un outil mathématique primordial et les difficultés dans sa représentation ont des implications tout au long de la scolarité.

De leur côté, Sekuler et Mierkiewicz (1977) ont trouvé une composante développementale dans l'installation de l'effet de distance avec des chiffres arabes. Ils ont étudié la façon dont des enfants, des adolescents et des adultes jugeaient l'inégalité numérique au cours d'épreuves de comparaisons de chiffres (de 1 à 9). Les participants devaient simplement décider lequel de deux chiffres était le plus grand. Les auteurs notent que, s'il existe des différences entre les groupes, quel que soit l'âge et cela dès 5 ans, ce sont les mêmes processus qui concourent à produire un effet de distance numérique en lien avec une représentation analogique.

Un autre résultat conduit à s'interroger sur la relation entre code (arabe) et représentation des quantités. Avec des adultes et des enfants de 6 et 10 ans, Girelli, Lucangeli et Butterworth (2000) ont étudié le changement dans la façon de traiter au cours du développement les chiffres arabes. Ils ont utilisé un paradigme de type Stroop afin de proposer des comparaisons de type numériques et physiques. Les items étaient constitués de paires de numéraux arabes. Dans la tâche de comparaisons numériques, les participants devaient choisir le plus grand des deux nombres ; dans la tâche de comparaison physique, ils devaient choisir le chiffre de plus grande taille sans tenir compte de la dimension sémantique. Les essais pouvaient être soit congruents (e.g., 2 6) lorsque tailles numérique et physique allaient dans le même sens, soit incongruents (e.g., 6 2) quand le nombre numériquement le plus grand avait une taille plus petite. L'idée, dans un paradigme de type Stroop, est de tester l'automatisme des traitements en observant les effets de congruence, d'interférence ou de facilitation. Les chercheurs ont voulu savoir 1) dans quelle mesure la dissonance entre taille physique et numérique pouvait affecter la performance des enfants et 2) si celle-ci variait au cours du développement. Girelli et al. ont pu, grâce à ce paradigme, montrer des changements dans la façon dont les enfants traitent les numéraux arabes. Dans la tâche de comparaison numérique, un effet de congruence de la taille est obtenu à tous les âges (celui-ci se manifeste par des temps de réaction plus lents lors des essais incongruents comparativement aux essais neutres ou congruents et par des temps de réaction plus courts lors des essais congruents). Il existe cependant des différences entre les âges, les enfants les plus jeunes étant moins sujets à l'interférence que les plus âgés (i.e., ils n'ont pas encore totalement automatisé la dimension numérique pour la mettre en conflit avec la dimension physique).

Concernant la tâche de comparaison physique, les auteurs n'ont pas trouvé d'effet de congruence de la taille avec des enfants de CP (first-grade) quand la tâche consistait à comparer les tailles physiques des chiffres arabes et à ignorer leurs valeurs numériques. La

performance des plus jeunes n'est pas influencée par la non congruence entre information sémantique et physique. L'effet d'interférence de la dimension non pertinente n'apparaît qu'au niveau du CE2. Selon ces auteurs, il semblerait donc que les enfants de 6 ans n'accèdent pas de manière automatique à la quantité puisque la valeur des chiffres n'interfère pas avec l'appréciation de la taille physique.

Pourtant, dans une étude avec des adultes et des enfants de 5 ans, Temple et Posner (1998) ont mis en évidence un effet de distance avec des chiffres arabes pour les deux populations. Les participants devaient comparer à 5 soit des collections de jetons (●), soit des chiffres arabes en répondant le plus vite possible. Les résultats montrent que :

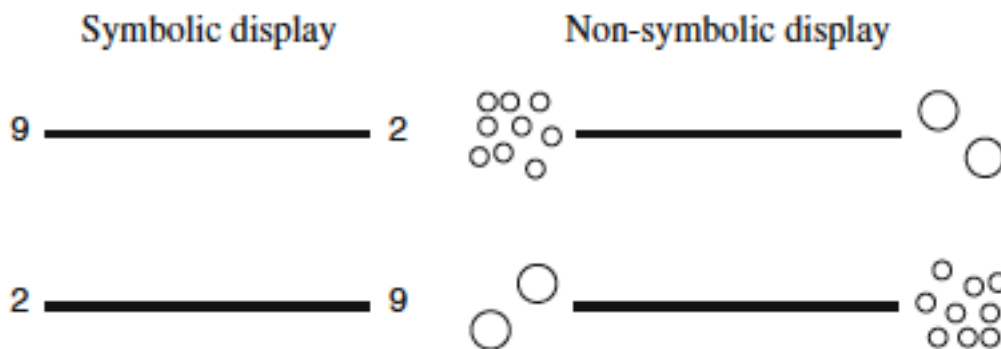
- Les temps de réponse des enfants sont plus élevés que ceux des adultes ;
- L'effet de distance se manifeste avec les deux populations dans les deux types de notation.

Les auteurs notent que, d'une part, l'analyse de la quantité est similaire quel que soit le format d'entrée et que, d'autre part, pour les uns et pour les autres, les zones cérébrales impliquées sont les mêmes (i.e. les aires pariétales inférieures) et correspondent à ce qui est prédit par le modèle du triple code.

Dans une série d'études, de Hevia et Spelke (2009) ont investigué le maillage entre nombre et espace. Elles ont demandé à des enfants de 5 et 7 ans ainsi qu'à des adultes d'indiquer le milieu d'une ligne (paradigme de bissection manuelle) ayant à chaque bout soit des chiffres arabes (i.e., 2 vs 9), soit des ensembles de points (figure 17). Les lignes sont organisées de façon à ce que la plus grande numérosité se trouve aussi bien à droite qu'à gauche (ce qui est inhabituel). Les expérimentatrices ont fait l'hypothèse que s'il existe une relation entre nombre et espace, les participants se comporteront de façon biaisée en choisissant un point plus proche de la numérosité la plus large.

- Dans ce type de tâche, les adultes sont capables de représenter de façon abstraite la magnitude sur une échelle horizontale. Ils montrent le biais attendu vers la numérosité la plus importante et ont une performance équivalente que ce soit avec des stimuli symboliques ou non symboliques.
- Les enfants de 7 ans auxquels il est demandé d'effectuer la tâche de bissection à partir d'ensemble de points, se comportent comme les adultes témoignant d'un maillage précoce entre l'espace et le nombre à partir de stimuli non symboliques. Par contre, avec des chiffres arabes, les enfants de 7 ans ne montrent pas le biais attendu vers la numérosité la plus importante.
- Les enfants de 5 ans n'ayant pas été scolarisé (ou n'ayant eu qu'un temps réduit de scolarisation) montrent un biais identique à celui observé chez les enfants de 7 ans et chez les adultes en présence de stimuli non symboliques.

De Hevia et Spelke concluent de leurs travaux l'existence d'une étroite relation entre nombre et espace, non seulement pour les adultes, mais aussi pour les enfants qui, avant tout enseignement formel, montrent une représentation numérique spontanée et automatique ainsi qu'un maillage entre nombre et espace indépendant de toute instruction. Elles voient dans leurs résultats la preuve de l'émergence précoce de la ligne numérique. D'autre part, il apparaît qu'à 7 ans les enfants ne peuvent avoir un accès suffisant aux chiffres arabes pour l'ancrer dans le traitement spatial.



**Figure 17.** Exemples de stimuli symboliques et non symboliques utilisés par de Hevia et Spelke (2008).

Les données que nous venons de présenter suggèrent que, vers l'âge de cinq ans, les codes symboliques et code analogique commencent à entrer en résonance. Des études montrent qu'avec de jeunes enfants, les caractéristiques de l'analogique (effet de distance, de rapport) peuvent se manifester sur le symbolique sans que la nature du lien soit néanmoins clairement établie. Avec pour cadre le modèle du triple code, nous allons poursuivre les investigations destinées à comprendre comment se développe cette mise en relation de la dimension symbolique sur la dimension analogique. Avant d'aborder la partie expérimentale, nous présentons maintenant les hypothèses qui ont guidé nos recherches.

## **CHAPITRE II : PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESE.**

Nous avons présenté les arguments neuropsychologiques et anatomo-fonctionnels qui ont contribué à l'élaboration par Dehaene (1992 ; Dehaene & Cohen, 2000) du modèle dit du « triple code ». Dans l'architecture de ce modèle, la sémantique (sens et intuition) du nombre est précocement supportée par la représentation analogique préverbale à partir de laquelle peuvent s'effectuer les estimations et les comparaisons de quantités non symboliques : il est possible aux enfants comme aux adultes de juger des différences de quantités non spécifiquement numériques (e.g., intensités lumineuses, durées, surfaces, etc...) avec une vitesse et une précision d'autant plus élevées que les quantités sont éloignées. Il s'agit là de *l'effet de distance* qui peut se résumer ainsi : dans une tâche de comparaison, plus la différence entre quantités est importante, plus la réponse est exacte et rapide. Une manifestation de cet effet associée à la représentation analogique se trouve, par exemple, dans une étude menée par Ansari et Dhital (2006).

Ces deux chercheurs ont demandé à des enfants d'environ 10 ans et à des adultes de sélectionner entre deux ensembles celui comprenant le plus grand nombre de carrés. Pour éviter que les participants n'appuient leurs jugements sur des indices spatiaux, les chercheurs ont proposé un dispositif permettant un contrôle strict de la surface, en s'assurant que la surface totale occupée par les carrés était équivalente pour chaque numérosité à comparer : ils ont montré que les deux populations manifestaient une sensibilité à la distance numérique (l'activation du sillon intrapariétal gauche étant toutefois plus importante chez les adultes que chez les enfants). La représentation analogique, non symbolique, ne serait pas spécifique à l'espèce humaine, mais existerait aussi chez les animaux, du fait que cette capacité de traitement approximatif constitue, dans une perspective évolutionniste, un avantage adaptatif non négligeable.

En plus de la représentation analogique, le modèle du triple code postule l'existence d'une dimension symbolique générale, variable selon les cultures, et permettant, lorsque les codes sont acquis, un traitement précis des quantités. En Français, cette dimension symbolique comprend deux composantes, l'une auditive verbale (e.g., les noms de nombres), l'autre visuelle (e.g., les chiffres arabes). La dimension symbolique est postulée asémantique dans la mesure où les codes verbaux ou écrits ne sont pas en eux-mêmes porteurs du sens du nombre. Ils ne le deviennent que par leur mise en relation avec la représentation analogique non symbolique. Au cours du développement, les représentations symboliques vont précisément « se greffer » sur la représentation analogique. Nous avons évoqué précédemment les travaux de Sekuler et al. (1977). Ces auteurs ont pu mettre en évidence chez l'enfant, dès 5 ans, un effet de distance numérique avec des chiffres arabes. La mise en évidence de cet effet de distance « signe » en quelque sorte l'articulation du symbolique sur l'analogique. Toutefois, à ce jour, rien n'est dit précisément sur l'évolution de cette mise en relation du symbolique et du non symbolique au cours de l'enfance. Notre objectif est d'examiner, dans une perspective développementale, l'installation de l'appariement entre représentation analogique et représentations symboliques.

Les représentations verbale d'une part, et indo-arabe d'autre part, relèvent des représentations symboliques. Elles sont spécifiquement humaines (et culturelles) et apparaissent relativement tard dans l'ontogenèse, la représentation verbale précédant la représentation indo-arabe, qui s'acquiert en partie par le biais de la précédente. Dans le modèle du triple code, ces deux représentations se « greffent » sur la représentation analogique qui leur donne un sens. En théorie, elles ne peuvent donc ni l'une ni l'autre se développer en dépassant la représentation analogique. Il ne suffit pas de réciter une suite de noms de nombres pour maîtriser les quantités, et, inversement on peut maîtriser des quantités sans avoir recours à des noms de nombres.. L'étude de Wynn (1992b), relatée dans la partie



théorique, illustre le cheminement nécessaire pour les jeunes enfants avant qu'ils ne parviennent à associer les nombres 3 ou 4 à la quantité correcte. De même, les expériences réalisées avec les Mundurucus par Pica et al. (2004) montrent que l'intuition numérique se manifeste même avec un lexique réduit de mots de nombres et permet des estimations à partir de la représentation analogique, chez les indiens d'Amazonie comme chez les étudiants occidentaux.

Le modèle du triple code prédit que les performances aux épreuves qui mobilisent la représentation analogique devraient être supérieures - ou au moins équivalentes - aux performances relevées aux épreuves nécessitant le recours aux représentations symboliques en général, et, dans un premier temps, verbales. Quant aux performances associées à la représentation indo-arabe, elles devraient rester systématiquement inférieures (et au plus égales) à celles associées aux représentations verbales. Cette hiérarchie des performances devrait se retrouver aussi bien chez les enfants tout-venant qu'avec d'autres populations, comme les enfants prématurés ou les enfants porteurs de trisomie 21, avec lesquels nous avons travaillé. En effet, nous avons vu que la présence de la représentation non symbolique est attendue quel que soit le niveau de maturation. Elle a une composante biologique, universelle, et a pu être observée de manière très précoce chez le bébé et chez les animaux d'espèces variées (singes, rats, poissons, oiseaux...).

En fonction des éléments que nous venons de présenter, nous pouvons formuler notre principale hypothèse : elle stipule que la structure de la représentation non symbolique (testée par l'effet de distance) devrait toujours être plus avancée, donc plus précise et rapide, que celle relevée avec les systèmes symboliques, le langage oral d'abord, le système arabe ensuite. On s'attend donc à obtenir, à épreuve équivalente (testant l'effet de distance), la hiérarchie de performances suivante : les performances aux épreuves non symboliques (A) seront mieux réussies que les performances aux épreuves avec symbolique verbale (Sv), elles-

mêmes étant mieux réussies que les performances aux épreuves avec symbolique arabe (Sa) (i.e.,  $A \geq S_v \geq S_a$ ). Afin d'étudier au plus près les performances, nous avons utilisé les profils individuels pour compléter les résultats de groupes fournis par les analyses statistiques.

Nous avons, d'une part, conduit des expérimentations avec des participants adultes, des enfants tout-venant de 4 et 5 ans ; d'autre part, investigué la manière dont les représentations étaient associées pour le traitement du nombre chez deux catégories de populations dont des troubles en calcul ont été identifiés : des enfants grands prématurés et des enfants trisomiques. Le travail expérimental, que nous allons développer par la suite, a essentiellement consisté à demander aux divers participants d'effectuer des tâches de comparaisons portant sur des items relevant de chacune des représentations postulées par le modèle du triple code (analogique, verbale et visuelle). Selon Van Nieuwenhoven, « *l'habileté à déterminer la plus grande de deux collections ou le plus grand de deux nombres fait, en effet, intégralement partie de ce qu'on peut appeler le sens du nombre* » (1999 ; p.17). L'aptitude à dire quel est le plus grand de deux nombres est, selon Dehaene (2005), une des capacités arithmétiques les plus élémentaires. Le critère d'analyse prépondérant est l'effet de distance dont l'opérationnalisation peut aussi se faire par *l'effet de rapport*, synthèse de l'effet de distance et de l'effet de taille.

Selon l'effet de rapport, on attend des erreurs d'autant plus nombreuses et des durées d'autant plus longues que les quantités à comparer sont proches (effet de distance). L'effet de rapport prend en effet en compte à la fois la taille des collections et la distance numérique. Il implique que, quand le rapport entre deux numérosités se rapproche de « 1 », la capacité à effectuer une discrimination entre ces deux numérosités diminue (e.g., comparer deux ensembles avec un ratio de 1/4 devrait être plus facile que comparer avec un rapport de 1/2). Dans la littérature, l'effet de rapport a été utilisé dans plusieurs études. Par exemple, Xu et Spelke (2000) ont mis en évidence que les enfants de six mois pouvaient discriminer des

ensembles de points selon un rapport de 1/2 mais échouaient avec un rapport de 1/3. Afin d'investiguer les mécanismes de représentation des grandeurs, Huntley-Fenner et Cannon (2000) ont demandé à des enfants de 3 à 5 ans d'effectuer des comparaisons organisées selon les rapports 1/2 et 2/3. Ces chercheurs ont fait l'hypothèse, confirmée par leurs résultats, que le taux d'erreurs augmenterait quand le ratio des grandeurs à comparer se rapprocherait de « 1 » (i.e., quand l'écart, la distance entre les collections se resserrerait). Chez l'adulte, nos hypothèses prévoient aussi que les erreurs et les temps de réaction augmentent quand les distances se rapprochent de 0 et les rapports de 1 (effet de rapport), et cela quelles que soient les modalités de représentations testées. Chez l'enfant, selon les représentations, des différences sont attendues par rapport à l'adulte.

Notre hypothèse ( $A \geq S_v \geq S_a$ ) se situe dans la perspective du modèle du triple code envisagé dans une perspective développementale mais aussi fonctionnelle. Différentes catégories de participants ont été recrutées. On s'attend donc à trouver :

- Avec les adultes tout-venant : c'est avec des adultes possédant une maîtrise de l'arithmétique élémentaire que le modèle du triple code a été élaboré. Ils nous fourniront donc une ligne de base par rapport à laquelle nous pourrions comparer les autres catégories de participants. L'effet de distance (ou de rapport) devrait se manifester avec ou sous chacune des dimensions analogique ou symbolique.
- Avec les enfants de 4 ans et 5 ans tout-venant : l'effet de distance (ou de rapport) est attendu sur la dimension non symbolique, analogique, et devrait apparaître dans les épreuves de comparaisons des quantités continues (cercles) ou discontinues (ensembles de jetons, rectangles). Pour les représentations symboliques, l'articulation avec l'analogique étant supposée en voie d'installation, l'effet de distance (ou de rapport) avec les quantités présentées verbalement ou visuellement (chiffres arabes) est susceptible de ne pas se manifester. A travers l'étude des profils individuels, nos

données devraient permettre de rendre compte de performances plus stables, plus précises avec les quantités non symboliques qu'avec les quantités symboliques. Une progression dans l'exactitude des réponses et une plus grande rapidité des temps de réaction est attendue pour les enfants de 5 ans.

- Avec les enfants grands prématurés : les enfants grands prématurés, du fait de leur immaturité cérébrale, sont plus exposés à développer des difficultés en arithmétique. En appariant des enfants prématurés de 5 ans avec des enfants tout-venant, nous devrions observer, lors des épreuves de comparaisons inspirées du modèle du triple code, soit une atteinte d'une des trois composantes, à savoir la représentation analogique, verbale ou arabe, soit une difficulté à établir les relations entre représentation analogique et représentations symboliques chez ces enfants, troubles qui pourraient rendre compte des difficultés arithmétiques observées au cours de leur scolarité.
- Avec les enfants trisomiques : ces enfants manifestent des difficultés en calcul et un retard de langage. Huntley-Fenner (2001) a étudié l'évaluation des numérosités chez des enfants de 5 à 7 ans. Il a mis en évidence que les capacités d'estimation de numérosités et le sens approximatif des grandeurs sont, à 5 ans, déjà qualitativement similaires à celles de l'adulte. Ce chercheur a suggéré que la diminution de la variabilité des estimations avec l'âge pourrait provenir de la maîtrise de la suite des mots de nombres et des expériences du comptage. Le travail sur le langage aurait un impact direct sur la relation entre représentation auditive verbale et représentation analogique des quantités en rendant plus précise et plus fine cette relation. L'expérience langagière associée aux noms de nombres interviendrait comme un outil cognitif pouvant favoriser la qualité du « maillage » entre les numéraux et la quantité qu'ils représentent. De ce fait, peut-être que, chez l'enfant trisomique, les interactions

entre la représentation analogique supposée initialement présente et la représentation symbolique verbale permettraient d'améliorer les performances. Rousselle et Noël (2007) ont suggéré que les troubles dans l'apprentissage des mathématiques tenaient dans la difficulté à traiter la numérosité à partir des symboles ; les enfants faibles en calcul seraient capables de comparer les quantités de manière analogique mais ils présenteraient un déficit d'accès à la représentation symbolique. Le fait que les enfants trisomiques présentent un retard de langage nous permettra de tester cet impact éventuel du symbolique sur la relation entre représentation symbolique et représentation non symbolique plus aisément qu'avec des enfants tout-venant.

Nous allons maintenant aborder la partie empirique au cours de laquelle nous présenterons la méthode et les résultats pour les adultes, les enfants de 4 ans, les enfants de 5 ans, les prématurés et les trisomiques 21.

## **2<sup>ième</sup> PARTIE : PARTIE EMPIRIQUE**

# **CHAPITRE I - PRESENTATION DU TRAVAIL DE RECHERCHE**

## **I - 1 - Introduction**

Dans la première partie, nous avons décrit l'architecture du triple code élaborée par Dehaene. Afin de décrire les bases cognitives de l'arithmétique élémentaire, elle suppose trois représentations (analogique, verbale et visuelle arabe) dont l'articulation permet un traitement des quantités numériques. Avec les expériences qui ont été réalisées, nous allons analyser en détail la façon dont les relations s'établissent entre les trois systèmes. Nous nous plaçons dans une optique développementale car on connaît mal la façon dont le symbolique se lie à l'analogique préverbal. Nous avons conduit cinq études pour étudier l'articulation analogique / symbolique :

- Dans la première, nos participants sont des adultes pour lesquels la maîtrise du nombre est acquise. Cela nous donnera une ligne de base grâce à laquelle les résultats des plus jeunes pourront être mis en perspective.
- Dans la deuxième, les participants sont des enfants de 4 ans. Ils ont commencé à être scolarisés et ont une connaissance encore naissante des codes symboliques. Le lien avec l'analogique est donc supposé être en construction. Une analyse des profils sera conduite pour approcher, grâce aux performances individuelles, les mécanismes impliqués *pour chaque participant* dans le traitement des quantités.
- Dans la troisième, les participants sont des enfants de 5 ans. Plus âgés que ceux du groupe précédent, ils ont aussi bénéficié d'un temps d'enseignement supplémentaire concernant les codes verbaux et arabes ce qui devrait se retrouver au niveau de leurs performances. Nous analyserons les profils individuels.
- Dans la quatrième, les participants sont des enfants prématurés dont les données de la littérature montrent qu'ils sont plus susceptibles que les enfants tout-venant

de développer des troubles en calcul. En les appareillant avec des enfants tout-venant, nous voulons voir si une dimension particulière - analogique ou symbolique - postulée par le triple code est atteinte, ce qui expliquerait leurs moindres performances. Nous analyserons les profils individuels.

- Dans la cinquième, les participants sont des enfants atteints de trisomie 21 qui ont été soumis à un entraînement sur le symbolique. Cette expérience revêt un statut théorique précis et correspond à l'idée qu'une intervention sur le comptage et le dénombrement aurait un impact sur la représentation symbolique, sans exclure un effet sur le non symbolique.

Nos travaux étant basés sur le triple code, nous avons conçu un dispositif expérimental avec des épreuves destinées à évaluer chacune des représentations associées à ce modèle. Avec des variantes que nous signalerons lorsque ce sera nécessaire, l'ensemble des participants (à l'exception toutefois des enfants trisomiques pour lesquels les conditions de passation ont été différentes) a été confronté à un socle commun de tâches de comparaisons présentées sur un écran d'ordinateur et prenant en compte les dimensions symbolique et analogique. Nous exposons ici notre méthode en décrivant d'abord le matériel de test puis la procédure utilisée.

## **I - 2 - Présentation de la méthode : matériel et procédure**

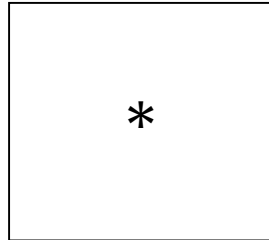
Les épreuves suivantes ont été conçues sur Psyscope (Cohen, Mac Whinney, Flatt & Provost, 1993). Elles étaient toutes présentées sur un ordinateur MacIntosh (iBook). Ce programme permet le recueil, pour chaque item, du temps de réaction et du nombre d'erreurs.

Concernant les épreuves présentées sur ordinateur, la procédure utilisée était la même avec les enfants et les adultes. Le protocole complet avec l'ensemble des items pour chaque format de comparaison (analogique et symbolique) est présenté en annexe 1.



### **I - 2 - 1 - Epreuve 1 : mesure du temps de réaction simple (TRS)**

Le stimulus, une étoile à six branches de couleur noire (diamètre : 0.95 cm), apparaissait au centre de l'écran de l'ordinateur. Un appui sur la barre « Espace » faisait disparaître l'étoile, un nouveau stimulus survenait après une pause de 2000 ms.



**Figure 18.** Présentation d'une étoile au centre de l'écran.

Il s'agit d'une mesure de temps de réaction simple (TRS) visant à évaluer la vitesse avec laquelle le participant réagit à l'apparition d'un stimulus. L'étoile est présentée à cinq reprises. Dès l'apparition, le participant doit appuyer le plus rapidement possible sur la touche « Espace » du clavier de l'ordinateur. La consigne est la suivante : *«Vous allez voir apparaître une étoile sur l'écran ; dès que vous la verrez, appuyez le plus vite possible sur cette touche ».*

Cette mesure était effectuée à deux reprises au début et à la fin de la passation. Elle permettait de déterminer un paramètre individuel impliqué dans toutes les mesures temporelles : le temps de réaction simple (TRS), dont la vitesse varie d'un individu à l'autre. Dix mesures de TRS (2x5) ont été recueillies pour chaque participant : *le TRS moyen pour un participant a été établi à partir des résultats aux trois derniers items de la seconde série quand ne se posait plus le problème de la familiarisation avec l'outil informatique.*

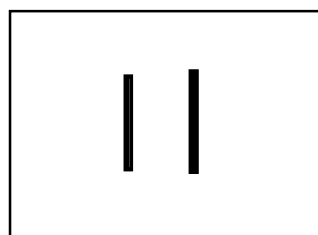
La constitution d'un temps de réaction moyen a permis d'obtenir l'indice de rapidité propre à chaque sujet, un seuil en deçà duquel les réponses pouvaient être dûes soit à une mauvaise manipulation, soit à un manque d'attention pour la tâche. Dans les analyses portant

sur les épreuves de comparaisons présentées sur ordinateur, le TRS nous a servi à exclure les temps de réaction inférieurs à ce TRS individuel moyen. Cette mesure a donc permis de débarrasser les fichiers ultérieurs des données incohérentes (réponses trop rapides) : les données étaient supprimées au-delà de 2 ET. Dans l'étude avec les prématurés, cette mesure de rapidité individuelle est entrée en covariant dans les analyses de comparaison entre les deux groupes, celui des enfants tout-venant et celui des prématurés.

Les six épreuves suivantes ont été conçues à partir du modèle de Dehaene qui postule que le sens du nombre repose sur des représentations analogiques et symboliques. Elles présentaient des séries de comparaisons de deux éléments, l'un placé à gauche, l'autre à droite de l'écran de l'ordinateur. Le choix de l'élément de gauche correspondait à un appui sur la touche « s » du clavier, le choix de celui de droite à la touche « l ». Chacune de ces deux touches, située respectivement à main gauche et droite du participant, était repérable par une gommette noire. L'appui faisait disparaître l'item en cours et déclenchait la mise en route immédiate de l'item suivant.

### **I- 2- 2 - Epreuve 2 : comparaisons de réglettes**

Deux réglettes parallèles et verticales apparaissaient simultanément sur l'écran blanc de l'ordinateur. La différence de taille entre les deux réglettes était à chaque fois de 1 cm. La largeur des réglettes était de 0,5cm, la longueur variait de 4,5 à 7 cm.



**Figure 19.** Présentation de deux réglettes sur l'écran.

Cette épreuve consiste à comparer deux réglettes de longueurs différentes. Elle peut être conçue, pour les enfants comme pour les adultes, comme un temps de familiarisation avec le matériel informatique et comme un premier contact avec la consigne qui exigera lors des épreuves suivantes de prendre en compte les notions de « plus grand » et « plus petit ».

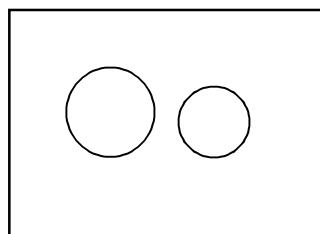
Douze comparaisons de réglettes sont présentées suivant un ordre aléatoire. La distance entre les réglettes est à chaque fois de 1 cm. Six comparaisons sont présentées dans une configuration Petite réglette - Grande réglette, six autres dans la configuration inverse.

La consigne est la suivante : « *Maintenant, vous allez voir apparaître deux baguettes sur l'écran. Montrez-moi quelle est la plus grande des deux en appuyant sur la touche noire correspondante du clavier. Appuyez le plus vite possible sans vous tromper* ».

Pour les enfants, cette épreuve sert de contrôle, c'est-à-dire que si l'enfant échoue à 50% des items, il ne sera pas pris en compte pour la suite des épreuves.

### **I - 2 - 3 - Epreuve 3 : comparaisons de cercles**

Il s'agit d'une tâche de comparaison de quantités analogiques continues. Deux cercles de surfaces différentes étaient présentés simultanément sur l'écran blanc de l'ordinateur. Le pourtour de chaque cercle était noir, l'intérieur blanc. Les variations de surface s'opéraient en fonction des dimensions du diamètre : le diamètre entre deux cercles pouvait varier de 0,5 cm (distance 1), de 1 cm (distance 2), de 1,5 cm (distance 3).

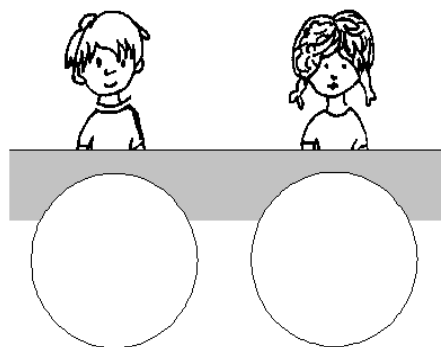


**Figure 20.** Présentation de deux cercles de surfaces différentes.

Trente-six comparaisons sont présentées dans un ordre aléatoire : 12 impliquent des cercles dont les diamètres diffèrent de 0,5 cm ; 12 des cercles dont les diamètres diffèrent de 1 cm, 12 des cercles dont les diamètres diffèrent de 1,5 cm. La moitié des comparaisons (18) sont présentées dans une configuration Petit cercle – Grand cercle, l'autre moitié dans la configuration inverse. Le diamètre de départ des cercles s'échelonne de 5 cm à 9 cm.

La consigne est la suivante : « *Maintenant, vous allez voir apparaître deux cercles sur l'écran. Montrez-moi quel est le plus grand des deux en appuyant sur l'une des deux touches noires du clavier. Appuyez le plus vite possible sans vous tromper* ».

Pour les épreuves de comparaisons suivantes, deux bustes d'enfants stylisés, un garçon et une fille, étaient présentés sur l'écran d'ordinateur. Chaque enfant mesurait 5,8 cm et se trouvait placé au-dessus d'un cercle blanc (diamètre : 7 cm) où s'inscrivait, selon le format (jetons, surfaces rectangulaires ou chiffres arabes), l'un des termes de la comparaison. Les réponses étaient effectives après appui sur l'une des deux touches de l'ordinateur (« s » ou « l ») marquées d'une gommette noire. L'ordre garçon / fille était contrebalancé.



**Figure 21.** Les deux personnages supports des comparaisons.

Les formats de présentation des épreuves suivantes correspondent à deux catégories distinctes :

- l'une, analogique discontinue, comprend deux épreuves, comparaisons de configurations de jetons et comparaisons de surfaces rectangles ;
- l'autre, symbolique, englobe deux autres épreuves, comparaisons de numéraux présentés verbalement et comparaisons de chiffres arabes.

Ces épreuves de comparaisons prennent en compte le rapport (e .g., le ratio est de 1/2 pour une comparaison 2 vs 4) et la distance (e .g., la distance est 2 pour une comparaison 2 vs 4) entre stimuli pour chacune des représentations (tableau I-1). Pour chaque paire, les items sont présentés dans un ordre aléatoire, dans l'ordre « inverse » (e.g. 1 vs 2 et 2 vs 1) et en tenant compte du contrebalancement systématique de la place du garçon et de la fille, le total est de 44 présentations (4 x 11) par épreuve.

Ainsi chaque élément du tableau est présenté aléatoirement quatre fois dans chacun des formats. Par exemple, la comparaison « 4 vs 6 » apparaît sous les formes suivantes : « 4 vs 6g », « 4 vs 6f », « 6 vs 4g et 6 vs 4f (le « g » signifie que c'est l'image du garçon qui se trouve à gauche du participant, le « f » que c'est celle de la fille). L'ordre de présentation des items a été tiré au sort d'où son caractère aléatoire, mais il est le même pour chacune des quatre épreuves de comparaisons inspirées du modèle du triple code.

Les 8 premiers items de toutes les épreuves de comparaisons sont construits à partir des paires 1 vs 4 et 1 vs 3 (soit 8 paires présentées dans l'ordre suivant : 1 vs 4g, 4 vs 1g, 1 vs 4f, 4 vs 1f, 1 vs 3g, 3 vs 1g, 1 vs 3f, 3 vs 1f). *Ces items sont considérés comme des exemples et un temps d'entraînement ; ils contribuent à une familiarisation avec la tâche. Les résultats à ces 8 premiers items ne sont donc pas pris en compte dans les analyses.* Les données prises en considération, exactitude (BR) et temps de réaction (TR), concernent donc les rapports 1/2,

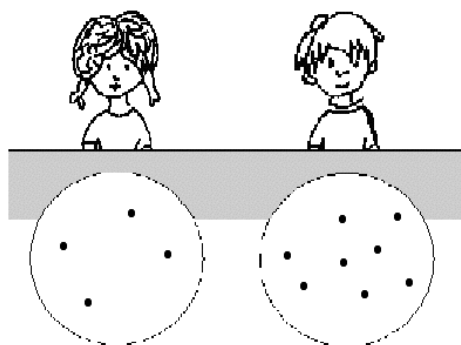
2/3, 3/4 associées aux distances 1, 2 et 3 soit 36 (4 x 9) mesures par participant pour chacune des quatre épreuves d'évaluation des représentations du triple code.

**Tableau I.1.** Comparaisons en fonction de la distance et du rapport pour chacune des quatre épreuves de comparaisons (jetons, surfaces rectangles, numéraux verbaux et chiffres arabes).

Distance \ Rapport	1/2 (0,5)	2/3 (0,66)	3/4 (0,75)
	1	1 vs 2	2 vs 3
2	2 vs 4	4 vs 6	6 vs 8
3	3 vs 6	6 vs 9	9 vs 12

#### I - 2 - 4 - Epreuve 4 : comparaisons d'ensembles de jetons

Pour cette tâche de comparaisons de quantités analogiques discontinues, des points noirs de 3 mm de diamètre étaient placés dans chacun des deux cercles situés sous les enfants et étaient censés figurer des bonbons attribués au garçon et à la fille.



**Figure 22.** Exemple d'item pour les comparaisons de jetons.

L'enfant est invité à comparer des ensembles de collections de points. Les configurations n'étant pas structurées, les points sont répartis aléatoirement dans le cercle. Il

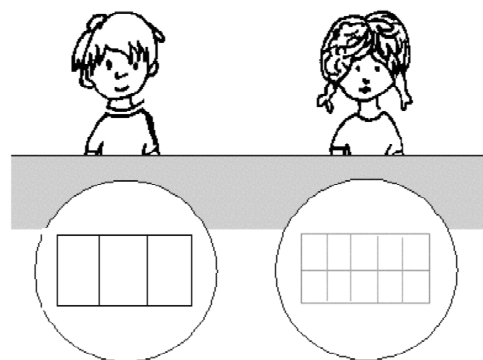
n'y a pas dans cette épreuve de contrôle de la surface : la surface occupée par les points noirs dans le cercle de présentation augmente en même temps que le nombre.

La consigne est la suivante : « *Voici les deux enfants, le garçon et la fille ; on leur donne des bonbons : voici les bonbons du garçon et voici ceux de la fille. Pouvez-vous me montrer qui en a le plus en appuyant sur l'une des 2 touches noires du clavier ? Appuyez le plus vite possible sans vous tromper.* »

Les 44 (8 + 36) items expérimentaux sont ensuite présentés.

### **I - 2 - 5 - Epreuve 5 : comparaisons de surfaces rectangles.**

Pour cette nouvelle épreuve de comparaisons de quantités analogiques discontinues, les paires étaient composées de deux rectangles de même dimension (longueur : 5 cm, largeur : 3 cm) et donc de même surface. Selon les termes de la comparaison, chaque rectangle était découpé en plusieurs subdivisions géométriques régulières par des traits verticaux et horizontaux. Les surfaces ainsi découpées figuraient des parts de gâteaux de densités différentes.



**Figure 23.** Exemple d’item pour les comparaisons avec contrôle des surfaces.

L’objectif est de proposer, avec des configurations structurées, des comparaisons pour lesquelles la surface des éléments à comparer soit contrôlée. Diverses études (Mix et al., 2002 ; Rousselle, Palmers & Noël, 2004) ont mis en évidence que, dans une tâche

d'évaluation de la numérosité, l'estimation reposerait chez les jeunes enfants sur des variables perceptives et non sur le nombre en soi. Il est donc nécessaire de contrôler, dans les items présentés, des variables telles que la surface et le contour qui sont la plupart du temps confondues (comme dans l'épreuve précédente de comparaison d'ensembles de points). Chaque comparaison comprend donc deux rectangles de même dimension découpés selon l'une des 44 modalités de la variable.

La consigne est la suivante : *"Voici les deux enfants, le garçon et la fille ; ils ont fait un gâteau d'anniversaire qu'ils vont pouvoir partager. Par exemple (montrer un item d'exemple), ici la fille a 8 parts et le garçon 3 parts. Je voudrais maintenant que vous me montriez qui a le plus de parts en appuyant sur l'une des 2 touches noires du clavier. Appuyez le plus vite possible sans vous tromper."*

Les 44 (8 + 36) items expérimentaux sont ensuite présentés.

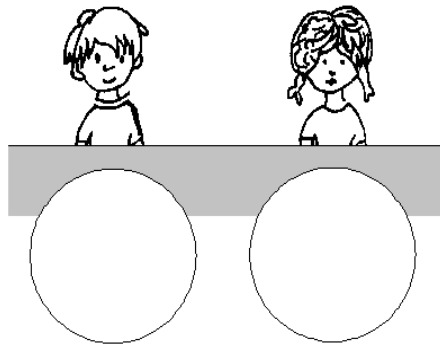
Dans les deux épreuves suivantes, les tâches de comparaisons sont présentées sous forme symbolique. Elles font explicitement appel à la connaissance des codes associés aux représentations verbale et arabe.

### **I - 2 - 6 - Epreuve 6 : comparaisons de quantités présentées sous forme de numéraux oraux.**

Pour cette épreuve évaluant la représentation verbale, la consigne (deux nombres à comparer) était énoncée oralement. Les items étaient lus par une voix féminine préenregistrée, le son étant diffusé par le système audio de l'ordinateur. L'écran présentait les deux visages enfantins placés devant un cercle vide et le participant devait associer le premier nombre énoncé avec le personnage (garçon ou fille) présenté à gauche de l'écran (touche « s ») et le second nombre énoncé avec le personnage (fille ou garçon) présenté à droite de l'écran (touche « l »).



Chaque item de comparaison se décomposait de la façon suivante : un premier temps de latence (1000 ms) avant l'énonciation du premier nombre (600 ms) puis un second temps de latence (1000 ms) avant l'énonciation du second nombre (600 ms). Le choix par appui sur l'une des deux touches noires du clavier permettait de passer à l'item suivant.



**Figure 24.** Exemple d'une des deux images utilisées pour les comparaisons présentées sous forme verbale.

Cette épreuve évalue le format verbal et la capacité des sujets à effectuer les 44 comparaisons en appliquant une consigne énoncée oralement. La présentation s'effectue donc ici de manière séquentielle contrairement aux autres épreuves dans lesquelles les participants peuvent voir de manière simultanée les items à comparer. L'écran présentait les deux visages enfantins, utilisés préalablement, placés devant un cercle vide.

L'aspect séquentiel de cette tâche génère une difficulté liée au fait que le participant va devoir systématiquement associer le premier nombre énoncé avec le personnage (garçon ou fille) présenté à droite de l'écran et le second nombre énoncé avec le personnage (fille ou garçon) présenté à gauche de l'écran. Un premier temps d'explication à l'intention du participant - surtout des enfants - est donc nécessaire avant de commencer la passation de l'épreuve proprement dite.

1. Sur une image fixe, hors programme, on procède à l'utilisation de six items supplémentaires d'exemple (8 vs 3 ; 2 vs 9 ; 3 vs 10 puis 3 vs 8 ; 9 vs 2 ; 10 vs 3). Ces items ne font pas partie du protocole et ne sont utilisés ici que pour s'assurer d'une bonne compréhension de la tâche à suivre.

D'abord, pour les items 8 vs 3 ; 2 vs 9 ; 3 vs 10, l'expérimentateur énonce la consigne : *"Si je donne n bonbons au garçon (l'expérimentateur montre le côté gauche de l'écran) et p bonbons à la fille (l'expérimentateur montre le côté gauche de l'écran), pouvez-vous me montrer qui en aura le plus ? Montrez-moi le plus vite possible sans vous tromper »*.

Ensuite, pour les trois items suivants (3 vs 8 ; 9 vs 2 ; 10 vs 3), l'expérimentateur explique qu'il ne prononcera plus la phrase (*"Si je donne n bonbons au garçon et p bonbons à la fille, pouvez-vous me montrer qui en aura le plus »*) et que le premier nombre correspondra désormais à l'image de gauche (l'expérimentateur la montre) et le second à celle de droite (l'expérimentateur la montre).

Pour ces trois derniers items d'exemple, le participant devra donc effectuer le plus rapidement et le plus exactement possible les comparaisons à partir des deux nombres présentés verbalement par l'expérimentateur.

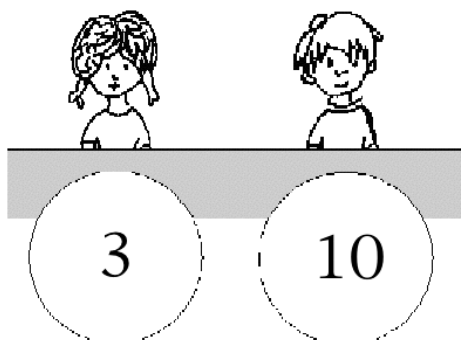
2. Pour la tâche proprement dite d'évaluation de la représentation verbale, le principe est le même : le premier nombre prononcé correspond à la quantité attribuée au personnage de gauche, le second à celle de droite. Les participants doivent écouter les 44 items expérimentaux préenregistrés sur l'ordinateur et choisir auquel des deux enfants ils attribuent le plus de bonbons en appuyant, à gauche ou à droite, sur la touche noire de l'ordinateur correspondante.

Les 44 (8 + 36) items expérimentaux sont ainsi présentés.

## I - 2 - 7 - Epreuve 7 : comparaisons de quantités présentées en chiffres arabes

### (évaluation de la représentation visuelle arabe)

L'écran présentait les deux figurines (le garçon et la fille) et, pour cette tâche, un nombre en chiffre arabe (taille : 2 cm de hauteur) était inscrit en noir au centre de chacun des deux cercles.



**Figure 25.** Exemple d'item (non utilisé durant l'épreuve) de comparaison avec chiffres arabes.

Cette épreuve évalue la façon dont les participants possèdent le code symbolique constitué par les chiffres arabes et dans quelle mesure ils l'utilisent pour se représenter des quantités. La consigne est la suivante: *"Voici toujours nos deux enfants. Si je donne cette quantité de bonbons (montrer le chiffre) au garçon et cette quantité de bonbons (montrer l'autre chiffre) à la fille, pouvez-vous me montrer qui en a le plus en appuyant sur l'une des deux touches noires du clavier ? Appuyez le plus vite possible sans vous tromper "*.

Les 44 (8 + 16) items expérimentaux sont ensuite présentés.

Nous allons maintenant aborder la présentation des expériences réalisées avec les enfants et les adultes. Dans la première expérience, nous avons « testé » notre protocole avec des adultes ayant une maîtrise du calcul. Notre objectif était (I) d'évaluer si la procédure

proposée permettait de mettre en évidence des caractéristiques liées au modèle du triple code - effet de distance ou de rapport dans les diverses tâches de comparaisons - et (II) d'obtenir une ligne de base pour les analyses ultérieures avec les enfants.

## **CHAPITRE II - EXPERIENCE 1 - Le traitement des codes analogiques et symboliques par les adultes.**

### **II - 1 - Méthode**

#### ***Participants :***

Dix adultes ont effectué les épreuves en passation individuelle. Il s'agit d'un ensemble de cinq hommes et cinq femmes avec un âge moyen de 24 ans 6 mois (20 ; 2 pour le plus jeune et 31 ; 6 pour la plus âgée). Tous ont validé au moins deux années universitaires en psychologie et ont donc été familiarisés avec la manipulation des nombres au cours de leur cursus, notamment au travers des cours et de l'utilisation des outils statistiques. Sur les dix participants, deux ont été exclus car leurs réponses étaient incohérentes et présentaient des temps de réaction très longs à des moments inattendus.

#### ***Matériel et procédure :***

Chaque participant a effectué les épreuves dans l'ordre suivant :

- Première série de mesures du temps de réaction simple (TRS) ;
- Comparaisons de réglettes ;
- Comparaisons de cercles ;
- Comparaisons d'ensembles de jetons ;
- Comparaisons de surfaces rectangles ;
- Comparaisons à partir d'un matériel verbal ;
- Comparaisons à partir de chiffres arabes ;
- Seconde série de mesures du temps de réaction simple (TRS).

La procédure était celle qui a été décrite au début de ce chapitre. La passation a eu lieu dans une salle tranquille de l'Université. Pour chaque participant adulte, la passation des épreuves s'est déroulée en une seule séance d'environ une demi-heure.

## **II - 2 - Résultats**

Pour l'ensemble des épreuves - cercles, jetons, surfaces rectangles et chiffres arabes - le taux de bonnes réponses (BR) est très haut (effet plafond) avec des pourcentages de réussites respectivement de 99, 97, 95 et 97%. En raison de cette faible variabilité au niveau de l'exactitude des réponses, les analyses portent uniquement sur les temps de réaction (TR).

Des contraintes techniques nous ont empêchés de collecter de manière fiable les données verbales, ce qui a limité à trois les tâches (deux analogiques et une symbolique) incluses dans les analyses des adultes.

Nous commencerons par décrire les résultats aux épreuves de Temps de Réaction Simples puis aux comparaisons de cercles, d'ensembles de jetons, de surfaces rectangles et de chiffres arabes. Nous étudierons ensuite les effets de distance pour l'épreuve des cercles et les effets de distance et de rapport pour chacune des autres tâches, puis nous analyserons les résultats d'une ANOVA globale à 3 (tâches : jetons, surfaces rectangles et chiffres arabes) x 3 (rapports : 1/2, 2/3 et 3/4) x 3 (distances : 1, 2 et 3) facteurs avec mesures répétées. Nous observerons enfin les corrélations entre les diverses variables.

### ***Description des résultats pour chacune des tâches***

- Temps de réaction simple: pour cette tâche visant à mesurer la vitesse de réaction à l'apparition d'un stimulus, la moyenne est de 255 ms ( $ET = 40$ ).

- Comparaisons de cercles : pour cette épreuve de comparaison de quantités continues, la moyenne est 668 ms ( $ET = 174$ ). C'est la plus rapide des épreuves des comparaisons analogiques.
- Comparaisons d'ensembles de jetons : la moyenne est de 846 ms ( $ET = 336$ ). L'introduction d'une composante numérique discrète ralentit le traitement par rapport à l'épreuve des cercles.
- Comparaisons de surfaces rectangles : la moyenne est ici de 989 ms ( $ET = 394$ ). C'est l'épreuve pour laquelle le temps de réponse est le plus long. L'écart entre les performances minimale et maximale est aussi le plus important sur l'ensemble des épreuves
- Comparaisons de chiffres arabes : la moyenne est de 640 ms ( $ET = 100$ ). Le temps de réaction moyen pour cette épreuve de comparaisons avec le code indo-arabe est plus rapide que celui de chacune des tâches analogiques.

**Tableau 1-1.** Récapitulatif des temps de réaction moyens (en ms) des adultes aux différentes épreuves.

	Moyenne ( $ET$ )	Fourchette
TRS	255 (40)	206 à 323 ms
Cercles	668 (174)	531 à 1012 ms
Jetons	846 (336)	596 à 1496 ms
Surf. Rect.	989 (394)	684 à 1843 ms
Chiffres arabes	640 (100)	533 à 826 ms

## *Analyse des résultats pour chaque épreuve de comparaison*

### Comparaisons de cercles

Une analyse de variance (ANOVA) prenant en compte les trois différences de surfaces a été conduite avec les TR de l'épreuve de comparaisons des cercles. L'effet de distance est significatif,  $F(2,14) = 26,53$ ,  $CME = 3066$ ,  $p < .001$ . Les temps de réponses diminuent avec l'augmentation de l'écart entre les cercles : ils sont de 778 ms ( $ET = 211$ ) avec une différence de 0,5 cm, de 644 ms ( $ET=176$ ) avec une différence de 1 cm et de 581 ms ( $ET = 146$ ) avec une différence de 1,5 cm. Les adultes sont donc sensibles au caractère analogique de ce type de comparaison.

**Tableau 1-2.** Temps de réaction (en ms) à l'épreuve des cercles en fonction des trois différences de distance.

<b>Cercles</b>	<b><i>M</i></b>	<b><i>ET</i></b>
<b>Distance 1 (0,5 cm)</b>	778	211
<b>Distance 2 (1 cm)</b>	644	176
<b>Distance 3 (1,5 cm)</b>	581	146

Pour les épreuves suivantes, une ANOVA à 3 (rapport : 1/2, 2/3 et 3/4) x 3 (distance : 1, 2 et 3) a été effectuée.

### Comparaisons de jetons.

On note un effet principal du rapport,  $F(2,14) = 4,97$ ,  $CME = 123052$ ,  $p = .023$ . La moyenne des temps de réaction augmente du rapport 1/2 au rapport 2/3 et du rapport 2/3 au



rapport 3/4 (respectivement 692, 834 et 1011 ms). L'effet de distance n'est pas significatif et on ne constate pas d'effet d'interaction entre rapport et distance.

#### Comparaisons de surfaces rectangles.

On note un effet principal du rapport,  $F(2,14) = 7,61$ ,  $CME = 63766$ ,  $p = .006$ . La moyenne des temps de réaction augmente au fur et à mesure que le rapport se rapproche de « 1 » (respectivement, 879, 937 et 1149 ms pour les rapports 1/2, 2/3 et 3/4). L'effet de distance est aussi significatif,  $F(2,14) = 3,99$ ,  $CME = 20694$ ,  $p = .042$ , mais il se présente dans une configuration particulière avec un temps de réaction significativement plus rapide pour la distance 2 que pour la distance 1 et pour la distance 3 (respectivement, 921, 1017 et 1028 ms),  $t(7) = -3,04$ ;  $p = .019$  et  $t(7) = -2,64$ ;  $p = .033$ . L'interaction entre rapport et distance n'est pas significative.

#### Comparaisons de chiffres arabes.

L'effet principal du rapport est significatif,  $F(2,14) = 13,55$ ,  $CME = 3397$ ,  $p = .001$ . Les temps de réaction au rapport 1/2 sont plus rapides que ceux au rapport 2/3 et au rapport 3/4 (respectivement, 590, 672 et 659 ms). Le rapport 2/3 est donc descriptivement plus lent que le rapport 3/4 sans que la différence soit significative. On note un effet principal de la distance,  $F(2,14) = 6,87$ ,  $CME = 3236$ ,  $p = .008$ . Une différence est significative : les temps de réaction avec la distance 3 sont plus rapides que ceux avec la distance 2 (respectivement, 608 et 669 ms),  $t(7) = 3,65$ ,  $p = .008$ . On note un effet d'interaction entre rapport et distance,  $F(4,28) = 4,07$ ,  $CME = 4012$ ,  $p = .01$ . Avec les chiffres arabes, les temps de réaction ne varient pas en fonction du rapport de la même façon selon la distance. Alors que pour le rapport 1/2, les temps de réaction des distances sont quasi identiques et que pour le rapport 2/3, les temps de réactions pour la distance 1 ( $M = 683$ ;  $ET = 114$ ) sont plus lents que pour la

distance 2 ( $M = 675$  ;  $ET = 99$ ) et pour la distance 3 ( $M = 655$  ;  $ET = 139$ ), il s'avère qu'avec le rapport 3/4, les temps de réaction pour la distance 1 ( $M = 660$  ;  $ET = 103$ ) sont plus rapides que pour la distance 2 ( $M = 740$  ;  $ET = 169$ ).

En résumé, avec notre population d'adultes, l'examen des temps de réaction montre un effet de rapport pour chacune des tâches. Cet effet va dans le sens attendu pour les épreuves analogiques de comparaisons des jetons et des surfaces rectangles avec une augmentation du temps de réponse lorsque le rapport se rapproche de « 1 ». Avec le code indo-arabe, l'effet de rapport est présent mais de manière moins nette qu'avec les épreuves précédentes. L'effet de distance est présent avec les comparaisons de surfaces rectangles et les chiffres arabes mais avec des résultats différents de ceux attendus puisque ce ne sont pas les comparaisons avec le plus petit écart qui sont les plus lentes. Enfin, l'interaction entre rapport et distance avec les chiffres arabes suggère que cette tâche symbolique nécessite un traitement différent de celui requis pour l'analogique.

**Tableau 1-3.** Moyenne des temps de réaction pour les participants adultes en fonction du format de comparaisons, du rapport et de la distance.

Rapports	Jetons						Surfaces Rectangles						Chiffres arabes					
	1/2		2/3		3/4		1/2		2/3		3/4		1/2		2/3		3/4	
	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>
<b>Dist. 1</b>	657	179	828	208	881	370	838	192	969	340	1244	631	587	99	684	115	660	103
<b>Dist. 2</b>	674	155	842	342	1122	670	849	316	841	265	1075	509	591	106	676	99	740	169
<b>Dist. 3</b>	747	294	831	291	1031	644	952	468	1004	437	1131	530	593	99	655	139	577	87

### *Analyse de variance avec l'ensemble des variables*

Une analyse de variance (ANOVA) à 3 (tâches : jetons, surfaces rectangles et chiffres arabes) x 3 (rapports : 1/2, 2/3 et 3/4) x 3 (distances : 1, 2 et 3) facteurs avec mesures répétées a été effectuée sur les temps de réaction.

On note un effet principal de la tâche,  $F(2,14) = 7.13$ ,  $CME = 310280$ ,  $p = .007$ . Avec une moyenne de 989 ms, les temps de réaction pour accomplir les comparaisons de surfaces rectangles sont significativement plus importants que ceux nécessaires pour comparer les ensembles de jetons et les chiffres arabes (respectivement, 846 ms et 640 ms),  $t(7) = -4.21$ ,  $p = .004$  et  $t(7) = 2.85$ ,  $p = .025$ . La différence entre jetons et chiffres arabes est tendancielle,  $t(7) = 2.09$ ;  $p < .08$ . Les participants adultes mettent donc plus de temps pour effectuer leurs comparaisons lorsque la densité est contrôlée.

**Tableau 1-4.** Moyenne des temps de réaction pour les participants adultes en fonction du type de tâches.

Tâches	<i>M</i>	<i>SD</i>
Jetons	846	336
Surf. Rect	989	395
Arabe	640	100

Comme attendu, l'ANOVA fait apparaître un effet principal du rapport,  $F(2,14) = 7.62$ ,  $CME = 114465$ ,  $p = .006$ . Plus le rapport entre les collections se rapproche de « 1 », plus le temps nécessaire pour répondre est lent. Les comparaisons avec un ratio de 1/2 sont significativement plus rapides que celles avec un rapport de 2/3 et 3/4 (respectivement 721, 814 et 940 ms),  $t(7) = -5.27$ ,  $p = .001$  et  $t(7) = -3.07$ ,  $p = .018$ . Malgré une augmentation

des TR entre les rapports 2/3 et 3/4, la différence entre ces deux n'est pas significative (seulement tendancielle,  $t(7) = -1,96, p = .09$ ).

**Tableau 1-5.** Moyenne des temps de réaction pour les participants adultes en fonction du rapport (pour l'ensemble des tâches).

Rapports	<i>M</i>	<i>ET</i>
<b>Rapport 1/2</b>	721	189
<b>Rapport 2/3</b>	814	227
<b>Rapport 3/4</b>	940	385

Nous n'obtenons pas d'effet principal de la distance. Nous pouvons néanmoins considérer que nous avons déjà un indicateur de l'effet de distance avec l'effet de rapport. Par la suite, nous verrons comment nous pouvons apprécier l'effet de distance grâce à l'effet de rapport (qui synthétise la distance entre les collections et la taille des collections à comparer).

**Tableau 1-6.** Moyenne des temps de réaction pour les participants adultes en fonction de la distance.

Distances	<i>M</i>	<i>SD</i>
<b>Distance 1</b>	816	217
<b>Distance 2</b>	823	271
<b>Distance 3</b>	836	312

L'interaction entre tâches et rapports est significative,  $F(4,28) = 3.59, CME = 37875, p = .017$ . En d'autres termes, les temps de réaction ne varient pas en fonction du rapport de la même façon selon le matériel sur lequel porte la tâche de comparaison. En effet, alors que

pour les tâches des jetons et des surfaces rectangles, les temps de réactions sont plus lents pour les rapports 3/4 ( $M = 1011$  ;  $ET = 559$  et  $M = 1149$  ;  $ET = 543$ , respectivement) que pour les rapports 2/3 ( $M = 834$  ;  $ET = 257$  et  $M = 938$  ;  $ET = 338$ ) et pour les rapports 2/3 que 1/2, il s'avère que pour la tâche de comparaison arabe, les temps de réaction pour le rapport 2/3 ( $M = 672$  ;  $ET = 107$ ) sont plus longs que pour le rapport 3/4 ( $M = 659$  ;  $ET = 108$ ).

Une interaction entre tâches et distances est observée,  $F(4,28) = 5.55$ ,  $CME = 14208$ ,  $p = .002$ . Nous observons que les distances ne sont pas traitées de façon équivalente selon la tâche. En effet, avec les jetons, les temps de réaction sont plus lents pour la distance 2 ( $M = 879$  ;  $ET = 383$ ) que pour les distances 1 ( $M = 789$  ;  $ET = 234$ ) et 3 ( $M = 869$  ;  $ET = 403$ ). En revanche, avec les surfaces rectangles, les temps de réaction pour la distance 2 ( $M = 922$  ;  $ET = 359$ ) sont plus rapides que ceux pour la distance 1 ( $M = 1017$  ;  $ET = 367$ ) et pour la distance 3 ( $M = 1028$  ;  $ET = 466$ ).

On note une dernière interaction entre rapports et distance,  $F(4,28) = 3.58$ ,  $CME = 9805$ ,  $p = .018$ . Les temps de réaction ne varient pas en fonction du rapport de la même façon selon la distance entre les éléments à comparer. On constate en effet qu'avec le rapport 2/3, les temps de réaction sont plus rapides avec la distance 2 ( $M = 599$  ;  $ET = 225$ ) qu'avec la distance 1 ( $M = 615$  ;  $ET = 199$ ) et la distance 3 ( $M = 616$  ;  $ET = 279$ ) ; en revanche, avec le rapport 3/4, les temps de réaction avec la distance 2 ( $M = 704$  ;  $ET = 417$ ) sont plus lents que ceux avec la distance 1 ( $M = 613$  ;  $ET = 345$ ) et avec la distance 3 ( $M = 627$  ;  $ET = 400$ ).

### *Analyses des corrélations*

L'examen des corrélations entre les différentes épreuves montre que la mesure du temps de réaction simple est corrélée avec celle des cercles,  $r = 0,73$  ;  $p = .038$ , et avec les surfaces,  $r = 0,75$  ;  $p = .031$ . Les jetons sont corrélés avec les surfaces,  $r = 0,98$  ;  $p < .001$ . Les

surfaces sont corrélées avec les cercles,  $r = 0,75$  ;  $p = .033$ , et avec toutes les épreuves analogiques.

De manière intéressante, on ne note pas de corrélation entre les temps de réaction pour les chiffres arabes et ceux des autres épreuves, comme si le recours à un support symbolique impliquait des processus de traitement différents de ceux requis pour l'analogique.

**Tableau 1-7.** Corrélations entre les résultats aux épreuves passées par les adultes.

	TRS	cercles	jetons	Surf. Rect.	arabes
TRS	-				
cercles	,734*	-			
jetons	0,7	,837**	-		
surfaces	,753*	,747*	,978**	-	
arabes	0,377	0,7	0,669	0,581	-

### **II - 3 - Discussion**

Dans la perspective d'observer les conditions de l'installation des codes symboliques sur le code analogique, la passation par des adultes de notre protocole devait nous permettre d'établir une base de comparaisons avec les résultats des expériences menées avec les enfants. Plusieurs observations peuvent être faites à partir de nos résultats.

D'un point de vue méthodologique, nous avons pu mettre en évidence un effet de la distance entre les collections à comparer, mais uniquement à travers l'effet de rapport. Nous n'avons pas pu clairement montrer un effet de distance « simple » (i.e., avec la seule distance numérique). Il n'est pas étonnant d'obtenir cet effet de rapport plutôt que le simple effet de la distance dans la mesure où les participants doivent traiter non seulement la distance mais aussi la taille des comparaisons que nous proposons. Pour la suite de notre travail, nous avons donc choisi d'utiliser l'effet de rapport pour opérationnaliser l'effet de distance. L'effet de rapport prend en effet en compte à la fois la taille des collections et la distance numérique et

implique que, quand le rapport entre deux numérosités se rapproche de 1, la capacité à effectuer une discrimination entre ces deux numérosités diminue (e.g., comparer deux ensembles avec un ratio de 1/4 devrait être plus facile que comparer avec un rapport de 1/2). Par la suite, dans les expériences menées avec les enfants, nous observerons donc de manière privilégiée cet effet de rapport à travers lequel nous évaluerons l'effet de distance. Dans la ligne de ce que nous avons exposé précédemment, nous considérerons que la présence d'un effet de rapport, dans les épreuves verbales ou arabes, signe l'articulation entre représentations analogique et symbolique.

Nos données avec les adultes portent exclusivement sur les temps de réaction puisqu'ils ne font quasiment pas d'erreurs et qu'ils sont précis quelle que soit la modalité, analogique ou symbolique. L'analyse des temps de réaction est un moyen de mettre en évidence les mécanismes qui supportent chacune des représentations afin de déterminer leurs différences. Nos résultats montrent un ensemble de corrélations sur la dimension analogique ; ces épreuves semblent faire appel au même type de traitement impliquant une dimension perceptive mais pas uniquement. La dimension analogique semble bien prise en charge par l'épreuve de comparaison des cercles et celle des jetons. L'épreuve de comparaison de surfaces pour laquelle la densité est contrôlée (la numérosité varie à l'intérieur de rectangles semblables) exige un temps de réponse significativement plus long que celui des comparaisons avec des jetons (et des chiffres arabes). On peut donc se demander si ce contrôle de densité ne constitue pas une gêne pour les adultes qui, pour fournir une réponse exacte, ne peuvent s'appuyer sur l'heuristique qui veut que la surface occupée covarie avec une augmentation de la quantité. L'influence des variables perceptives a été mise en évidence avec de jeunes enfants (e.g., Rousselle et al., 2004) mais il semblerait que l'on puisse en trouver une trace chez les adultes.

Avec notre échantillon d'adultes, la modalité symbolique arabe ne corrèle avec aucune autre modalité. Comme attendu, le traitement des chiffres arabes est rapide et précis. Nos résultats ont permis d'observer une augmentation régulière des temps de réaction quand le rapport se rapprochait de « 1 », ce qui constitue l'articulation prévue par le modèle du triple code avec les épreuves plus chargées d'analogique.

Notre première expérience avec les adultes nous a permis de tester notre protocole avec des participants ayant une pratique de l'arithmétique. Nous allons aborder maintenant la perspective développementale avec les études menées avec les enfants. Notre première expérience concerne des enfants de 4 ans et 5 ans.



## **CHAPITRE III - EXPERIENCES 2 et 3 : le traitement du nombre par les enfants de 4 et 5 ans**

### **III - 1 - Introduction**

Dans la partie théorique, nous avons présenté les données montrant que l'arithmétique élémentaire dépendait, chez l'homme, de deux dimensions, l'une analogique, approximative, primitive, biologiquement déterminée et universelle ; l'autre symbolique, découlant de l'acquisition des codes spécifiques à une culture et permettant un traitement précis des quantités. Pour déterminer à quelle période du développement (et comment) se produit cette mise en relation du système symbolique avec l'analogique, nous avons travaillé avec des enfants au début des apprentissages, à l'école maternelle. C'est vers cette période que les enfants commencent à articuler les représentations numériques approximatives aux mots de nombres (Lipton & Spelke, 2005).

Ce chapitre rapporte les deux expériences que nous avons réalisées : la première s'est déroulée avec des enfants de 4 ans, la seconde avec des enfants de 5 ans. Dans le cadre du modèle du triple code, notre hypothèse postule la prédominance de la représentation analogique avec laquelle entreraient en relation les codes symboliques culturels, verbal et indo-arabe.

Dans les deux cas, les participants ont effectué plusieurs tâches. Un premier ensemble était constitué d'épreuves de connaissances et était destiné à vérifier que notre échantillon présentait des caractéristiques cognitives dans la norme. Un autre ensemble était composé d'épreuves de comparaisons et testait la façon dont les enfants manipulent les quantités présentées sous format analogique ou symbolique.

Nous avons analysé les performances des participants à deux niveaux : au niveau du groupe et au niveau de chaque individu. Au niveau du groupe, pour les épreuves de

comparaisons, nous nous attendons à trouver un effet de rapport dans les épreuves analogiques : le nombre de bonnes réponses devrait diminuer quand le rapport se rapproche de « 1 ». Concernant les représentations symboliques, que nous supposons encore insuffisamment maîtrisées, l'effet de rapport n'est pas forcément attendu à 4 ans. Nous attendons néanmoins des différences entre les enfants de 4 et 5 ans : à 5 ans, cet effet de rapport pourrait apparaître aussi avec les représentations symboliques.

En étudiant dans le détail les performances de chaque enfant, nous investiguerons, à un niveau individuel, les caractéristiques de cette articulation. Nous prévoyons que les performances de chaque participant aux épreuves analogiques (cercles et jetons) seront mieux réussies que celles aux épreuves symboliques. A l'intérieur même du symbolique, nous attendons une supériorité du verbal comparativement aux chiffres arabes. Concernant les comparaisons de surfaces rectangles, le contrôle de la densité entraînant une difficulté supplémentaire, les résultats devraient être inférieurs à ceux des deux autres tâches analogiques.

L'analyse des résultats se terminera par l'examen des profils individuels. Nous définirons un critère de réussite et nous observerons les performances de chaque enfant en fonction de ce critère. L'examen portera, de manière globale, sur les réussites à chaque épreuve de comparaisons mais aussi, plus précisément, sur les distances et les rapports utilisés pour les comparaisons. Les profils individuels nous permettront aussi de mettre en perspective les connaissances des enfants avec les résultats aux épreuves de comparaisons.

Nous commencerons par décrire l'expérience menée avec les enfants de 4 ans puis nous continuerons par celle réalisée avec les 5 ans. Dans les deux cas, le déroulement des analyses suivra le plan que nous venons de définir. Nous poursuivrons notre exposé par une synthèse comparative des résultats obtenus avec les deux populations. La discussion générale mettra en perspective les performances des enfants de 4 et 5 ans.

## **III - 2 - EXPERIENCE 2 : le traitement du nombre par l'enfant de 4 ans.**

### **III - 2 - 1 - Méthode**

#### ***Participants :***

Trente et un enfants ont participé aux épreuves ; ils étaient tous âgés de 4 ans au moment de la passation : trente étaient scolarisés en moyenne section (MS) et une en grande section (GS). Il s'agissait de 18 filles et 13 garçons de milieu sociaux variés, issus de classes urbaines ou semi-urbaines d'écoles de la région de Clermont-Ferrand. Il avait été demandé aux enseignants de proposer des enfants « tout-venant ».

A partir des analyses des résultats à l'épreuve des réglettes et des Temps de Réaction Simples, les résultats de cinq enfants n'ont pas été retenus :

- Quatre ont échoué à l'épreuve contrôle de comparaisons de réglettes : ils n'ont pas appliqué la consigne de choisir la réglette la plus grande.
- A l'épreuve de Temps de Réaction Simple (TRS), un participant a réalisé une moyenne de 1829 ms, bien au-dessus de la moyenne générale ( $M = 630$  ;  $ET = 193$ ). Cette lenteur excessive a abouti à la suppression de la plupart de ses données dans les épreuves impliquant les temps de réaction. Il a donc été retiré de l'échantillon. (Rappel : le temps de réaction de base est une mesure destinée à nous permettre d'obtenir l'indice de rapidité propre à chaque participant. Les réponses en deçà de ce seuil sont supprimées car non significatives d'un traitement cognitif de la tâche).

Au final, les analyses ont porté sur 26 participants (le plus jeune : 4 ; 2 ; le plus âgé : 4 ; 11 ; âge moyen : 55 mois,  $ET = 2,50$ ) dont 14 filles et 12 garçons.

#### ***Matériel et procédure***

Pour chaque enfant, la durée totale de passation de l'ensemble du protocole se situait entre une heure et une heure et quart. La passation des épreuves s'est déroulée sur deux

séances pour éviter le risque de lassitude et de chute d'attention. Comme pour les adultes, les épreuves à support informatique ont été présentées sur ordinateur MacIntosh (iBook) et ont permis le recueil pour chaque item du temps de réaction et du nombre d'erreurs.

### ⇒ 1<sup>re</sup> séance

L'objectif, lors de la première séance, était essentiellement de fournir diverses caractéristiques cognitives de la population. Les participants devaient répondre à différentes épreuves de connaissances dans un certain nombre de domaines - notamment numériques.

- **Mesure du temps de réaction simple (1 et 2) :**

Cette épreuve se passait en deux fois sur ordinateur en début et en fin de séance.

L'objectif ici était double :

- Familiariser l'enfant avec l'ordinateur à partir d'une tâche simple ;
- Etablir une ligne de base quant à son temps de réaction.

- **Bilan de langage :**

L'une des représentations du modèle du triple code se réfère au domaine verbal. Une bonne compétence langagière pourrait être corrélée à une bonne performance dans l'épreuve de comparaisons présentées verbalement. Il était donc important d'évaluer le niveau de langage des enfants. L'épreuve choisie a été le subtest Vocabulaire de la WPPSI-III. Cette épreuve comporte 25 items. Les enfants de 4 ans sont plus particulièrement concernés par les items 6 à 25 pour lesquels ils doivent donner la définition des mots énoncés par l'expérimentateur. La cotation des réponses fournit une note standard comprise entre 1 et 19.

- **Evaluation du niveau de connaissances numériques**

Les quatre épreuves suivantes visaient à évaluer les compétences des enfants en arithmétique et la façon dont ils se servaient du nombre.

**a) Epreuve d'énonciation de la chaîne verbale**

Il s'agissait de mesurer le niveau d'acquisition de la chaîne numérique verbale et le degré de connaissance de l'ordre conventionnel des noms de nombre. L'enfant était invité à « *montrer jusqu'où il sait compter* » et l'examineur notait le dernier terme de la séquence énoncée correctement, i.e., sans aucune erreur. Quoi qu'il en soit, l'arrêt se faisait à « 20 », i.e. au-delà de la plus grande numérosité impliquée dans les tâches de comparaison (12). La consigne était la suivante : « *Montre-moi jusqu'où tu sais compter* ». Un amorçage par l'examineur pouvait intervenir – si nécessaire : « *Un, deux... et après* ». Une bonne connaissance de l'ordre conventionnel (symbolique) des nombres pourrait être un support pour les épreuves de comparaisons verbales et en chiffres arabes.

**b) Epreuve de comptage /dénombrement**

Cette épreuve visait à évaluer l'aptitude à dénombrer, à cardinaliser – i.e. à voir si le participant avait conscience que le dernier mot de son comptage représentait le cardinal de la série. On présentait à l'enfant une carte sur laquelle étaient collées des gommettes de couleur noire et on l'invitait à dire combien il y en avait. Le premier item comportait 1 gommette et constituait un item d'exemple. Les cartes suivantes affichaient 2, 4, 5, 7 puis 12 gommettes (si réussite à 7). Chaque dénombrement correct était crédité de 1 point (soit un total maximum de 5 pour cette épreuve).

La consigne était la suivante : « *Compte les points et dis-moi combien il y en a sur cette carte* ».

### c) Epreuve de constitution de collections

Cette épreuve évaluait la capacité de l'enfant à former par lui-même une collection numérique sur sollicitation de l'expérimentateur. Il ne s'agissait plus de dénombrer mais de se servir de la connaissance du nombre, de manière active, pour aboutir à une quantification précise. Un tas d'une trentaine de petits cubes en bois était déposé devant l'enfant ; celui-ci devait s'en servir pour extraire le nombre de cubes sollicité par l'examinateur. L'enfant devait constituer des collections de 2, 3, 5, 8 puis 10 cubes (si réussite à 8). Chaque collection correcte était créditée de 1 point (soit un total maximum de 5 pour cette épreuve).

La consigne était la suivante : « *Donne-moi  $n$  petits carrés s'il te plaît* ».

Les hypothèses - pour les épreuves b) et c) - étaient que la capacité à cardinaliser et la capacité à constituer des collections impliquent une maîtrise du nombre qui nécessite de pouvoir associer la connaissance du code et la manipulation d'objets discrets (c). Nous verrons si les performances à ces épreuves sont corrélées positivement aux différentes représentations analogiques et symboliques postulées dans le modèle du triple code.

### d) Epreuve de comptage en écriture arabe

Les enfants se voyaient présenter une feuille blanche sur laquelle l'expérimentateur inscrivait les chiffres 1 puis 2. Les enfants devaient poursuivre aussi loin qu'ils le pouvaient. La limite maximale (comme pour l'épreuve d'énonciation de la chaîne verbale) était fixée à 20.

La consigne était la suivante : « *J'ai commencé à écrire des chiffres ici, je voudrais que tu continues en écrivant le plus loin que tu sais* ».

Nous verrons si une bonne maîtrise des chiffres arabes, attestée par la capacité à les écrire correctement, se retrouve dans la réussite à l'épreuve de comparaisons de chiffres arabes du modèle du triple code.

#### 4) Epreuve de raisonnement abstrait (MSCA-D)

Afin de pouvoir apprécier les aptitudes des enfants à effectuer des raisonnements logiques, nous nous sommes appuyés sur le subtest « Regroupement conceptuel » tiré de la Batterie de dépistage pour enfants de McCarthy (MSCA-D). 12 jetons sont utilisés: ils varient selon des caractéristiques de taille (grand vs petit), de forme (carré vs rond), de couleur (rouge, jaune, bleu). Suivant les consignes, l'enfant doit résoudre des problèmes présentés oralement et être capable d'effectuer des classifications de complexité croissante. La note maximale est 12.

L'hypothèse est que cette épreuve (MSCAD) met en jeu des compétences spatiales. Une bonne performance pourrait être corrélée à une réussite aux aspects plus analogiques du triple code (comparaisons de jetons ou de rectangles).

#### **⇒ 2<sup>ième</sup> séance**

Les six épreuves suivantes ont été décrites précédemment dans la présentation générale de la méthode. Il s'agissait des séries de comparaison de deux éléments, l'un placé à gauche, l'autre à droite de l'écran de l'ordinateur. Le choix de l'élément de gauche correspondait à un appui sur la touche « s » du clavier, le choix de celui de droite à la touche « l ». Chacune de ces deux touches, située respectivement à main gauche et droite du participant, était repérable par une gommette noire. L'appui faisait disparaître l'item en cours et déclenchait la mise en route de l'item suivant.

Nous rappelons l'ordre de passation des épreuves :

- Comparaisons de réglettes ;
- Comparaisons de cercles ;
- Comparaisons d'ensembles de jetons ;
- Comparaisons de surfaces rectangles ;

- Comparaisons verbales (à partir de numéraux oraux) ;
- Comparaisons en chiffres arabes.

### **III - 2 - 2 - Résultats**

Nous présenterons d'abord (A) les résultats de groupe pour l'ensemble des enfants de 4 ans. Nous commencerons par les épreuves portant sur les caractéristiques de la population : nous décrirons les résultats et présenterons les corrélations entre ces épreuves. Puis, nous examinerons les analyses de variance pour chacune des épreuves liées au triple code prise séparément, avant d'examiner les résultats d'une ANOVA globale prenant en compte l'ensemble des variables, tâches et rapports (les analyses statistiques porteront sur les bonnes réponses). Nous présenterons ensuite les corrélations entre les épreuves et une analyse de régression. Nous terminerons l'exposé des résultats par (B) l'examen des profils individuels aux tâches de comparaisons inspirées du triple code.

#### **A- Résultats pour l'ensemble du groupe des enfants de 4 ans**

##### Epreuve contrôle : comparaisons de réglettes

Cette épreuve proposait de comparer deux réglettes de longueurs différentes. Elle visait à contrôler que l'enfant possédait bien les notions de « plus grand » et « plus petit ». Avec 83% de réussite en moyenne ( $ET=.05$ ), la plupart des enfants ont bien compris la consigne. Néanmoins, pour trois enfants, les résultats ne différaient pas du hasard et une participante n'avait obtenu que 21% de réussite. Quatre enfants ont donc été écartés à l'issue de cette épreuve et leurs résultats n'ont pas été pris en compte.



## *Caractéristiques de la population*

Les épreuves suivantes ont été choisies pour définir les caractéristiques cognitives, et notamment les connaissances numériques, de notre population d'enfants de 4 ans.

- Temps de réaction simple

Cette tâche visait à évaluer le temps de réaction des enfants qui devaient répondre à l'apparition d'un stimulus répétitif donné – ici une étoile. Les performances s'échelonnent de 351 ms pour le plus rapide à 1069 ms pour le plus lent ; la moyenne est de 630 ms ( $ET = 193$ ).

- Vocabulaire

L'épreuve de vocabulaire de la WPPSI est étalonnée de telle manière que la moyenne des performances d'une tranche d'âge se situe à 10. La moyenne de notre échantillon est ici de 8,65 ( $ET = 5,2$ ). Les performances vont de 3 à 19 ; la note la plus fréquemment obtenue est 9 (6 enfants).

- Chaîne verbale :

La tâche d'énonciation de la chaîne verbale prenait en compte le dernier élément de la séquence correcte et avait comme limite supérieure « 20 ». La moyenne pour cette épreuve est 18 ( $ET = 2,94$ ). La performance la plus basse est 11 (un seul participant). La plupart des enfants atteignent la limite maximale puisqu'ils sont 16 (61,5 % de l'échantillon) à arriver à 20.

- Dénombrement de points :

Durant cette épreuve, l'enfant était invité à dénombrer des séries de 2, 4, 5, 7 puis 12 points collés sur des cartes. Aucun enfant n'est en échec complet dans cette tâche ( $M = 4,19$  ;  $ET = 1,10$ ), deux (7,7 %) réussissent seulement deux items. La majorité des participants (16 soit 61,5%) arrivent à dénombrer les cinq séries de points.

- Constitution de collections :

L'enfant devait constituer des collections de 2, 3, 5, 8 ou 10 cubes. Les résultats ( $M = 3,69$  ;  $ET = 1,26$ ) sont plus disparates que pour le dénombrement précédent. La performance la plus faible concerne un enfant qui n'obtient qu'une seule bonne réponse. 6 participants (23,1%) réussissent 3 bonnes réponses, 6 autres 4. Au total, 9 enfants (34,6%) accomplissent l'épreuve sans problème.

- Comptage en écriture arabe :

La moyenne pour cette épreuve durant laquelle l'enfant était invité à effectuer un comptage écrit en utilisant le code indo-arabe est de 2,31 ( $ET = 3,03$ ), le critère d'arrêt ayant été établi à 20. Aucun n'atteint la limite supérieure. La majorité des enfants de 4 ans n'arrive pas à «démarrer» le comptage écrit (15 participants soit 57,7 % de l'échantillon). La meilleure performance est un comptage jusqu'à 10 atteint par un seul enfant.

- Epreuve de raisonnement abstrait (MSCAD):

Cette épreuve, basée sur la manipulation de blocs, proposait une évaluation des capacités d'abstraction et de catégorisation. Pour chaque enfant, la note brute était prise en compte. La moyenne est de 10 ( $ET = 2,23$ ). Les performances s'échelonnent de 5 (un participant) à 15 (un participant).

**Tableau 2 - 1.** Récapitulatif des résultats aux épreuves descriptives des caractéristiques de la population des 4 ans. (TRS = Temps de Réaction Simple). Pour le vocabulaire (WPPSI), la moyenne est 10 (/19) ; pour la chaîne verbale (chverb), l'item d'arrêt est « 20 » ; pour le dénombrement de points (points), la note maximum est 5 ; pour les collections (collect), la note maximum est 5 ; pour le comptage écrit (ecrit), l'item d'arrêt est « 20 » ; pour le raisonnement (MSCAD), la note maximale est 12.

	Moyenne (ET)	Minimum	Maximum
age	55 (2,50)	50	59
TRS	630 (193)	351	1069
vocabulaire	8,65 (5,2)	3	19
chverb	18 (2,94)	11	20
points	4,19 (1,10)	2	5
collect	3,69 (1,23)	1	5
ecrit	2,31 (3,03)	0	10
mscad	10 (2,23)	5	12

### *Corrélations entre les épreuves d'évaluation des caractéristiques cognitives*

Deux corrélations apparaissent. Une corrélation négative est présente entre les temps de réaction simple et le comptage de points (compter 2, 4, 5, 7 puis 12 gommettes),  $r = -0,39$  ;  $p = .049$ . A 4 ans, les enfants qui sont les plus rapides à la tâche de temps de réaction simple sont ceux qui ont les meilleures performances lorsqu'il s'agit de dénombrer des ensembles de points.

Une corrélation positive existe entre l'empan de la chaîne verbale et la constitution de collections,  $r = 0,41$  ;  $p < .04$ . L'existence d'un lien entre connaissance de la chaîne verbale et capacité à donner un nombre d'objets précis est attestée.

**Tableau 2 - 2.** Corrélations entre les épreuves évaluant les caractéristiques cognitives des enfants de 4 ans. (TRS = Temps de Réaction Simple ; vocab = vocabulaire ; chverb = chaîne verbale ; points = comptage de points ; collect = constitution de collections ; écrit = comptage en écriture arabe ; mscad = raisonnement abstrait).

	<b>age</b>	<b>TRS</b>	<b>vocab</b>	<b>chverb</b>	<b>points</b>	<b>collect</b>	<b>écrit</b>	<b>mscad</b>
<b>age</b>	-							
<b>TRS</b>	-0,15	-						
<b>vocab</b>	0,17	-0,18	-					
<b>chverb</b>	-0,16	0,03	0,19	-				
<b>points</b>	-0,23	-,390*	0,01	0,16	-			
<b>collect</b>	0,07	-0,29	0,07	,411*	0,37	-		
<b>écrit</b>	0,31	0,16	0,28	0,20	0,01	0,20	-	
<b>mscad</b>	0,24	-0,14	0,05	0,04	0,30	0,25	0,30	-

En résumé, du point de vue de leurs connaissances, les enfants de notre échantillon ont un niveau de vocabulaire et des capacités de raisonnement logique dans la norme de leurs pairs. Ce sont donc bien des enfants tout-venant. En arithmétique, la chaîne verbale est en voie d'acquisition, une grande majorité sait réciter la comptine jusqu'à 20. Les participants commencent à se servir du nombre pour compter et constituer des collections avec une certaine variabilité. L'épreuve la plus problématique pour les enfants de 4 ans est l'écriture de la suite des nombres puisqu'aucun ne va au-delà de 10, alors que ce nombre peut être connu et manipulé dans d'autres contextes.

### *Analyse des résultats pour chaque épreuve de comparaison*

Nous allons maintenant analyser les bonnes réponses pour les comparaisons de cercles, d'ensembles de jetons, de surfaces, de numéraux verbaux et de chiffres arabes.

● Quantités continues : comparaisons de cercles

Une ANOVA à 3 (distance « 1 (0,5 cm)», « 2(1 cm), » et « 3 (1,5 cm)») facteurs avec mesures répétées montre un effet de la distance,  $F(2,50) = 17,98$ ,  $CME = .009$ ,  $p < .001$ . Plus la distance séparant deux cercles à comparer est petite, plus le nombre d'erreurs augmente. Pour la distance « 1 » (0,5 cm), le pourcentage moyen de bonnes réponses est de 74% ( $ET = 18$ ). Les réussites s'échelonnent de 4 à 12 (aucune erreur). Pour la distance « 2 » (1 cm), le pourcentage moyen des BR, 86% ( $ET = 15$ ), est significativement meilleur que celui de la distance « 1 »,  $t(25) = -3,51$  ;  $p < .003$  ; le nombre d'erreurs est moins important. Pour la distance « 3 » (1,5 cm), le pourcentage moyen, 90% ( $ET = 13$ ), est supérieur à celui de la distance 2,  $t(25) = -2,69$  ;  $p < .02$ . Avec un écart plus important, la moitié des enfants (13) ne commettent aucune erreur.

En résumé, les résultats concernant l'épreuve d'évaluation de la surface de deux cercles sont conformes à nos hypothèses. Les enfants de 4 ans confrontés à des comparaisons de quantités continues font d'autant moins d'erreurs que la différence entre les deux items à comparer est grande. Cette observation s'accorde avec les données de la littérature portant sur le traitement de la dimension analogique.

**Tableau 2 - 3.** Pourcentage de bonnes réponses pour l'épreuve des cercles pour les enfants de 4 ans.

<b>Cercles (36 items)</b>	<b>Bonnes réponses (%)</b>
	Moyenne ( <i>ET</i> )
Cercle distance 1 (0,5 cm)	0,74 (18)
Cercle distance 2 (1 cm)	0,86 (15)
Cercle distance 3 (1,5 cm)	0,90 (13)

## *Analyses des épreuves de comparaisons de quantités numériques*

Nous allons commencer l'étude détaillée de chacune des épreuves de comparaison. Pour étudier le détail des variations au niveau des performances, nous allons examiner les résultats épreuve par épreuve. Nous aborderons d'abord les épreuves avec une dimension analogique (jetons et surfaces) avant de poursuivre par la dimension symbolique (verbal et arabe). Pour chaque tâche, les bonnes réponses ont été étudiées avec une ANOVA à 3 (rapport : 1/2, 2/3 et 3/4) facteurs avec mesures répétées.

### ● Comparaisons d'ensembles de jetons

Notre hypothèse prédit un nombre décroissant de bonnes réponses lorsque le rapport se rapproche de 1. L'ANOVA à 3 (rapport : 1/2, 2/3 et 3/4) facteurs avec mesures répétées montre un effet significatif du rapport,  $F(2,50) = 16,61$ ,  $CME = .014$ ,  $p < .002$ . L'analyse des rapports montre un pourcentage décroissant de bonnes réponses entre le rapport 1/2 ( $M = 0,85$  ;  $ET = 0,12$ ), 2/3 ( $M = 0,76$  ;  $ET = 0,16$ ) et 3/4 ( $M = 0,66$  ;  $ET = 0,19$ ). La moyenne du rapport 3/4 est significativement inférieure à celle du rapport 2/3,  $t(25) = 3,128$  ;  $p < .005$ . Les enfants ont des difficultés à traiter les items de ce ratio, un enfant ne donne que deux bonnes réponses, un seul ne commet aucune erreur.

En résumé, les enfants de 4 ans confrontés à une épreuve de comparaisons d'ensembles de jetons commettent d'autant plus d'erreurs que le ratio se rapproche de « 1 ». Comme pour l'épreuve des cercles, ce nouveau résultat est conforme aux données de la littérature sur le traitement analogique.

- Comparaisons avec contrôle des surfaces rectangles.

Comme pour l'épreuve précédente, notre hypothèse prédit un nombre décroissant de bonnes réponses lorsque le rapport se rapproche de « 1 ». Une ANOVA à 3 (rapport : 1/2, 2/3 et 3/4) facteurs avec mesures répétées montre un effet du rapport significatif,  $F(2,50) = 13,43$ ,  $CME = 0,022$ ,  $p < .002$ . Le pourcentage de bonnes réponses diminue entre le rapport 1/2 ( $M = 0,75$  ;  $ET = 0,19$ ), 2/3 ( $M = 0,71$  ;  $ET = 0,19$ ) et 3/4 ( $M = 0,55$  ;  $ET = 0,14$ ). Pour le rapport 2/3, le pourcentage moyen de bonnes réponses est inférieur à celui du rapport 1/2 mais n'est pas significativement différent. Pour le rapport 3/4, le pourcentage moyen de BR est significativement inférieur à celui du rapport 1/2,  $t(25) = 4,51$  ;  $p < .001$  et à celui du rapport 2/3,  $t(25) = 4,678$  ;  $p < .001$ .

Comme prévu par nos hypothèses, lorsque les surfaces sont contrôlées et que le ratio se rapproche de 1, il devient difficile pour les enfants de 4 ans de réussir les comparaisons.

En résumé, les résultats de cette série de comparaisons analogiques portant sur les surfaces rectangles diffèrent sensiblement de ceux constatés avec l'épreuve précédente (jetons). Avec le contrôle de la surface, les enfants de 4 ans manifestent, pour les bonnes réponses, un effet de rapport moins net que lorsqu'ils sont confrontés à des comparaisons d'ensembles de jetons. Néanmoins, ils commettent de plus en plus d'erreurs au fur et à mesure que le ratio se rapproche de 1. Cette inflexion des performances au niveau du rapport 3/4 - a priori le moins facile à discriminer - avait déjà été constatée avec les temps de réaction des adultes.

Après avoir examiné le résultat des épreuves basées sur l'analogique (jetons et surfaces rectangles), nous analysons les performances des enfants de 4 ans aux comparaisons testant la dimension symbolique (code verbal et code indo-arabe).

- Comparaisons présentées verbalement

Une ANOVA à 3 (rapport : 1/2, 2/3 et 3/4) facteurs avec mesures répétées a été effectuée. L'effet du rapport est significatif,  $F(2,50) = 4,72$ ,  $CME = 0.014$ ,  $p < .02$ . Le pourcentage de bonnes réponses est décroissant entre le rapport 1/2 ( $M = 0,79$  ;  $ET = 0,15$ ), 2/3 ( $M = 0,72$  ;  $ET = 0,20$ ) et 3/4 ( $M = 0,69$  ;  $ET = 0,18$ ). La différence de moyenne entre rapport 1/2 et rapport 2/3 est tendancielle ( $t(25) = 1,834$  ;  $p < .08$ ). La différence entre rapport 2/3 et 3/4 n'est pas significative. On note une différence significative entre rapports 1/2 et 3/4,  $t(25) = 3,28$  ;  $p < .004$ . Avec une présentation orale, la discrimination apparaît facilitée lorsque le rapport s'éloigne de « 1 ».

En résumé, pour cette première épreuve symbolique, nos participants de 4 ans - scolarisés essentiellement dans des classes de moyenne section de maternelle - montrent un effet du rapport avec des items présentés verbalement. Leurs réponses sont d'autant plus justes que le ratio s'éloigne de « 1 », i.e. que la distance entre les éléments à comparer augmente. Ce résultat apparaît comme particulièrement important car il suggère que l'articulation entre analogique et symbolique dont nous cherchons à déterminer le développement, est déjà présente, dans une certaine mesure, avec des enfants aussi jeunes.

- Comparaisons de quantités exprimées en chiffres arabes

L'effet du rapport est significatif,  $F(2,50) = 7,58$ ,  $CME = 0,018$ ,  $p < .002$ . Par contre, pour cette modalité, le profil des réponses n'est pas régulièrement décroissant entre les rapports 1/2 et 3/4. On observe que si le meilleur pourcentage de bonnes réponses est bien trouvé avec le rapport 1/2 ( $M = 0,77$  ;  $ET = 0,20$ ), il chute comme attendu avec le rapport 2/3 ( $M = 0,63$  ;  $ET = 0,21$ ) pour remonter avec le rapport 3/4 ( $M = 0,69$  ;  $ET = 0,18$ ). La différence de moyennes entre rapport 1/2 et rapport 2/3 est significative,  $t(25) = 3,675$  ;



$p < .002$ . Les enfants de 4 ans commettent donc moins d'erreurs avec le rapport 1/2 qu'avec le rapport 2/3.

Pour le rapport 2/3, le maximum de 12 réponses exactes n'est atteint que par un seul enfant - contre 6 pour le rapport 1/2. Pour ce rapport 2/3, il est possible que les enfants de 4 ans aient eu des difficultés pour la comparaison « 6 vs 9 » qui exige de lire et de discriminer entre les deux symboles. Si on compare les performances à « 6 vs 9 » avec celles des deux autres mesures de distance 3, « 3 vs 6 » et « 9 vs 12 », le score à « 6 vs 9 » est significativement plus faible que celui des deux autres comparaisons (2,12, 3,15 et 2,81, respectivement),  $t(25) = -3,71, p = .001$  et  $t(25) = -2,33, p = .028$ . La différence entre « 3 vs 6 » et « 9 vs 12 » n'est pas significative.

La moyenne des résultats pour le rapport 3/4 est légèrement supérieure à celle du rapport 2/3 mais n'est en fait pas significative. Par contre, le score du rapport 3/4 est significativement différent de celui du rapport 1/2,  $t(25) = 2,331 ; p < .03$ .

Concernant les bonnes réponses aux comparaisons de chiffres arabes, les enfants de 4 ans ne manifestent pas le même profil d'effet de rapport mis en évidence avec les cercles, les jetons, les surfaces rectangles et même le verbal. Il semble donc qu'ils ne maîtrisent pas suffisamment cette tâche symbolique, très dépendante de l'éducation, pour que l'on puisse mettre en évidence un maillage régulier avec l'analogique. Néanmoins, nos résultats font apparaître un meilleur taux de réussite avec le rapport 1/2, ce qui était attendu : la question se pose de découvrir ce qui génère la plus grande difficulté à traiter le rapport 2/3 que le rapport 3/4 lorsque les stimuli sont des chiffres arabes.

### *Analyse de variance avec l'ensemble des variables*

Nous allons maintenant étudier de manière globale les performances associées aux comparaisons postulées par le modèle du triple code. Les analyses porteront sur les tâches et les rapports. Une analyse de variance avec 4 (tâches : jetons, surfaces rectangles, verbal et arabe) x 3 (rapports : 1/2, 2/3 et 3/4) facteurs avec mesures répétées a été réalisée. Les résultats montrent un effet de la tâche, du rapport et une interaction entre les deux. Le taux de réussite varie selon la tâche,  $F(3,75) = 5,43$ ,  $CME = 0,022$ ,  $p = .002$ , avec une moyenne de  $.76$  ( $ET = .13$ ),  $.67$  ( $ET = .13$ ),  $.73$  ( $ET = .15$ ) et  $.69$  ( $ET = .16$ ), pour, respectivement, les épreuves des jetons, des surfaces rectangles, des numéraux verbaux et des chiffres arabes.

Concernant les rapports, le taux d'erreur augmente,  $F(2,50) = 35,17$ ,  $CME = 0,015$ ,  $p < .001$ , entre les rapports 1/2, 2/3 et 3/4 avec des moyennes respectives de  $.79$  ( $ET = .12$ ),  $.72$  ( $ET = .15$ ) et  $.67$  ( $ET = .13$ ). Comme nous l'attendions, avec les enfants de 4 ans, plus le rapport se rapproche de « 1 », plus la discrimination est difficile ce qui entraîne une baisse régulière des performances.

L'interaction entre tâches et rapports signe un traitement du rapport différent en fonction de la tâche,  $F(6,150) = 3,58$ ,  $CME = .018$ ,  $p = .002$ . Les performances ne varient pas en fonction du rapport de la même façon selon la tâche. En effet, alors qu'avec le rapport 1/2, les bonnes réponses aux jetons sont supérieures ( $M = .85$  ;  $ET = .12$ ) à celles des surfaces rectangles, des comparaisons verbales et des chiffres arabes (respectivement,  $M = .75$  ;  $ET = .19$ ,  $M = .79$  ;  $ET = .15$  et  $M = .77$  ;  $ET = .20$ ), il n'en est pas de même avec le rapport 3/4 avec lequel les bonnes réponses aux jetons ( $M = .66$  ;  $ET = .19$ ) sont inférieures à celles des deux tâches symboliques, comparaisons verbales et chiffres arabes (respectivement,  $M = .69$  ;  $ET = .18$  et  $M = .68$  ;  $ET = .18$ ). D'autre part, avec le rapport 2/3, les bonnes réponses avec les chiffres arabes ( $M = .63$  ;  $ET = .21$ ) sont plus faibles que celles des surfaces rectangles ( $M$

=.71 ;  $ET = .19$ ) ; ce n'est plus le cas avec le rapport 3/4 avec lequel les bonnes réponses aux chiffres arabes ( $M = .68$  ;  $ET = .18$ ) sont supérieures à celles des surfaces rectangles ( $M = .55$  ;  $ET = .14$ ). Dans une certaine mesure, le résultat de cette interaction n'est pas en contradiction avec nos hypothèses dans la mesure où nous attendons que les enfants de 4 ans ne répondent pas de manière similaire avec les représentations analogiques et symboliques. Toutefois, de manière intéressante, il montre que, lorsque les comparaisons se rapprochent de « 1 » (rapport 3/4), le recours aux représentations symboliques (verbales et arabes) permet, dès 4 ans, de meilleures performances que les représentations analogiques.

Le tableau 2-4 récapitule pour les enfants de 4 ans les résultats aux bonnes réponses en fonction des quatre tâches et des trois rapports qui organisent les comparaisons : 1/2, 2/3 et 3/4.

**Tableau 2 - 4** - Pourcentages des bonnes réponses des enfants de 4 ans en fonction des tâches et des rapports.

Tâches								
	Jetons		Surf. Rect.		Verbal		Arabe	
Rapports	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>	<i>M</i>	<i>ET</i>
1/2	0,85	0,12	0,75	0,19	0,79	0,15	0,77	0,20
2/3	0,76	0,16	0,71	0,19	0,72	0,20	0,63	0,21
3/4	0,66	0,19	0,55	0,14	0,69	0,18	0,68	0,18

### *Corrélations entre l'ensemble des épreuves*

Le tableau 2-5 récapitule l'ensemble des corrélations (caractéristiques de la population, bonnes réponses aux épreuves de comparaisons). De nombreuses corrélations sont significatives. Au niveau des épreuves analogiques, les performances aux comparaisons de surfaces rectangles sont corrélées avec celles aux comparaisons de cercles,  $r = 0,51$  ;  $p = .008$ , et avec celles aux comparaisons de jetons,  $r = 0,75$  ;  $p < .001$ . Des corrélations apparaissent aussi avec les représentations symboliques, entre les bonnes réponses verbales et les bonnes réponses aux chiffres arabes,  $r = 0,71$  ;  $p < .001$ .

On observe des corrélations entre l'ensemble des représentations analogiques et des représentations symboliques. Les bonnes réponses aux cercles sont corrélées avec les bonnes réponses verbales,  $r = 0,53$  ;  $p = .006$  et les bonnes réponses arabes,  $r = 0,54$  ;  $p = .004$ . Les bonnes réponses aux jetons sont corrélées avec les bonnes réponses verbales,  $r = 0,57$  ;  $p = .003$  et avec les bonnes réponses aux chiffres arabes,  $r = 0,61$  ;  $p = .001$ . Les bonnes réponses aux comparaisons de surfaces rectangles sont corrélées avec les bonnes réponses verbales,  $r = 0,48$  ;  $p = .014$  et avec les chiffres arabes,  $r = 0,75$  ;  $p < .001$ . De manière intéressante, cette dernière corrélation entre les performances aux comparaisons de surfaces et celles aux chiffres arabes suggère que les enfants qui réussissent le mieux à l'épreuve la plus difficile (surfaces rectangles avec contrôle de la densité) sont aussi ceux qui ont acquis une maîtrise de la représentation symbolique arabe.

On note des corrélations entre épreuves de connaissances numériques et épreuves de comparaisons de quantités. La corrélation entre la mesure de temps de réaction simple et l'épreuve de comparaisons de surfaces rectangles est négative,  $r = -0,43$  ;  $p = .03$ . Les enfants les plus rapides aux TR de base sont ceux qui réussissent le mieux la tâche de comparaisons de surfaces. La capacité à dénombrer des séries de jetons est corrélée avec l'exactitude dans la

discrimination des cercles,  $r = 0,41$  ;  $p = .04$ , et avec la précision dans les comparaisons verbales. Les enfants qui présentent des habiletés dans la constitution de collections d'objets sont ceux qui réussissent le mieux dans les bonnes réponses verbales,  $r = 0,53$  ;  $p = .01$ , et dans les bonnes réponses arabes,  $r = 0,042$  ;  $p = .03$ . La capacité à constituer des collections repose sur une bonne maîtrise des codes symboliques, verbal et indo-arabe.

En résumé, les résultats des corrélations entre l'ensemble des épreuves suggèrent un lien entre les représentations analogiques entre elles et représentations symboliques entre elles mais aussi entre représentations analogiques et symboliques. À cet égard, l'épreuve de comparaisons de surfaces rectangles occupe une place particulière puisqu'elle est corrélée avec les deux autres épreuves analogiques et les deux épreuves symboliques ; les enfants qui réussissent aux comparaisons de surfaces avec contrôle de la densité sont susceptibles de réussir dans les autres tâches de comparaisons.

**Tableau 2 - 5.** Ensemble des corrélations pour les enfants de 4 ans. La partie sans trame correspond aux caractéristiques de la population. La partie en grisé fait apparaître les épreuves de comparaison. (TRS = Temps de Réaction Simple ; vocab = vocabulaire ; chverb = chaîne verbale ; points = comptage de points ; collect = constitution de collections ; escrit = comptage en écriture arabe ; mscad = raisonnement abstrait).

	age	TRS	vocab	chverb	points	collect	ecrit	mscad	Cercles	Jetons	Surf.Rect	Verbal	Arabe
age	-												
TRS	0,15	-											
vocab	0,17	-0,18	-										
chverb	0,16	0,03	0,19	-									
points	0,23	-,390*	0,01	0,16	-								
collect	0,07	-0,29	0,07	,411*	0,37	-							
ecrit	0,31	0,16	0,28	0,20	0,01	0,20	-						
mscad	0,24	-0,14	0,05	0,04	0,30	0,25	0,30	-					
Cercles	0,28	-0,33	0,10	-0,07	,410*	0,13	0,14	0,27	-				
Jetons	0,05	-0,21	-0,37	0,08	0,37	0,36	0,11	0,07	0,34	-			
Surf.Rect	0,12	-,426*	-0,23	0,10	0,28	0,24	0,01	0,19	,506**	,754**	-		
Verbal	0,17	-0,24	0,03	0,11	,527**	,526**	0,01	0,20	,527**	,565**	,475*	-	
Arabe	0,15	-0,32	-0,11	-0,02	0,31	,419*	0,18	0,21	,539**	,607**	,754**	,707**	-

### *Analyse de régression*

Afin de déterminer dans quelle mesure les réussites aux épreuves symboliques pouvaient être prédites par les résultats aux représentations analogiques, nous avons mené deux analyses de régression, la première portant sur la dimension verbale, la seconde sur les chiffres arabes. Nous attendons que le symbolique se lie avec l'analogique à partir duquel il se développe. Concernant la représentation verbale, les performances aux comparaisons de numéraux oraux peuvent être prédites par les résultats à deux épreuves analogiques : d'une part, les comparaisons de cercles,  $B = .42$ ,  $t(25) = 2,23$  ;  $p < .04$ , et, d'autre part, de jetons,  $B = .52$  ;  $p < .043$ . A 4 ans, la précision de l'exactitude sur la dimension verbale augmente de manière significative en fonction des cercles et des jetons mais pas de la densité.

L'analyse portant sur les bonnes réponses aux chiffres arabes fait aussi apparaître un effet de la dimension analogique. De manière différente par rapport au verbal, les performances aux comparaisons de chiffres arabes augmentent avec celles associées aux comparaisons de surfaces,  $B = .56$ ,  $t(25) = 2,52$ ;  $p < .02$ . A 4 ans, la qualité de la discrimination à l'épreuve des surfaces est un bon prédicteur de la façon dont l'enfant se comportera aux comparaisons de chiffres arabes. Concernant la représentation symbolique, à 4 ans, deux processus de traitement peuvent être à l'œuvre dans les comparaisons selon que celles-ci soient présentées verbalement ou sous format indo-arabe.

Après avoir analysé les résultats au niveau du groupe des enfants de 4 ans, nous allons examiner maintenant les performances individuelles.

### **B - Analyse des profils individuels**

Notre hypothèse est que les performances aux épreuves non symboliques (A) seront mieux réussies que les performances symboliques verbales (Sv), elles-mêmes étant mieux réussies que les performances aux épreuves avec symbolique arabe (Sa), soit  $A \geq Sv \geq Sa$ . Afin de tester cette hiérarchie au niveau individuel, nous avons établi les profils de performances de chacun des 26 participants de 4 ans à partir des bonnes réponses aux 5 épreuves de comparaisons (cercles, jetons, surfaces rectangles, comparaisons verbales et chiffres arabes).

Pour établir les profils, nous avons pris en compte, dans un premier temps, les réussites à chacune des épreuves en fonction du rapport (ou de la distance pour les cercles). Chaque enfant traitait 12 items par condition, soit 36 pour les cercles (12 par distance), 36 pour les jetons (12 par rapport), 36 pour la densité, 36 pour les items verbaux et 36 pour les items indo-arabes. Nous avons considéré que 75% de réussite, soit 27 sur 36, constituent un seuil permettant de créditer l'enfant de la réussite à une épreuve. Afin d'améliorer la lisibilité,

les performances au-dessus de ce seuil sont notées 1 (tableau 2 - 6), celles inférieures à ce seuil sont notées 0.

Dans un second temps, nous avons ensuite réalisé les mêmes profils en prenant en compte, pour chaque tâche, les résultats en fonction des trois distances (0,5 cm ; 1 cm et 1,5 cm) pour les cercles et des trois rapports (1/2 ; 2/3 et 3/4) pour les jetons, surfaces rectangles, numéraux verbaux et chiffres arabes. Dans les deux cas, le seuil de réussite (noté 1) a été fixé à 9 (sur 12).

### **1. Profil des réussites aux différentes épreuves**

L'analyse des profils individuels pour les enfants de 4 ans montre que le seuil de réussite varie selon les épreuves. Avec respectivement 19 et 14 enfants qui franchissent le seuil, les comparaisons de cercles et de jetons sont celles qui sont le mieux réussies. Toutefois, 3 enfants (P5, P9 et P26) réussissent aux comparaisons de jetons et échouent avec les cercles. Les comparaisons avec contrôle de la surface entraînent le plus d'échec avec seulement 9 enfants qui réussissent (contre 13 pour le verbal et 11 pour les chiffres arabes) : tous les enfants qui ont réussi aux comparaisons de surfaces ont réussi les deux autres épreuves analogiques - alors que l'inverse n'est pas vrai. A l'intérieur même des épreuves analogiques, la configuration des items est donc traitée différemment selon que la numérosité se présente sous forme de rectangles égaux, mais de densité différente, ou sous forme de points dont le nombre covarie avec la surface occupée.

Le taux de réussite des épreuves symboliques, 50% pour le verbal et un peu moins pour les chiffres arabes, 42%, n'excède pas celui des épreuves analogiques, cercles et jetons. Deux enfants (P12 et P26) réussissent aux chiffres arabes alors qu'ils ne franchissent pas le seuil avec les comparaisons verbales. Ce constat n'est pas conforme à nos attentes qui prévoient la mise en place du verbal avant l'indo-arabe. Aucun enfant réussissant à l'une des



deux épreuves symboliques n'échoue à l'ensemble des épreuves non symboliques. Sept enfants (P3, P9, P10, P17, P18, P19 et P25) à l'inverse, réussissent dans au moins une épreuve analogique sans franchir le seuil pour les épreuves symboliques. Quatre participants (P5, P7, P20 et P26) sont au-delà du seuil uniquement dans une épreuve analogique et une épreuve symbolique. Sept enfants (27%) franchissent le seuil dans chaque épreuve contre trois (P1, P15 et P16) qui échouent sur la totalité.

Le participant P23 est en réussite sur le symbolique, verbal et chiffres arabes, ainsi que sur les cercles. Par contre, il ne franchit pas le seuil dans les épreuves où l'analogique est discontinu : ce profil nous paraît interroger la théorie et l'hypothèse  $A \geq Sv \geq Sa$ . L'examen détaillé des performances de P23 montre d'excellentes performances à l'épreuve de vocabulaire (19/19) et dans l'énonciation de la chaîne verbale (20/20) ce qui est cohérent avec la réussite aux comparaisons verbales.

En résumé, cette observation des performances prenant en compte l'ensemble des items montre qu'une majorité d'enfants présentent un profil conforme à notre hypothèse d'une hiérarchie dans laquelle prime l'analogique. Néanmoins, certains participants peuvent présenter des incohérences soit au niveau de la dimension analogique avec un échec aux cercles et une réussite aux jetons (P5, P9, P26) soit au niveau du domaine symbolique avec un échec en verbal et une réussite aux chiffres arabes (P12 et P26). Le seuil de réussite est difficile à atteindre avec l'épreuve de comparaisons des surfaces rectangles.

**Tableau 2 - 6.** Résultats aux épreuves de caractéristiques cognitives et profils des réussites aux différentes épreuves de comparaisons (sur 36 par condition) chez les enfants de 4 ans. Pour les profils aux comparaisons, la réussite est notée 1. Elle est considérée comme effective lorsque le score a atteint 27 (soit 75%) sur 36.

4 ans	Caractéristiques cognitives						Comparaisons					
	id	vocab	chverb	points	collect	ecrit	mscad	Cercles	Jetons	Surf. Rect.	Verbal	Arabe
1	9	20	2	4	4	10	0	0	0	0	0	0
2	10	20	5	5	4	12	1	1	1	1	1	1
3	9	20	5	5	10	11	1	0	0	0	0	0
4	6	20	5	5	0	8	1	1	1	1	1	1
5	11	20	4	5	4	9	0	1	0	1	1	0
6	13	20	5	5	0	9	1	0	0	1	1	0
7	7	20	5	3	0	10	1	0	0	1	1	0
8	16	20	5	5	4	11	1	1	1	1	1	1
9	1	20	3	4	0	7	0	1	0	0	0	0
10	2	18	3	3	0	10	1	1	1	0	0	0
11	6	20	5	3	0	12	1	1	1	1	1	1
12	4	20	5	4	6	11	1	1	1	0	0	1
13	9	20	3	2	0	5	0	0	0	0	0	0
14	7	14	5	3	0	6	1	1	1	1	1	1
15	5	17	5	1	0	8	0	0	0	0	0	0
16	7	14	5	2	6	12	0	0	0	0	0	0
17	10	20	5	4	0	8	1	1	0	0	0	0
18	12	18	3	3	0	11	1	0	0	0	0	0
19	8	11	2	2	0	7	1	0	0	0	0	0
20	3	20	5	5	0	10	1	0	0	1	1	0
21	7	14	5	5	0	10	1	1	0	1	1	1
22	4	12	5	4	0	12	1	1	1	1	1	1
23	19	20	3	3	8	9	1	0	0	1	1	1
24	9	20	5	5	6	11	1	1	1	1	1	1
25	14	15	3	2	4	12	1	0	0	0	0	0
26	9	15	3	4	4	12	0	1	0	0	0	1

**2. Profils individuels à chacune des épreuves en fonction des distances (0,5 cm, 1 cm et 1,5 cm) ou des rapports (1/2, 2/3 et 3/4).**

Nous avons ensuite réalisé les mêmes profils pour l'ensemble des distances et des rapports aux cinq épreuves (tableau 2-7). A 4 ans, deux enfants (P2 et P11) franchissent le

seuil de réussite dans toutes les conditions, et aucun participant n'est en échec total. Deux participants ne présentent que 4 réussites (P1 et P13).

Concernant l'épreuve des cercles, les deux comparaisons avec les distances les plus larges (1,5 et 1 cm) sont réussies par les 23 mêmes participants. Les performances chutent avec la distance la plus étroite (0,5 cm) qui n'est plus réussie que par 16 enfants. Tous les enfants qui réussissent avec une distance de 0,5 cm ont préalablement réussi les comparaisons plus « larges ». Avec les cercles, le patron de réponses est conforme aux prévisions.

Pour les comparaisons d'ensembles de jetons, le nombre de réussites décroît en fonction du rapport : 23 avec le rapport  $1/2$ , 15 avec  $2/3$  et 11 avec  $3/4$ . La plupart des participants répondent conformément à la hiérarchie attendue :  $1/2 \geq 2/3 \geq 3/4$ . Toutefois, 4 participants, P16, P17, P21 et P23 présentent des patrons de réponses différents.

Les comparaisons de surfaces rectangles sont réussies par 18 participants avec le rapport  $1/2$  puis par 15 avec le rapport  $2/3$ . Le nombre de réussites chute avec le rapport  $3/4$  puisque seuls 4 enfants franchissent le seuil de 9 bonnes réponses. 5 enfants (P3, P5, P9, P12 et P15) présentent un profil de résultats non conforme avec la hiérarchie des performances attendue en fonction du rapport.

Avec les comparaisons verbales, le rapport  $1/2$  est le mieux réussi (19 participants), devant le rapport  $2/3$  (14 participants) et le rapport  $3/4$  (10 participants). Les résultats de 22 enfants sont conformes à la hiérarchie attendue en fonction du rapport. Toutefois, 3 enfants (P5, P24, P25 et P26) n'ont pas des résultats conformes à la hiérarchie des performances attendues.

Concernant les comparaisons en chiffres arabes, le plus grand nombre de réussites (16) est relevé avec le rapport  $1/2$ . Toutefois, le rapport  $2/3$ , (9 réussites) est ici moins bien réussi que le rapport  $3/4$  (12 réussites). La configuration des résultats est ainsi différente de celles présentées précédemment. Le mouvement n'est pas décroissant en fonction des rapports.

Avec le code indo-arabe, on note aussi que les enfants de 4 ans sont moins nombreux à franchir le seuil de réussite avec les rapports  $1/2$  et  $2/3$  que dans les autres épreuves. Huit enfants (P1, P3, P8, P10, P12, P14, P15 et P25) ont un patron de réponses qui n'est pas cohérent avec la hiérarchie attendue  $1/2 \geq 2/3 \geq 3/4$ . On peut aussi observer une particularité : la comparaison de chiffres arabes est la seule épreuve dans laquelle 3 enfants (P1, P10 et P15) réussissent avec le rapport  $3/4$  après avoir échoué avec les rapports  $1/2$  et  $2/3$ .

En résumé, les profils individuels à 4 ans montrent qu'avec la dimension analogique, un plus grand nombre d'enfants réussit mieux l'épreuve des cercles que celle des jetons et celle des jetons que celle des surfaces rectangles. A l'intérieur même de chacune de ces épreuves, les réussites suivent une répartition selon la hiérarchie des rapports suivante :  $1/2 \geq 2/3 \geq 3/4$ . Ces résultats avec les comparaisons analogiques correspondent à nos prévisions.

Avec les codes symboliques, le rapport  $1/2$  des comparaisons verbales est réussi par moins d'enfants (19) que le rapport  $1/2$  des jetons (23). On observe une diminution des réussites en fonction du rapport. L'épreuve de comparaisons en chiffres arabes présente une répartition des réussites différente de celles observées avec les autres épreuves : les enfants franchissent moins le seuil de réussite avec le rapport  $2/3$  qu'avec les rapports  $1/2$  ou  $3/4$ .

**Tableau 2-7.** Récapitulatif des profils individuels pour les enfants de 4 ans aux comparaisons selon les 3 distances (1,5 ; 1,0 et 0,5 cm) ou les rapports (1/2 ; 2/3 et 3/4) pour chacune des épreuves de comparaisons. La réussite est notée 1. Elle est considérée comme effective lorsque le score atteint 9 (soit 75%) sur 12 .

4 ans id	Cercles			Jetons			Surf. Rect			Verbal			Arabe		
	1,5	1,0	0,5	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	0	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1
2	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
3	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	1
4	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	0
6	1	1	0	1	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0
7	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0
8	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1
9	0	0	0	1	1	1	0	1	1	1	0	0	1	0	0
10	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	0	0	0	1
11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1	0	0	1	0	1
13	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
14	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	0	1
15	1	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	1
16	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
17	1	1	0	1	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0
18	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
19	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
20	1	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0
21	1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
22	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0
23	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0
24	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1
25	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0
26	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	0

### III - 2- 3- Discussion de l'expérience 2

Avec cette étude, nous avons testé les trois représentations associées au modèle du triple code avec des enfants de 4 ans. Nous voulons comprendre comment et à quel moment s'opère la mise en relation des codes symboliques avec la représentation analogique. Nous avons choisi de commencer à étudier cette articulation avec une population de jeunes enfants tout-venant, n'ayant eu qu'un temps de scolarité limité et pas d'enseignement formel en

arithmétique. Notre hypothèse est que le sens du nombre se développe selon une hiérarchie dans laquelle la représentation analogique serait prédominante comparativement à la représentation symbolique.

Nos analyses ont porté sur les bonnes réponses - ce qui n'avait pu être le cas avec les adultes chez qui le taux de réussite était trop élevé pour permettre de repérer les variations. Nous avons d'abord effectué des analyses de groupe avant d'établir des profils individuels.

L'évaluation des connaissances de nos participants et l'examen des caractéristiques de notre population montrent que les enfants de 4 ans ont une connaissance de la chaîne verbale qui va bien au-delà de leur capacité à constituer des collections d'objets et même, à un niveau moindre, à dénombrer les points d'un ensemble. Ce constat va dans le sens de Sarnecka et al. (2008) qui ont noté que la capacité pour les enfants de 2 à 4 ans de réciter la comptine numérique ne signifiait pas une maîtrise de la cardinalité. La corrélation positive que nous avons observée entre l'empan de la chaîne verbale et la constitution de collections est un signe que la qualité de la connaissance de la chaîne verbale favorise la réponse à la question : « *Donne-moi n petits carrés s'il te plaît* ». Cette observation est en accord avec les travaux de Mix (1999) sur l'importance de la connaissance de la chaîne verbale. Elle a étudié la façon dont les enfants entre 2 ans  $\frac{1}{2}$  et 4 ans  $\frac{1}{2}$  procédaient au cours du développement pour reconnaître l'équivalence numérique entre deux collections. Mix a constaté que les enfants les plus habiles pour reconnaître cette équivalence étaient ceux possédant le mieux la chaîne conventionnelle des noms de nombres.

Les analyses visant à mettre en évidence l'effet de distance par le biais de l'effet de rapport montrent que les enfants de 4 ans sont sensibles à la dimension analogique des épreuves de cercles et de jetons. Au niveau des performances, nous obtenons avec les représentations analogiques la hiérarchie suivante : Cercles  $\geq$  Jetons  $\geq$  Surfaces. Comme cela avait été le cas avec les adultes, l'épreuve de comparaisons avec contrôle de la surface

occasionne des difficultés notamment avec le rapport 3/4, celui qui se rapproche le plus de « 1 » et pour lequel la discrimination entre les numérosités est significativement plus faible qu'avec les deux autres rapports. Empêcher les participants d'utiliser d'indices perceptifs complique la tâche de comparaisons des quantités. Rousselle et al. (2004) ont étudié l'influence des variables perceptives dans les tâches de comparaisons de quantités. Elles ont présenté à des enfants de 3 ans des paires de cartes avec des dessins de bâtonnets en leur demandant de choisir la carte comportant le plus de bâtonnets. La numérosité entre les cartes variait selon les rapports 1/2, 2/3 et 3/4. Rousselle et al. ont opéré des contrôles sur la densité de présentation des éléments, le contour de la présentation et la surface. Comparativement aux deux autres conditions, dans la condition de contrôle strict de la surface, les réponses des enfants de trois ans se font au hasard quels que soient le rapport et la taille des collections à comparer. Les auteurs suggèrent que les enfants de trois ans, i.e., un peu plus jeunes que ceux de notre échantillon, s'appuient sur des indices perceptifs non numériques pour effectuer les comparaisons. Dans notre étude, l'effet du rapport est présent, mais le contrôle de la surface semble être une gêne tant pour les jeunes enfants que pour les adultes.

Au niveau des représentations symboliques, la hiérarchie Verbal  $\geq$  Arabe est respectée. Par contre, nous n'attendions pas forcément, dans l'analyse des rapports, un effet avec les numéraux verbaux. En présence de stimuli présentés oralement, les enfants de 4 ans répondent avec une meilleure exactitude quand le rapport est éloigné de « 1 ». Les corrélations montrent que le traitement des comparaisons verbales est fortement corrélé avec celui des cercles et des jetons, ce qui suggère que les enfants se réfèrent à ces derniers pour traiter les premiers.

Conformément à nos prédictions, la réussite est meilleure dans l'épreuve de comparaisons verbales que dans celle avec les chiffres arabes. Les enfants de 4 ans n'ont pas une maîtrise telle du code indo-arabe que la mise en relation avec le code analogique puisse se

retrouver avec un taux de bonnes réponses décroissant quand le rapport se rapproche de « 1 ». Avec les comparaisons en chiffres arabes, nous avons souligné le cas particulier de la comparaison « 6 vs 9 » qui occasionne plus d'erreurs que les deux autres comparaisons de distance 3, « 3 vs 6 » et « 9 vs 12 ». Il se peut que les enfants soient confrontés à la quasi symétrie des deux termes de la comparaison et soient obligés de l'inhiber. A un âge où la maîtrise de l'orientation des lettres est problématique (Fischer, 2012), la différenciation de 6 et 9 n'est pas moins difficile que celle de p et b.

Notre hypothèse, basée sur l'architecture du triple code, repose sur un primat de l'analogique sur lequel viendraient « se greffer » les codes symboliques culturels. Les performances aux épreuves verbales et arabes ne pourraient donc être supérieures à celles des épreuves non symboliques dont elles découlent. Notre première investigation des profils individuels montre des incohérences avec ce postulat du triple code. En particulier, avec le rapport 3/4, le plus proche de « 1 », c'est-à-dire celui qui nécessite la discrimination la plus fine, certains participants de 4 ans franchissent le seuil de réussite dans les comparaisons uniquement avec le code symbolique indo-arabe. Ce constat amène à questionner la relation existant entre les deux représentations symboliques au cours du développement. L'analyse de régression montre que, pour les deux représentations, verbale et indo-arabe, le traitement des comparaisons ne se fait pas selon le même patron : à 4 ans, les cercles et les jetons prédisent le verbal (mais pas les surfaces) alors que les surfaces prédisent le code arabe.

En conclusion de cette partie sur les enfants de 4 ans, nous avons constaté qu'ils traitaient l'information analogique selon l'effet de rapport. Ils deviennent de moins en moins précis lorsque le rapport se rapproche de « 1 » et répondent selon la hiérarchie  $1/2 \geq 2/3 \geq 3/4$ . Ils manifestent une sensibilité à l'effet de rapport avec la représentation verbale ce qui pourrait laisser supposer un lien entre ce format et la dimension analogique (cercles et jetons).



Comme attendu, pour les enfants de 4 ans, la manipulation du code indo-arabe est moins précise que celle du code verbal. Elle aurait une relation avec l'analogique différente de celui du code verbal puisqu'elle serait liée avec l'épreuve des surfaces.

Après avoir décrit les caractéristiques des enfants de 4 ans, nous allons maintenant poursuivre nos investigations avec ceux de 5 ans.

### **III - 3 - EXPERIENCE 3 - Le traitement du nombre par l'enfant de 5 ans.**

Cette nouvelle expérience porte également sur des enfants d'âge préscolaire. Les participants sont un peu plus âgés et sont encore à l'école maternelle. Nous voulons voir comment les enfants maîtrisent, à 5 ans, les représentations symboliques et s'il existe des signes de la « greffe » attendue avec la représentation non symbolique. Notre hypothèse postule toujours la prédominance de la représentation analogique avec laquelle s'articuleraient les codes symboliques culturels, verbal et indo-arabe.

Avec les épreuves évaluant la représentation analogique, nous attendons, comme avec les enfants de 4 ans, un effet de rapport : le nombre de bonnes réponses devrait diminuer quand le rapport se rapproche de « 1 ». Nous n'avons pas de certitude sur la présence de cet effet de rapport mais il devrait apparaître aussi avec les représentations symboliques.

Nous suivrons au niveau des analyses la même progression que celle avec les enfants de 4 ans : après avoir décrit les caractéristiques cognitives de notre population, nous effectuerons une analyse des bonnes réponses au niveau du groupe avant de nous intéresser aux profils individuels.

### **III - 3- 1 - Méthode**

#### ***Participants :***

Les enfants sont âgés de 5 ans au moment de la passation. Les participants de cette étude sont principalement des enfants issus de classes de grande section de maternelle d'écoles publiques urbaines et semi-urbaines de la région de Clermont-Ferrand.

Au total, 27 enfants ont passé l'ensemble des épreuves, 4 n'ont pas répondu différemment du hasard à l'épreuve des réglettes et ont été exclus des analyses qui concerneront donc 23 participants. L'échantillon restant est constitué de 11 filles et 12 garçons d'âge moyen de 65 mois ( $ET = 3,43$ ). L'écart d'âge se situe entre 5 ;0 pour le plus jeune et 5 ;11 pour la plus âgée.

#### ***Matériel et procédure***

La passation en deux séances est semblable à celle décrite pour les enfants de 4 ans. Le seul changement réside dans l'épreuve de raisonnement abstrait. La MSCA-D avait été choisie parce qu'elle possédait un étalonnage pour les enfants de 4 ans et pour son caractère ludique. Pour les enfants de 5 ans, nous avons préféré une évaluation plus classique de type « matrices progressives ». Cette épreuve de résolution de problèmes abstraits comporte 18 items ; elle est extraite de la batterie ECS II de Khomsi (1998). Il s'agit d'une épreuve non verbale au cours de laquelle l'enfant doit choisir parmi 5 carrés celui permettant de compléter une configuration donnée. RP se déroule en deux temps : la première partie, dite d'« Entraînement », admet une aide explicite de l'examineur alors que la seconde, dite « autorégulée », voit l'enfant résoudre seul, à son rythme, les problèmes qui lui sont proposés. La note maximum est de 24.

### III- 3 - 2- Résultats

#### A- Résultats pour l'ensemble du groupe des enfants de 5 ans

##### *Caractéristiques de la population*

- Temps de réaction simple :

Les performances s'échelonnent de 332 ms pour le plus rapide à 767 ms pour le plus lent ; la moyenne est de 549 ms ( $ET = 113$ ).

- Vocabulaire :

L'épreuve de vocabulaire de la WPPSI est étalonnée de telle manière que la moyenne des performances d'une tranche d'âge se situe à 10. La moyenne de notre échantillon est ici de 8,52 ( $ET = 3,63$ ). La médiane est à 9. Les performances vont de 1 à 17 ; la note la plus fréquemment obtenue est 9 (5 enfants).

- Chaîne verbale :

La tâche d'énonciation de la chaîne verbale prenait en compte le dernier élément de la séquence correcte et avait comme limite supérieure « 20 ». La moyenne pour cette épreuve est 19,26 ( $ET = 2,56$ ). La performance la plus basse est 9 (un seul participant). Un autre s'arrête à 14. Les 21 enfants restants atteignent la limite maximale de 20 (93,3% de l'échantillon).

- Dénombrement de points :

Durant cette épreuve, l'enfant était invité à dénombrer des séries de 2, 4, 5, 7 puis 12 points collés sur des cartes. La moyenne est ici de 3,78 ( $ET = 1,65$ ). De manière étonnante, cette tâche a semblé poser problème à cinq enfants qui n'ont réussi à effectuer un comptage exact que sur une seule carte. La majorité des participants (12 soit 52,2%) arrivent néanmoins à dénombrer les cinq séries de points.

- Constitution de collections :

L'enfant devait constituer des collections de 2, 3, 5, 8 ou 10 cubes. Les résultats ( $M = 4,17$  ;  $ET = 1,11$ ) vont de 2 réussites pour 3 enfants (13%) à la réussite aux 5 items pour 13 d'entre eux (56,5%).

- Comptage en écriture arabe :

La moyenne à cette épreuve, pour laquelle l'enfant était invité à effectuer un comptage écrit en utilisant le code indo-arabe, est de 5,09 ( $ET = 3,91$ ). Comme avec les enfants de 4 ans, la limite maximum de 20 n'est atteinte par aucun enfant. 6 enfants (26,1%) ne démarrent pas le comptage écrit (contre 15 chez les 4 ans). Les résultats s'échelonnent de 4 à 13, qui n'est réussi que par un seul participant.

- Epreuve de raisonnement abstrait (ECS II):

Cette épreuve de matrices propose une évaluation du raisonnement logique. La note maximale est de 24. La moyenne de notre échantillon est 12,39 ( $ET = 3,99$ ). Les scores s'échelonnent de 4 (un participant) à 19 (un participant).

**Tableau 3 - 1.** Résultats aux épreuves descriptives des caractéristiques de la population des enfants de 5 ans.

	Moyenne (ET)	Minimum	Maximum
Age	65 (3,43)	60	71
TRS2	549 (113)	332	767
Vocabulaire	8,52 (3,63)	1	17
Chaîne verbale	19,26 (2,56)	9	20
Dénombrement de points	3,78 (1,65)	1	5
Collections	4,17 (1,11)	2	5
Comptage écrit	5,09 (3,91)	0	13
ECS II	12,39 (3,99)	4	19

***Corrélations entre les épreuves d'évaluation des caractéristiques cognitives***

Avec les enfants de 5 ans, les corrélations entre les épreuves d'évaluation des connaissances sont plus nombreuses qu'avec les 4 ans. L'épreuve de Temps de Réaction Simple est corrélée avec deux épreuves verbales : Vocabulaire,  $r = -.438$  ;  $p = .037$  et Chaîne Verbale,  $r = -.437$  ;  $p = .037$ . Les enfants les plus rapides sont ceux qui connaissent le mieux le vocabulaire et qui comptent le plus loin. La corrélation est forte entre les acquis en vocabulaire et le comptage écrit,  $r = 0,596$  ;  $p < .001$  : les enfants qui ont acquis un large lexique sont ceux qui peuvent écrire « le plus loin » la suite des nombres. La connaissance de la chaîne verbale est associée à la capacité à dénombrer des collections de points,  $r = .44$  ;  $p = .034$  et à constituer des collections d'objets,  $r = .49$  ;  $p = .017$ , et donc à pouvoir donner un nombre précis d'objets. On observe une dernière association entre raisonnement logique (RP) et comptage de points,  $r = 0,77$  ;  $p < .001$ . Les enfants qui réussissent bien à l'ECS II sont les plus susceptibles d'effectuer un dénombrement précis.

En résumé, les résultats sont beaucoup plus corrélés avec les enfants de 5 ans qu'avec les enfants de 4 ans. Ces corrélations sont présentes entre épreuves typiquement en lien avec l'arithmétique (i. e., chaîne verbale, constitution de collections et dénombrement de points) mais aussi entre épreuves liées au langage (i. e., vocabulaire) et l'arithmétique (comptage écrit).

**Tableau 3 - 2.** Corrélations entre les épreuves évaluant les caractéristiques cognitives des enfants de 5 ans. (TRS = Temps de Réaction Simple ; vocab = vocabulaire ; chverb = chaîne verbale ; points = comptage de points ; collect = constitution de collections ; escrit = comptage en écriture arabe ; ECS II = raisonnement abstrait).

	age	TRS	vocab	chverb	points	collect	ecrit	ECS II
age	-							
TRS	-0,27	-						
vocab	0,24	-,438*	-					
chverb	-0,20	-,437*	0,29	-				
points	0,02	0,01	0,30	,444*	-			
collect	-0,13	0,04	0,24	,493*	0,34	-		
ecrit	-0,06	-0,18	,596**	0,28	0,35	0,39	-	
ECS II	0,24	-0,01	0,27	0,40	,765**	0,36	0,32	-

### *Analyse des résultats pour chaque épreuve de comparaison*

Nous conserverons l'ordre de présentation que nous avons adopté avec les enfants de 4 ans. Nous allons successivement analyser les bonnes réponses pour les comparaisons de cercles, d'ensembles de jetons, de surfaces rectangles, de numéraux verbaux et de chiffres arabes.

● Quantités continues : comparaisons de cercles

Comme attendu, un effet de distance significatif se manifeste. L'ANOVA à 3 (distance « 1 (0,5 cm)», « 2(1 cm), » et « 3 (1,5 cm)») facteurs avec mesures répétées montre que plus la distance séparant deux cercles est importante, meilleures sont les performances,  $F(2,44) = 17,54$ ,  $CME = 1985285$ ,  $p < .001$ ). Pour une différence de diamètre de 0,5 cm, le taux de réussite est de 80 % ( $ET = 18$ ), ce taux augmente à 91 % ( $ET = 14$ ) pour une différence de 1 cm. Les performances sont de 96 % ( $ET = 7$ ) lorsque le diamètre des cercles à comparer diffère de 1,5 cm.  $F(6,132) = 8,35$ ,  $CME = 0,01$ ,  $p < .001$ .

La comparaison des trois rapports montre qu'une distance de 1 cm entre les cercles est significativement mieux discriminée qu'une distance de 0,5 cm, ( $t(22) = -4,18$  ;  $p < .001$ ). et qu'une de 1,5 cm est aussi significativement mieux réussie qu'une distance de 1 cm,  $t(22) = -2,26$  ;  $p < .05$ .

En résumé, comme les enfants de 4 ans, ceux de 5 ans confrontés à des comparaisons de quantités continues font d'autant moins d'erreurs que la différence entre les deux aires à comparer est grande. Avec les cercles, nous avons donc la configuration attendue :  $0,5 < 1 < 1,5$ .

**Tableau 3 - 3.** Pourcentage des bonnes réponses pour l'épreuve des cercles pour les enfants de 5 ans.

Cercles	
(36 items)	Moyenne (ET)
Cercle distance 1 (0,5 cm)	0,80 (0,18)
Cercle distance 2 (1 cm)	0,91 (0,14)
Cercle distance 3 (1,5 cm)	0,96 (0,07)

## *Analyses des épreuves de comparaisons de quantités numériques*

Comme pour les enfants de 4 ans, nous allons procéder avec les enfants de 5 ans à un examen des résultats épreuve par épreuve dans l'ordre suivant : jetons, surfaces rectangles, comparaisons verbales et comparaisons indo-arabes. Pour chaque tâche, les bonnes réponses ont été étudiées avec une ANOVA à 3 (rapport : 1/2, 2/3 et 3/4) facteurs avec mesures répétées.

### ● Comparaisons d'ensembles de jetons

L'ANOVA à 3 (rapport : 1/2, 2/3 et 3/4) facteurs avec mesures répétées met en évidence un effet significatif du rapport à l'épreuve des jetons,  $F(2,44)= 12,10$ ,  $CME = 0,012$ ,  $p < .001$ . Le rapport 1/2 est significativement mieux réussi que le rapport 2/3 ( $M= 0,92$  et  $M = 0,86$ , respectivement),  $t(22)= 2,18$  ;  $p < .05$ . La différence entre rapport 2/3 et rapport 3/4 ( $M = 0,76$ ) est significative,  $t(22)= 2,65$  ;  $p < .05$ . Avec le rapport 3/4, le score maximum de 12 n'est plus atteint que par deux participants : ce score maximum est atteint par 12 et 8 enfants pour, respectivement, les rapports 1/2 et 2/3.

En résumé, les enfants de 5 ans qui doivent comparer des ensembles de jetons sont sensibles au rapport existant entre les collections. Lorsque le rapport se rapproche de « 1 », la discrimination devient plus difficile.

### ● Comparaisons avec contrôle des surfaces

L'ANOVA à 3 (rapport : 1/2, 2/3 et 3/4) facteurs avec mesures répétées montre un effet significatif du rapport,  $F(2,44)= 51,59$ ,  $CME = 0,007$ ,  $p < .001$ . Plus les rapports se rapprochent de « 1 », plus le taux de bonnes réponses diminue. La comparaison entre le rapport 1/2 et le rapport 2/3 montre que les performances sont significativement meilleures



pour le premier ( $M = 0,88$  et  $M = 0,83$ , respectivement),  $t(22) = 2,30$  ;  $p = .031$ . La comparaison des résultats entre rapport 2/3 et 3/4 ( $M = 0,58$ ) est aussi significative,  $t(22) = 7,16$  ;  $p < .001$ . Avec le rapport 3/4, seulement 2 participants ne font aucune erreur et obtiennent un score maximal de 12 ; ils sont 7 pour le rapport 1/2 et 4 pour le rapport 2/3 à ne faire aucune erreur dans cette tâche de comparaisons de surfaces rectangles.

En résumé, avec les enfants de 5 ans, l'effet du rapport est présent avec les bonnes réponses - comme cela avait été le cas avec les enfants de 4 ans. Comme avec les enfants de 4 ans et avec les adultes, cette épreuve de comparaisons de quantités présentées dans deux rectangles de surfaces égales a influencé la performance des enfants de 5 ans. Le contrôle de la densité exige un traitement cognitif de la comparaison où il est nécessaire de tenir compte de la numérosité.

- Comparaisons présentées verbalement

Lors de l'épreuve verbale, l'ANOVA à 3 (rapport : 1/2, 2/3 et 3/4) facteurs avec mesures répétées montre que les performances des sujets diffèrent significativement en fonction du rapport,  $F(2,44) = 3,81$ ,  $CME = 0,008$ ,  $p = .03$ . Toutefois, le profil des bonnes réponses est ici différent de celui relevé dans les épreuves analogiques : le taux de réussite ne décroît pas avec la proximité de « 1 ». Le rapport 1/2 est mieux réussi que le rapport 2/3 ( $M = 0,92$  et  $M = 0,84$ , respectivement),  $t(22) = 2,93$  ;  $p = .008$ , mais il ne diffère pas significativement du rapport 3/4 ( $M = 0,89$ ). Le taux de réussite du rapport 3/4 est meilleur que celui du rapport 2/3,  $t(22) = 2,13$  ;  $p = .045$ . Avec le rapport 1/2, dix participants réussissent l'ensemble des items. Avec le rapport 2/3, seulement cinq enfants ne font aucune erreur. Avec le rapport 3/4, comme pour le rapport 1/2, dix participants répondent correctement aux 12 items.

Pour les enfants de 5 ans, le comportement à cette épreuve verbale diffère de celui des enfants de 4 ans pour lesquels les items avec le rapport 1/2 étaient les mieux réussis. Pourquoi cette chute des performances avec le rapport 2/3 ? L'examen des variables en fonction de la distance (1, 2 ou 3) ne montre pas de différence significative entre les comparaisons de distance 2 et 3. Au niveau de la distance 1 (comparaisons : « 1 vs 2 », « 2 vs 3 » et « 3 vs 4 »), la différence entre « 1 vs 2 » et « 3 vs 4 » n'est pas significative. Toutefois, le score en verbal de la comparaison « 2 vs 3 » est significativement plus faible que celui de la comparaison « 1 vs 2 » ( $M = 0,87$  et  $M = 0,96$ , respectivement),  $t(22) = 2,40$  ;  $p = .025$ . D'autre part, la comparaison « 2 vs 3 » est tendanciellement moins bien réussie que la comparaison « 3 vs 4 » ( $M = 0,93$ ),  $t(22) = -1,82$  ;  $p = .083$ .

En résumé, nous trouvons avec les enfants de 5 ans un effet du rapport dans les réponses aux comparaisons verbales. Néanmoins, cet effet diffère de celui que nous avons observé avec la représentation analogique. Avec la représentation verbale, les performances ne suivent pas une courbe décroissante lorsque le rapport entre les quantités à comparer se rapproche de « 1 ».

#### ● Comparaisons de quantités exprimées en chiffres arabes

Concernant les performances à la seconde épreuve symbolique, l'ANOVA à 3 (rapport : 1/2, 2/3 et 3/4) facteurs avec mesures répétées montre un effet significatif du rapport,  $F(2,44) = 4,90$ ,  $CME = 0,014$ ,  $p = .012$ . Le rapport 1/2 ( $M = 0,90$ ) est significativement mieux réussi que les rapports 2/3 et 3/4 ( $M = 0,79$  et  $M = 0,83$ , respectivement),  $t(22) = 2,71$  ;  $p = .013$ , et  $t(22) = 2,93$  ;  $p = .008$ . La différence entre rapports 2/3 et 3/4 n'est pas significative. Ce profil de performance diffère de celui observé avec l'épreuve orale.

Pour le rapport 1/2, la note maximale de 12 est atteinte par 8 participants. Pour le rapport 2/3, un seul participant réussit les 12 items mais on note un pic de réussite à 11 bonnes réponses pour 9 participants. Pour le rapport 3/4, 5 participants répondent correctement aux 12 items.

En résumé, le profil des bonnes réponses aux chiffres arabes est différent de celui relevé aux épreuves analogiques. L'effet du rapport ne se manifeste pas par une diminution régulière des bonnes réponses lorsque le rapport se rapproche de « 1 ». Les résultats des comparaisons indo-arabes se distinguent aussi de ceux de l'autre tâche symbolique : dans l'épreuve avec les chiffres arabes, le rapport 1/2 est, comme attendu, celui qui amène des réponses plus précises que les deux autres rapports. Avec le verbal, le rapport 1/2 n'est pas significativement différent du rapport 3/4. Les enfants de 5 ans ne se comportent donc pas de la même façon dans les deux tâches symboliques.

### *Analyse de variance avec l'ensemble des variables*

Nous avons réalisé une analyse de variance, portant sur les bonnes réponses, avec un plan à 4 (tâches : jetons, surfaces, verbal et arabe) x 3 (rapports : 1/2, 2/3 et 3/4) facteurs avec mesures répétées. Les résultats montrent un effet de la tâche,  $F(3,66) = 8,76$ ,  $CME = 0,015$ ,  $p < .001$ , un effet du rapport,  $F(2,44) = 33,37$ ,  $CME = 0,011$ ,  $p < .001$ , et une interaction entre tâche et rapport,  $F(6,132) = 8,35$ ,  $CME = 0,01$ ,  $p < .001$ .

Dans le cadre de notre hypothèse, qui stipule que l'analogique « dépasse » toujours le symbolique, les résultats de cette ANOVA sont intéressants dans la mesure où l'épreuve la mieux réussie est la tâche symbolique verbale avec un pourcentage moyen de bonnes réponses de 89% ( $ET = 9$ ). Cette tâche verbale est tendanciellement mieux réussie que les

comparaisons d'ensemble de jetons, ( $M = 0,84$ ),  $t(22) = -1,98$ ;  $p = .06$ . Elle est significativement mieux réussie que les comparaisons de surfaces, et que les comparaisons en chiffres arabes (respectivement,  $M = 0,78$  et  $M = 0,84$ ),  $t(22) = 5,09$ ;  $p < .001$  et  $t(22) = 3,11$ ;  $p = .005$ . Les comparaisons de jetons sont significativement mieux réussies que les surfaces,  $t(22) = 3,18$ ;  $p = .004$ . Les performances aux chiffres arabes sont significativement supérieures à celles des comparaisons de surfaces,  $t(22) = -2,56$ ;  $p = .018$ . Les résultats de cette analyse sont en contradiction avec l'idée d'une limite fixée par la représentation analogique à la représentation symbolique puisque la hiérarchie des performances est la suivante : épreuve verbale > jetons > chiffres arabes > surfaces rectangles. L'épreuve de comparaison des surfaces reste celle pour laquelle le taux de bonnes réponses est le plus faible.

L'effet du rapport se manifeste par une chute régulière des performances lorsque le rapport se rapproche de « 1 ». Les bonnes réponses pour le rapport 1/2 sont significativement supérieures à celles du rapport 2/3 et 3/4 (respectivement,  $M = 0,90$ ,  $M = 0,83$  et  $M = 0,78$ ),  $t(22) = 5,09$ ;  $p < .001$ , et  $t(22) = 7,81$ ;  $p < .001$ . La différence entre les rapports 2/3 et 3/4 est aussi significative,  $t(22) = 3,25$ ;  $p = .004$ .

Toutefois, l'interaction de cet effet de rapport avec les épreuves conduit à moduler ces tendances. Avec les deux épreuves analogiques de comparaisons de jetons et de surfaces rectangles, la même configuration est présente : avec les jetons, le rapport 1/2 ( $M = 0,92$ ;  $ET = .09$ ) est mieux réussi que les rapports 2/3 ( $M = 0,86$ ;  $ET = .14$ ) et 3/4 ( $M = 0,76$ ;  $ET = .16$ ), de même, avec les comparaisons de surfaces rectangles, les réponses sont meilleures avec le rapport 1/2 ( $M = 0,88$ ;  $ET = .11$ ) qu'avec les rapports 2/3 ( $M = 0,83$ ;  $ET = .13$ ) et 3/4 ( $M = 0,64$ ;  $ET = .17$ ). Cette hiérarchie (1/2 > 2/3 > 3/4) est différente avec les deux tâches symboliques. Avec les comparaisons verbales, les meilleures performances sont, comme attendu, avec le rapport 1/2 ( $M = 0,92$ ;  $ET = .10$ ), mais les scores avec le rapport 3/4 ( $M$

= 0,89 ;  $ET = .13$ ) sont supérieurs à ceux du rapport 2/3 ( $M = 0,84$  ;  $ET = .13$ ). C'est aussi le cas avec les comparaisons de chiffres arabes : le rapport 1/2 ( $M = 0,90$  ;  $ET = .11$ ) est le mieux réussi, par contre, les performances pour le rapport 3/4 ( $M = 0,83$  ;  $ET = .13$ ) sont meilleures que celles avec le rapport 2/3 ( $M = 0,79$  ;  $ET = .20$ ). Pour les épreuves symboliques, la hiérarchie est :  $1/2 > 3/4 > 2/3$ .

En résumé, cette interaction montre que les bonnes réponses diffèrent au niveau du rapport en fonction des épreuves analogiques versus symboliques. Dans les deux tâches analogiques, la hiérarchie des bonnes réponses est conforme aux attentes avec une baisse des performances lorsque le rapport se rapproche de « 1 ». Tel n'est pas le cas avec les tâches symboliques. Avec notre population d'enfants de 5 ans, le traitement de la dimension symbolique n'est pas « calqué » sur celui de la dimension analogique.

**Tableau 3 - 4.** Moyenne des bonnes réponses des enfants de 5 ans en fonction des tâches et des rapports.

	Tâches							
	Jetons		Surfaces		Verbal		Arabe	
Rapports	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>	<i>M</i>	<i>SD</i>
1/2	0,92	0,09	0,88	0,11	0,92	0,10	0,90	0,11
2/3	0,86	0,14	0,83	0,13	0,84	0,13	0,79	0,21
3/4	0,76	0,16	0,64	0,17	0,89	0,13	0,83	0,13

### *Corrélations entre l'ensemble des épreuves*

Le tableau 3-5 présente l'ensemble des corrélations avec les épreuves d'évaluation des caractéristiques cognitives et les tâches de comparaisons de quantités. Concernant la

représentation analogique, les trois épreuves sont corrélées : cercles et jetons,  $r = .42$  ;  $p = .045$ , cercles et surfaces rectangles,  $r = .46$  ;  $p = .026$ , jetons et surfaces rectangles,  $r = .65$  ;  $p = .001$ .

La corrélation entre épreuves symboliques - comparaisons verbales et indo-arabes - est forte,  $r = 0,79$  ;  $p < .001$ . Cette corrélation a été trouvée avec les enfants de 4 ans : les enfants performants sur un code sont aussi les plus performants sur l'autre.

Aux tâches de comparaisons, on note des corrélations entre performances aux épreuves analogiques et résultats aux dimensions symboliques : entre cercles et comparaisons verbales,  $r = 0,51$  ;  $p = .01$ , entre jetons et comparaisons verbales,  $r = 0,43$  ;  $p = .04$ , entre jetons et comparaisons en chiffres arabes,  $r = .49$  ;  $p = .02$ , entre surfaces rectangles et comparaisons verbales,  $r = 0,61$  ;  $p < .001$ , et entre surfaces rectangles et chiffres arabes,  $r = 0,60$  ;  $p < .001$ . Ces corrélations entre surfaces rectangles et épreuves symboliques sont fortes : un mécanisme cognitif associé à la réussite des comparaisons avec contrôle de la densité est aussi présent pour la réussite des comparaisons verbales et indo-arabes.

On relève plusieurs corrélations entre les épreuves de connaissances et tâches de comparaisons de quantités. Ainsi les participants qui possèdent une bonne connaissance du vocabulaire sont ceux qui réussissent le mieux aux comparaisons verbales,  $r = 0,47$  ;  $p = .03$ . Ce résultat peut être interprété comme le fait que les comparaisons verbales sont sous-tendues par une habileté linguistique générale. A 5 ans (mais pas à 4), l'empan de récitation de la chaîne verbale est en lien avec la qualité des comparaisons des chiffres arabes,  $r = .64$  ;  $p < .002$ . Plus les enfants de 5 ans comptent loin, plus ils sont susceptibles d'effectuer avec précision les comparaisons en chiffres arabes. Nous pouvons noter que l'épreuve de raisonnement extraite de l'ECS II n'est corrélée avec aucune des activités de comparaisons.

En résumé, ces corrélations montrent l'existence de relations entre les différentes épreuves de comparaisons, analogiques entre elles, symboliques entre elles et entre analogiques et symboliques. Comme nous l'avions noté avec les enfants de 4 ans, la tâche de comparaisons de surfaces rectangles tient une place particulière car elle est très fortement corrélée avec les deux épreuves symboliques - donc aux épreuves qui nécessitent la connaissance des codes verbal et arabe pour effectuer les comparaisons. On peut aussi observer les corrélations des épreuves d'évaluation des connaissances : la relation entre Vocabulaire et comparaisons verbales montre que les enfants qui réussissent aux comparaisons de numéraux oraux sont ceux qui donnent du sens aux mots ; la relation entre Chaîne verbale et chiffres arabes montre l'importance de la maîtrise de l'ordre stable de la comptine pour les performances avec le code indo-arabe.

**Tableau 3-5.** Récapitulatif de l'ensemble des corrélations pour les enfants de 5 ans. La partie sans trame correspond aux caractéristiques de la population. La partie en grisé fait apparaître les épreuves de comparaisons (TRS = Temps de Réaction Simple ; vocab = vocabulaire ; chverb = chaîne verbale ; points = comptage de points ; collect = constitution de collections ; escrit = comptage en écriture arabe ; ECS II = raisonnement abstrait).

	age	TRS	vocab	chverb	points	collect	ecrit	ECS II	Cercles	Jetons	Surf. Rect.	Verbal	Arabe
age	-												
TRS	-0,27	-											
vocab	0,24	-,438*	-										
chverb	-0,2	-,437*	0,29	-									
points	0,02	0,01	0,3	,444*	-								
collect	-0,13	0,04	0,24	,493*	0,34	-							
ecrit	-0,06	-0,18	,596**	0,28	0,35	0,39	-						
ECS II	0,24	-0,01	0,27	0,4	,765**	0,36	0,32	-					
Cercles	-0,03	0,07	0,21	-0,03	-0,06	0,11	0,25	0	-				
Jetons	0,07	-0,22	0,03	0,12	-0,08	-0,32	-0,04	-0,02	,422*	-			
Surf. Rect.	0,14	0,03	0,03	0,21	0,15	-0,13	-0,08	0,29	,462*	,648**	-		
Verbal	0,02	-0,27	,466*	0,31	0,18	0,08	0,21	0,14	,514*	,426*	,606**	-	
Arabe	-0,09	-0,34	0,3	,638**	0,24	0,14	0,27	0,29	0,27	,486*	,595**	,791**	-

### *Analyse de régression*

Nous avons voulu savoir dans quelle mesure la représentation verbale pouvait être prédite par les performances aux épreuves analogiques. L'analyse de régression ne montre pas, avec les enfants de 5 ans, de contribution des performances aux épreuves de comparaisons des cercles, des jetons et des surfaces. Qu'en est-il de la composante analogique avec les comparaisons de chiffres arabes ? A 5 ans, on observe une contribution tendancielle des performances aux comparaisons de surfaces,  $B = .50$ ,  $t(22) = 2$  ;  $p = .60$ . Les deux autres dimensions, cercles et jetons, ne sont pas significatives. Ces deux résultats tendent à montrer que les représentations symboliques se détachent des caractéristiques propres à la représentation analogique pour traiter les quantités.

### **B - Analyse des profils individuels.**

Comme nous l'avons fait avec les participants de 4 ans, nous allons étudier les profils individuels des enfants de 5 ans. Nous voulons examiner si notre hypothèse basée sur le modèle du triple code ( $A \geq Sv \geq Sa$ ) se vérifie lorsque l'on observe au plus près les performances de chacun des 23 enfants. Nous analyserons d'abord les réussites à chacune des épreuves en fonction du rapport (ou de la distance pour les cercles), puis les mêmes profils pour les distances ou les rapports aux cinq épreuves.

#### **1. Profil des réussites aux différentes épreuves**

Rappel : chaque enfant traitait 12 items par condition, soit 36 pour les cercles (12 x 3 distances), 36 pour les jetons (12 x 3 rapports), 36 pour la densité, 36 pour les items verbaux et 36 pour les items indo-arabes. Le seuil de réussite, fixé à 75%, soit 27 bonnes réponses sur 36 (tableau 3-6) est noté 1.

A 5 ans, ils sont 13 sur 23 (57%) à atteindre ou dépasser 27 bonnes réponses et aucun n'échoue à l'ensemble des épreuves de comparaisons. L'épreuve des cercles est celle qui est



réussie par le plus de participants : 22 (96 %). Avec la représentation analogique, nous attendons une réussite aux cercles avant les jetons : un enfant (P9) vient contredire cette attente, il échoue aux cercles et réussit cependant les comparaisons de jetons. Si, comme prévu, l'épreuve des cercles est celle pour laquelle les participants atteignent le plus souvent le seuil de réussite, l'épreuve qui vient ensuite est celle des comparaisons verbales. Avec 21 réussites (91%), elle est légèrement supérieure à celle des chiffres arabes (20 réussites - soit 87 %) et à celle des jetons (19 réussites - soit 83%).

Ce résultat descriptif est en contradiction avec notre hypothèse d'une hiérarchie dominée par l'analogique. Dès 5 ans, la progression dans l'utilisation du code verbal peut permettre une meilleure précision dans la comparaison de quantités que le code analogique.

Comme cela a déjà été constaté, c'est la tâche de comparaisons des surfaces rectangles qui engendre le taux d'erreurs le plus important : seuls, 15 participants (65 %) franchissent le seuil de réussite. Tous les participants qui réussissent à l'épreuve de comparaisons de surfaces rectangles réussissent aux deux comparaisons symboliques (verbal et indo-arabe) ; par contre, deux participants (P19 et P17) réussissent aux comparaisons de surfaces mais échouent aux comparaisons de jetons.

Trois participants P3, P17 et P19 franchissent le seuil de réussite aux deux épreuves symboliques et échouent à celles des jetons. Le participant P3 ne réussit que l'épreuve des cercles et échoue aux jetons et aux surfaces pour l'analogique alors qu'il réussit bien aux épreuves symboliques. Les caractéristiques cognitives de P3, P17 et P19 donnent des indications sur leurs acquisitions dans le domaine numérique. Leurs performances montrent qu'ils récitent la chaîne numérique jusqu'à 20 et qu'ils obtiennent de bons résultats à Comptage de points et à Constitution de collections. Ils connaissent donc les symboles numériques dont ils savent se servir - comme le prouve aussi leur réussite aux comparaisons de chiffres arabes. Ce savoir peut donc leur permettre de réussir aux épreuves symboliques.

En résumé, pour les enfants de 5 ans, l'examen par épreuve des profils individuels montre une progression dans tous les formats, mais s'avère particulièrement forte sur le symbolique (entre 4 et 5 ans, la réussite aux chiffres arabes passe de 42 à 87%). Néanmoins, aucun enfant de 5 ans ne présente un échec total sur l'analogique avec une réussite au symbolique alors que l'inverse est vrai (P10 ne réussit que les comparaisons de cercles). Dans cette configuration, apparaissent des profils paradoxaux (P3, P17 et P19) qui questionnent notre hypothèse  $A \geq Sv \geq Sa$ .

**Tableau 3-6.** Caractéristiques cognitives et profils des réussites aux différentes épreuves de comparaisons (sur 36 par condition) chez les enfants de 5 ans. Pour les profils aux comparaisons, la réussite est notée 1. Elle est considérée comme effective lorsque le score a atteint 27 (soit 75%) sur 36.

5 ans	Caractéristiques cognitives						Comparaisons				
	id	vocab	chverb	points	collect	ecrit	ECS II	Cercles	Jetons	Surf. Rect.	Verbal
1	5	9	1	2	0	6	1	1	0	1	0
2	17	20	5	5	13	15	1	1	0	1	1
3	5	20	5	5	4	13	1	0	0	1	1
4	9	20	5	5	10	19	1	1	1	1	1
5	6	20	1	5	0	10	1	1	1	1	1
6	9	20	1	5	8	5	1	1	1	1	1
7	10	20	5	5	8	15	1	1	1	1	1
8	11	20	5	4	6	17	1	1	1	1	1
9	7	20	4	4	0	12	0	1	0	0	1
10	3	20	4	5	6	10	1	0	0	0	0
11	9	20	5	2	6	12	1	1	1	1	1
12	10	20	1	4	6	12	1	1	1	1	1
13	5	14	2	3	4	9	1	1	0	1	0
14	9	20	5	5	10	12	1	1	1	1	1
15	13	20	4	5	11	10	1	1	0	1	1
16	12	20	5	5	0	10	1	1	1	1	1
17	11	20	4	5	4	15	1	0	1	1	1
18	6	20	1	2	0	4	1	1	1	1	1
19	13	20	5	4	5	17	1	0	1	1	1
20	6	20	4	3	4	14	1	1	1	1	1
21	10	20	5	5	8	16	1	1	0	1	1
22	9	20	5	3	4	15	1	1	1	1	1
23	1	20	5	5	0	17	1	1	1	1	1

## **2. Profils individuels à chacune des épreuves en fonction des distances (0,5 cm, 1 cm et 1,5 cm) ou des rapports (1/2, 2/3 et 3/4).**

A 5 ans, 6 participants (26%) - P4, P7, P11, P16, P20 et P23 - franchissent le seuil de réussite dans tous les cas. A l'opposé, un participant (P10) ne présente que 3 réussites au total. A l'exception de P9, les deux distances les plus larges à l'épreuve des cercles sont réussies par l'ensemble des 22 autres participants ; ils ne sont plus que 17 à discriminer correctement lorsque la différence entre les aires se réduit à 0,5 cm. Cette chute traduit la sensibilité à l'effet de distance. Tous les enfants ont des résultats conformes aux attentes avec une hiérarchie des performances organisée selon le patron : « 1,5 »  $\geq$  « 1,0 »  $\geq$  « 0,5 ».

Concernant l'épreuve de comparaisons de jetons, les 23 enfants ont franchi le seuil de réussite avec le rapport 1/2 ; ils sont 19 dans ce cas avec 2/3 et plus que 15 avec 3/4. La décroissance régulière du nombre de réussites indique la sensibilité au rapport et la difficulté à discriminer lorsque le rapport se rapproche de « 1 ». Deux enfants (P6 et P21) présentent des performances incohérentes avec les attentes en réussissant les rapports 1/2 et 3/4 et échouant au rapport 2/3.

Pour les comparaisons de surfaces rectangles, les deux rapports 1/2 et 2/3 sont réussis par, respectivement, 21 (91 %) et 19 (83 %) des participants. Ils ne sont plus que 7 (30 %) à réussir cette épreuve avec le rapport 3/4. Cette chute brutale des performances interroge sur les mécanismes cognitifs impliqués dans le traitement des comparaisons lorsque la densité est contrôlée. Avec les surfaces rectangles, un seul enfant, P13, présente un profil de performances non conforme aux attentes : il échoue aux rapports 1/2 et 3/4 et réussit à 2/3.

Avec l'épreuve de comparaisons verbales, un seul enfant (P9) ne franchit pas le seuil avec le rapport 1/2. Ils sont trois (P1, P9 et P10) à échouer avec le rapport 2/3, et quatre (P1, P8, P9 et P10) avec 3/4. L'ensemble des profils est cohérent avec la hiérarchie : « 1/2 »  $\geq$  « 2/3 »  $\geq$  « 3/4 ».

Concernant les comparaisons en chiffres arabes, le rapport  $1/2$  est réussi par 21 (91 %) des participants. Deux enfants (P9 et P10) échouent. Les deux rapports,  $2/3$  et  $3/4$ , sont réussis par 19 participants (83 %). Le patron attendu de profil («  $1/2$  »  $\geq$  «  $2/3$  »  $\geq$  «  $3/4$  ») n'est pas présent pour deux participants, P9 et P13. P9 échoue aux comparaisons verbales avec les rapports  $2/3$  et  $3/4$  et réussit aux comparaisons indo-arabes avec les mêmes rapports.

En résumé, l'examen des profils individuels montre que les participants de 5 ans peuvent utiliser les représentations symboliques pour effectuer des comparaisons précises : lorsque le rapport entre les quantités à comparer exige une discrimination fine ( $3/4$ ), les enfants sont plus susceptibles de fournir une bonne réponse avec les représentations verbales et indo-arabes qu'avec les représentations analogiques.

**Tableau 3-7.** Récapitulatif des profils individuels pour les enfants de 5 ans aux comparaisons selon les 3 distances (1,5 ; 1,0 et 0,5 cm) ou les rapports (1/2 ; 2/3 et 3/4) pour chacune des épreuves de comparaisons. La réussite est notée 1. Elle est considérée comme effective lorsque le score atteint 9 (soit 75%) sur 12 .

5 ans id	Cercles			Jetons			Surf. Rect			Verbal			Arabe		
	1,5	1,0	0,5	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	0	1	0	0	1	0	0
2	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1
3	1	1	0	1	1	0	1	1	0	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	0	1	1	1	1	1	0
6	1	1	1	1	0	1	1	1	0	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	0	1	1	0	1	0	0
9	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1
10	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
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	0	1	1	1	1	1	1
13	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1
14	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
15	1	1	1	1	1	0	1	0	0	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	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1
18	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
19	1	1	0	1	0	0	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	0	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
22	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
23	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

### **III - 3 -3. Discussion de l'expérience 3**

Dans la perspective de comprendre comment le sens du nombre se construit chez l'enfant, nous avons envisagé le modèle du triple code dans une perspective développementale. Nous voulons comprendre comment s'opère la mise en relation des représentations symboliques, culturelles, et de la représentation analogique, non symbolique, universelle et porteuse de la sémantique du nombre. La mise en relation des codes

symboliques avec la représentation analogique va se manifester par un effet de distance que nous avons choisi d'opérationnaliser par un effet de rapport.

Si, dès 5 ans, l'articulation entre représentations analogique et symbolique est réalisée, nous attendons de trouver un effet de rapport dans l'évaluation à la fois de la représentation analogique et de la représentation symbolique. D'autre part, dans la mesure où les représentations symboliques, verbale et indo-arabe, se « greffent » sur la représentation analogique, nous avons fait l'hypothèse d'une hiérarchie dans laquelle les performances avec la dimension analogique seraient supérieures à celles de la dimension symbolique.

De manière peu surprenante, nous trouvons les effets de distance et de rapport avec les épreuves évaluant la dimension analogique. Les résultats à l'épreuve des cercles sont conformes à nos attentes. En présence d'analogique continu, les participants sont sensibles à la différence de taille entre les deux aires et font d'autant plus d'erreurs que celle-ci est étroite. Avec les épreuves des jetons et des surfaces rectangles, les enfants de 5 ans, répondent avec d'autant moins d'erreurs que le rapport entre les quantités est proche de « 1 ».

La « régularité » observée dans l'effet de rapport avec les épreuves analogiques n'est plus de mise avec les épreuves symboliques, verbale et indo-arabe. Avec les numéraux oraux, on ne note pas de différence significative entre rapport  $1/2$  et  $3/4$  et c'est avec le rapport  $2/3$  que les participants commettent le plus d'erreurs. A 5 ans, la représentation verbale, qui génère de bonnes performances, n'est pas articulée de façon suffisamment étroite avec l'analogique pour permettre l'effet de rapport tel qu'il apparaît dans les épreuves analogiques avec les jetons ou les surfaces. Nos résultats sur la progression des performances au niveau de la représentation verbale peuvent être mis en perspective avec ceux obtenus dans d'autres recherches sur les compétences des enfants de 5 ans dans le domaine des mots de nombre. Lipton et Spelke (2006) ont réalisé trois études avec des enfants de 5 ans. Elles ont évalué jusqu'où les enfants pouvaient compter et leur ont demandé de juger de

transformations effectuées sur des ensembles d'objets. Une partie des ensembles correspondait à l'empan de comptage connu de l'enfant, une autre se situait au-delà. Lipton et Spelke concluent que les enfants de 5 ans, avant tout enseignement formel, possèdent un savoir sur le sens des nombres qui va bien au-delà de la limite de leur comptage et qu'ils ont compris que chaque mot de nombre correspondait à une valeur spécifique.

Une autre observation peut être faite concernant la représentation verbale : il est apparu qu'un lien pouvait être établi entre une bonne connaissance du lexique et les performances avec des numéraux verbaux ; l'épreuve de la WPPSI, que nous avons utilisée, vise à évaluer la façon dont les enfants sont capables de définir un mot et un concept. A 5 ans, les enfants qui manipulent le mieux les concepts langagiers sont aussi ceux qui peuvent donner aux nombres présentés verbalement un sens permettant de réussir les comparaisons.

Avec le format indo-arabe, l'effet de rapport se manifeste par de bons résultats avec le rapport  $1/2$ , le plus éloigné de « 1 ». La différence entre les deux autres rapports n'est pas significative, les enfants de 5 ans ne font pas une discrimination assez forte entre les items des rapports  $2/3$  et  $3/4$  pour que cela se traduise dans un « maillage » avec l'analogique. Pourtant, la progression est remarquable entre 4 et 5 ans. Les enfants apprennent vite l'utilisation du code indo-arabe pour comparer avec une précision croissante des quantités. Comme le relèvent Verguts et Fias (2004), l'être humain bénéficie de l'utilisation des symboles qui, en se liant avec le système non symbolique, « héritent » du sens du nombre tout en permettant des jugements numériques plus précis (avec un moindre effet de distance).

Toujours concernant le code indo-arabe, un autre de nos résultats montre une corrélation entre chaîne verbale et bonnes réponses aux comparaisons en chiffres arabes : pour nos participants, en phase d'apprentissage, nous observons que, plus ils comptent loin, plus ils réussissent aux comparaisons avec des chiffres arabes. L'importance de la connaissance et de la maîtrise du comptage verbal, avec des enfants de 5 ans, a été mise en

évidence par Lipton et Spelke (2005) : ces auteurs ont suggéré que les enfants construisaient l'articulation entre représentations symboliques et non symboliques du nombre à partir du moment où ils maîtrisaient la chaîne numérique. Nos données montrent un lien entre connaissance du comptage oral et représentation indo-arabe.

Nos résultats interrogent sur les liens entretenus entre les deux représentations symboliques. Nous avons précisé, dans la partie théorique, que ces deux dimensions semblent posséder, chez l'adulte, une certaine autonomie, mise en évidence par des doubles dissociations. Selon Fayol, Perros et Seron (2004), il pourrait exister, dans une perspective développementale, une relation initiale entre code verbal et code arabe, l'acquisition de ce dernier étant dans un premier temps dépendant du code verbal. Le code verbal servirait à introduire le code arabe qui s'autonomiserait par la suite. Nos données semblent aller dans ce sens. L'examen des profils individuels (tableaux 3-6 et 3-7) montre que, même si cela est rare, la représentation arabe peut être réussie indépendamment de la représentation verbale.

Enfin, une analyse de régression nous a fourni des indications sur la « greffe » entre représentations analogique et symbolique à 5 ans. Nos données ont permis de mettre en évidence qu'à 5 ans, les enfants peuvent manipuler les quantités présentées sous forme de codes symboliques en « s'échappant » des caractéristiques perceptives de la représentation analogique.

En résumé, nos données avec les enfants de 5 ans montrent que les épreuves analogiques correspondent au patron attendu et se déclinent en fonction de l'effet de distance et de rapport. Pour les épreuves symboliques, la présence de l'effet de rapport est beaucoup moins claire que pour l'analogique. Pourtant, les performances pour le verbal et l'indo-arabe approchent voire dépassent celles de l'analogique. A 5 ans, la représentation symbolique, rapide et précise, est en train de se développer et de s'autonomiser.



### **Synthèse comparative des résultats obtenus avec les enfants de 4 et 5 ans.**

Les enfants des deux populations ont passé les mêmes épreuves tant au niveau des caractéristiques cognitives (à l'exception toutefois de l'évaluation du raisonnement abstrait avec la MSCAD à 4 ans et l'ECS II à 5 ans) que des comparaisons de quantités. Dans une perspective développementale, il est donc possible d'étudier leurs performances afin d'observer les changements éventuels. Le tableau 3-8 présente les caractéristiques de chacune des deux populations.

Concernant les caractéristiques cognitives, les enfants de 5 ans écrivent significativement plus loin la suite des chiffres arabes que ceux de 4 ans ( $M = 5,09$  et  $2,31$ , respectivement),  $t(47) = 2,80$  ;  $p < .008$ . Des différences apparaissent avec les épreuves de comparaisons de quantités : les enfants de 5 ans sont plus performants que ceux de 4 ans aux comparaisons d'ensembles de jetons ( $M = 0,84$  et  $M = 0,76$ , respectivement),  $t(47) = 2,62$  ;  $p < .03$  ; aux comparaisons de surfaces rectangles ( $M = 0,78$  et  $M = 0,67$ ),  $t(47) = 3,14$  ;  $p < .005$  ; aux comparaisons verbales ( $M = 0,89$  et  $M = 0,73$ ),  $t(47) = 4,20$  ;  $p < .002$  et aux comparaisons en chiffres arabes ( $M = 0,83$  et  $M = 0,69$ ),  $t(47) = 3,50$  ;  $p < .003$ . A l'exception des comparaisons de cercles, les enfants de 5 ans fournissent plus de bonnes réponses que ceux de 4 ans dans toutes les épreuves d'évaluation des représentations du triple code, qu'elles soient analogiques ou symboliques.

**Tableau 3-8.** Moyennes des caractéristiques cognitives et des performances aux épreuves du triple code des populations de 4 et 5 ans. (TRS = Temps de Réaction Simple ; vocab = vocabulaire ; chverb = chaîne verbale ; points = comptage de points ; collect = constitution de collections ; escrit = comptage en écriture arabe ; mscad et ECS II = raisonnement abstrait).

	4 ans		5 ans	
	Moyenne	ET	Moyenne	ET
<b>age</b>	55	2,50	65	3,43
<b>TRS</b>	630	193	549	113
<b>vocab</b>	8,65	5,2	8,52	3,629
<b>chverb</b>	18	2,94	19,26	2,56
<b>points</b>	4,19	1,10	3,78	1,65
<b>collect</b>	3,69	1,23	4,17	1,114
<b>ecrit</b>	2,31	3,03	5,09	3,91
<b>Cercles</b>	0,83	0,13	0,89	0,12
<b>Jetons</b>	0,76	0,13	0,84	0,10
<b>Surf.Rect</b>	0,67	0,13	0,78	0,12
<b>Verbal</b>	0,73	0,15	0,89	0,09
<b>Arabe</b>	0,69	0,16	0,84	0,12

### III - 4 - Discussion générale

Nous avons mené deux expériences avec des enfants d'âge préscolaire afin d'investiguer la façon dont l'enfant fait l'acquisition du nombre. Prenant pour cadre théorique le modèle du triple code, notre objectif est de comprendre comment les codes symboliques se mettent en relation avec la représentation analogique. Pour étudier cette articulation, nous avons choisi à travers des épreuves de comparaisons d'analyser l'effet de rapport. Notre hypothèse est celle d'une hiérarchie dominée par la représentation analogique sur laquelle viendra se « greffer » la représentation symbolique.

Avec les enfants de 4 ans, celui-ci est présent avec les épreuves analogiques de comparaisons d'ensembles de jetons et de surfaces rectangles dont la densité est contrôlée. Lorsque le rapport se rapproche de « 1 », les enfants de 4 ans font plus d'erreurs. Avec le code verbal, nous avons relevé une sensibilité au rapport : les performances sont meilleures

avec un rapport éloigné de « 1 ». Avec les chiffres arabes, cet effet de rapport disparaît : le nombre d'erreurs est plus important avec le rapport 2/3 que 3/4, ce qui suggère que l'activation du code indo-arabe ne se fait pas en lien avec l'analogique. Comme attendu, à 4 ans, les performances aux comparaisons de quantités sont meilleures avec les épreuves analogiques (cercles et jetons) qu'avec les épreuves symboliques. La précision est meilleure avec la représentation verbale qu'avec la représentation indo-arabe.

Avec les enfants de 5 ans, l'effet de rapport apparaît avec toutes les épreuves ayant une dimension analogique. Les enfants sont plus précis lorsque la distance est grande (cercles) ou lorsque le rapport s'éloigne de « 1 » (jetons et surfaces rectangles). Les performances aux comparaisons avec les codes symboliques ne présentent pas les mêmes caractéristiques que celles avec un format analogique : les performances aux rapports 1/2 et 3/4 et celles aux rapports 2/3 et 3/4 ne sont pas significativement différentes avec, respectivement, le code verbal et le code indo-arabe. Toutefois, à 5 ans, les codes symboliques permettent aux enfants d'effectuer les comparaisons numériques avec une précision grandissante au point d'égaliser, voire de dépasser les performances aux épreuves analogiques. Ce constat interroge notre hypothèse d'une hiérarchie de type :  $A \geq Sv \geq Sa$ .

D'un point de vue développemental, des différences apparaissent entre enfants de 4 et 5 ans au niveau des performances. Par rapport aux enfants de 4 ans, les enfants de 5 ans ont acquis une meilleure précision dans leurs réponses lorsqu'ils ont des comparaisons à effectuer. Ce constat d'une progression rapide concerne les domaines de l'analogique et du symbolique. L'analyse des profils individuels montre qu'à 4 ans, 7 participants ont franchi le seuil de réussite de 27 bonnes réponses pour l'ensemble des épreuves de comparaisons contre 2 qui échouent sur la totalité. Ils sont 13, à 5 ans, à atteindre ou dépasser ce seuil et aucun n'échoue à l'ensemble des épreuves. En l'espace d'un an, les enfants ont progressé dans leur maîtrise du nombre et des comparaisons de quantités.

Avec les épreuves des jetons et des surfaces rectangles, les enfants de 5 ans, comme les enfants de 4 ans, répondent avec d'autant moins d'erreurs que le rapport entre les quantités est proche de « 1 ». Mais les enfants de 5 ans font preuve d'une meilleure discrimination. Cette observation rejoint les conclusions d'Halberda et al. (2008) qui ont mis en évidence une acuité croissante du système d'approximation numérique chez les enfants de 3 à 6 ans.

La progression dans les bonnes réponses est particulièrement sensible avec les codes symboliques. Le profil des réponses est très différent entre 4 et 5 ans avec une sorte d'« explosion » des codes symboliques. Ce constat est important car l'acquisition des codes symboliques permet une meilleure précision dans les comparaisons numériques notamment lorsque le rapport entre les quantités se resserre. Ainsi, avec le rapport  $3/4$ , 83 % des participants de 5 ans franchissent le seuil de réussite avec les numéraux oraux et les chiffres arabes contre 65 % pour les comparaisons de jetons : à 4 ans, pour le même rapport  $3/4$ , 38 % franchissent le seuil de réussite avec les comparaisons verbales, 46 % avec les comparaisons indo-arabes contre 42 % pour les comparaisons de jetons. A 5 ans, cette habileté dans l'utilisation des codes symboliques ne s'accompagne pourtant pas d'un effet de rapport qui signerait la « greffe » sur la représentation analogique. Une interprétation de ce constat pourrait être que les enfants en phase d'acquisition n'ont pas encore automatisé l'activation des codes symboliques ; ils répondraient par une forme de comptage. Cette observation, qui reste à confirmer, expliquerait pourquoi les enfants de 5 ans de notre échantillon réussissent mieux aux comparaisons verbales avec la distance 1 qu'avec les distances 2 ou 3. Ils ne montreraient pas d'effet de distance (plus les quantités à comparer sont proches, plus il y a d'erreurs) car ils compteraient. Lorsque les numérosités ne sont pas automatiquement activées, l'effet de distance n'apparaît pas. Butterworth (1999) a rapporté le cas d'un patient, Charles, qui avait réussi des études brillantes - malgré un trouble profond en arithmétique. Les tests ont révélé que, lorsque Charles devait comparer les chiffres entre 1 et 9, il montrait un

effet de distance inversé. Pour décider entre deux nombres lequel était le plus grand, il comptait pas à pas ; il n'était donc pas plus rapide pour choisir la réponse correcte quand la différence numérique était importante que quand elle était réduite. Charles ne montrait pas d'effet de distance car il n'activait pas automatiquement la magnitude des nombres. Il se peut que les enfants, au cours de leur développement, tant que la mise en relation entre représentation analogique et codes symboliques n'est pas automatisée, se comportent comme Charles.

Nos résultats montrent, par ailleurs, que la période entre 4 et 5 ans revêt une importance particulière dans cette mise en relation entre représentation analogique et codes symboliques. Les analyses de régression font apparaître une évolution dans les traitements symboliques entre 4 et 5 ans. Contrairement aux résultats obtenus avec les enfants de 4 ans, pour lesquels nous avons relevé une contribution des cercles et des jetons dans la représentation verbale, l'analyse de régression ne montre plus, avec les 5 ans, de contribution des épreuves de comparaisons des cercles, des jetons et des surfaces. A 4 ans, les enfants semblent se référer aux traitements analogiques pour traiter les comparaisons symboliques verbales. A 5 ans, cette référence semble ne plus être présente, ce qui suggère un détachement du code verbal des contingences perceptives de l'analogique. Une évolution se produit aussi avec le code indo-arabe. A 4 ans, nous avons noté une contribution de la seule comparaison des surfaces ; à 5 ans, elle n'apparaît que de manière tendancielle, les deux autres dimensions, cercles et jetons, n'étant pas significatives. Ces deux résultats tendent à montrer qu'entre 4 et 5 ans, les épreuves symboliques commencent à acquérir leur caractère propre qui va continuer à se développer. Avec les adultes, nous avons pu constater que les temps de réaction aux comparaisons avec des chiffres arabes n'étaient pas corrélés avec ceux des épreuves analogiques, ce qui suggère un traitement différent pour le code indo-arabe lorsqu'il est automatisé.

## **CHAPITRE IV - EXPERIENCE 4 - Traitement du nombre et prématurité.**

Après avoir observé avec des enfants de 4 et 5 ans issus de classes ordinaires le traitement du nombre en relation avec les représentations analogique et symbolique postulées dans le modèle du triple code, nous avons voulu étudier l'articulation de ces représentations avec une population susceptible de présenter des troubles du calcul.

Nous cherchons à mettre en évidence, chez des enfants ayant des difficultés en arithmétique, soit une atteinte d'une des trois composantes (représentation analogique, verbale ou arabe), soit une difficulté à établir les relations entre représentation analogique et représentations symboliques. Selon Dehaene, Molko et Wilson (2004), les enfants nés prématurément ont un risque plus élevé de troubles du calcul que les enfants tout-venant.

Selon l'INSERM<sup>10</sup>, « *la prématurité est une naissance avant le terme normal de grossesse. La durée normale de grossesse est de 40 à 41 semaines. Cependant, il existe des degrés de prématurité qui sont définis notamment par une recommandation de l'Organisation mondiale de la santé (OMS). L'âge gestationnel est un critère nécessaire et suffisant. Tout enfant né avant le terme de 37 semaines révolues d'aménorrhée (absence de règles), soit huit mois de grossesse, est considéré comme un prématuré* ». Dans un rapport sur la grande prématurité (1997), les experts de l'INSERM précisent que trois niveaux de prématurité sont habituellement distingués :

- La prématurité moyenne (de 32 SA à 36 SA<sup>11</sup> + 6 jours)
- La grande prématurité (de 28 SA à 32 SA + 6 jours)
- La très grande prématurité (naissance inférieure à 28 SA).

---

<sup>10</sup> (<http://www.inserm.fr/thematiques/biologie-cellulaire-developpement-et-evolution/dossiers-d-information/prematurite>)

<sup>11</sup> SA = semaines d'aménorrhée

Avec la durée de la gestation, un autre critère est lié à la prématurité, le poids à la naissance. Sayeur, McKerral et Lassonde (2011) notent qu'à la naissance, un bébé de moins de 2500 g est considéré comme de faible poids, moins de 1500 g de très faible poids et moins de 1000 g d'un poids extrêmement faible.

En France, une étude de cohorte destinée à observer le devenir des enfants prématurés a été lancée en 1997 sous l'égide de l'INSERM. Intitulée EPIPAGE<sup>12</sup> (Etude EPIdémiologique sur les Petits Ages Gestationnels), elle avait pour objectif d'améliorer les connaissances sur le développement des enfants nés avant la fin du 7<sup>ième</sup> mois de grossesse. En France, environ 10000 enfants naissent chaque année grands prématurés avec des risques accrus de troubles neurologiques et de déficits cognitifs. Pour EPIPAGE, les enfants nés en 1997 dans neuf régions françaises ont été inclus dans l'étude. Deux groupes ont été constitués : l'un avec des enfants prématurés (naissance entre 22 et 32 SA), l'autre - groupe témoin - avec des enfants nés à terme (entre 39 et 40 SA). Larroque et al. (2008), pour le groupe EPIPAGE, ont fait le bilan du suivi longitudinal lorsque les enfants ont atteint l'âge de 5 ans. Ces enfants ont alors fait l'objet d'examens médicaux et psychologiques. Les fonctions cognitives ont été testées à l'aide du K.ABC (Kaufman Assessment Battery for Children). Le K.ABC évalue l'intelligence fluide à partir d'épreuves réparties selon deux échelles de processus, séquentiels ou simultanés, et le calcul d'un indice, PMC (Processus Mentaux Composites) considéré comme l'équivalent du QI. Pour les PMC, la moyenne est 100, l'écart-type, 15. Concernant l'efficacité intellectuelle, les résultats de l'étude EPIPAGE montrent une incidence de la prématurité :

- Un score de PMC inférieur à 70 a été trouvé chez 12 % des enfants grands prématurés contre 3 % dans le groupe témoin ( $p < .0001$ ) ;

---

<sup>12</sup> En 2011, a débuté EPIPAGE 2, une nouvelle étude de cohorte destinée à continuer la recherche sur le devenir des enfants prématurés et sur l'adaptation des prises en charge médicales et éducatives en lien avec la prématurité.

- Pour les PMC entre 70 et 84, le risque est aussi significativement plus important ( $p < .0001$ ) pour les prématurés (21 %) comparativement au groupe de référence (8%).

Les auteurs notent une diminution du pourcentage des faibles PMC avec l'augmentation de l'âge gestationnel. Entre les enfants nés avant 26 semaines et le groupe témoin, la différence en terme d'efficience intellectuelle est de 18 points. Ce constat est d'importance dans la mesure où le score aux PMC est prédictif de la réussite académique et des futures difficultés d'apprentissage.

Provasi, Bloch et Lequien (2004) se sont aussi intéressés aux conséquences cognitives et sociales de la prématurité. Du point de vue cognitif, ces auteurs relèvent que l'enfant prématuré ne présente pas de déficit intellectuel (QI normal) bien qu'il existe un décalage, proportionnel au degré de prématurité, avec les enfants nés à terme. De manière plus fine, ils pointent chez l'enfant prématuré une difficulté dans la gestion d'informations complexes et simultanées avec des incidences au niveau du raisonnement logique, de l'orientation spatiale ou de la compréhension d'histoires. Provasi et al. notent que de nombreuses observations vont dans le sens d'un lien entre prématurité et troubles de l'attention (sans agitation) avec des répercussions possibles quant aux apprentissages.

Plus récemment, Sayeur et al. (2011) ont proposé une revue de la littérature sur les troubles cognitifs, comportementaux et d'apprentissage chez les enfants prématurés. Ces auteurs notent que les progrès dans le domaine médical permettent de sauver des enfants avec un âge gestationnel de plus en plus bas et un poids de plus en plus faible. Néanmoins, ce gain en terme de taux de survie ne supprime pas les risques de troubles ultérieurs au cours du développement. Les recherches recensées ont mis en évidence une influence potentiellement négative de la prématurité influant sur le fonctionnement intellectuel, le langage, la mémoire, les fonctions visuo-motrices et visuo-spatiales, l'attention ou les fonctions exécutives. Les conséquences de ces déficits cognitifs se font sentir au niveau des apprentissages avec, pour



les enfants prématurés, un risque accru - comparativement aux enfants nés à terme - de difficultés au cours de la scolarité. Les domaines les plus touchés chez les enfants prématurés sont la lecture et, surtout, l'arithmétique.

Ce constat est partagé par Taylor, Espy et Anderson (2009). Ces auteurs ont étudié les difficultés en mathématiques des enfants nés avec un faible poids de naissance (<1500 g) ou avant un âge gestationnel de 32 semaines. Ces enfants ne présentent pas forcément des perturbations neurodéveloppementales importantes, mais sont néanmoins susceptibles d'être affectés par des déficits cognitifs moins apparents. Taylor et al. notent que, si les difficultés d'apprentissage touchent la lecture, l'orthographe et l'écriture, ce sont les mathématiques qui sont principalement affectées. Les études de cohorte ont montré que les enfants prématurés ont des scores plus faibles que les enfants des groupes contrôles aux tests arithmétiques - même lorsque les enfants les plus handicapés sont exclus des analyses et que le QI est contrôlé.

Ross, Lipper et Auld (1991) se sont intéressés aux enfants prématurés de faible poids de naissance lorsqu'ils abordent la scolarité. Ils ont mené une étude avec 88 enfants prématurés (poids  $\leq$  à 1500 g à la naissance) et 80 nés à terme. Les participants étaient âgés de 7 et 8 ans. Les prématurés ont passé un examen médical et neurologique et tous les enfants (prématurés ou non) ont eu un bilan intellectuel (WISC-R) et de connaissances. Les résultats montrent un score de QI plus faible et un taux plus important que la normale de difficultés scolaires chez les prématurés. Lorsque les enfants prématurés et ceux nés à terme avaient un bilan intellectuel et neurologique dans la norme, la seule mesure pour laquelle ils présentaient une différence significative était celle concernant l'arithmétique.

Les données, dans leur ensemble, montrent donc que les enfants prématurés sont plus susceptibles que les enfants nés à terme d'avoir des difficultés dans les apprentissages scolaires et, notamment, dans ceux en lien avec l'arithmétique. Toutefois, à ce jour, on ne sait

pas exactement quelles dimensions des performances arithmétiques sont affectées. C'est pourquoi, dans cette nouvelle recherche, nous avons testé des enfants prématurés de 5 ans. Nous les avons appariés avec des enfants tout-venant et nous les avons soumis aux épreuves de connaissances numériques et aux comparaisons évaluant les représentations du modèle du triple code. Ce modèle de référence peut, d'une part, nous permettre d'observer si une ou plusieurs dimensions sont déficitaires chez les enfants prématurés, et, d'autre part, fournir des éléments sur les différences entre enfants prématurés (P) et enfants tout-venant (TV). Comme pour les catégories précédentes d'enfants, nous ferons l'hypothèse d'une hiérarchie ( $A \geq Sv \geq Sa$ ) dans laquelle l'analogique prédomine en étant plus précis que le symbolique.

Comme nous l'avons fait avec les enfants de 4 et 5 ans, nous avons effectué deux niveaux d'analyse des performances : d'abord au niveau du groupe et ensuite au niveau individuel. Les performances aux épreuves de caractéristiques cognitives nous ont permis de définir les critères d'appariement des enfants tout-venant et des enfants prématurés. Dans la mesure où les enfants prématurés présenteraient une atteinte sur une ou plusieurs des composantes du triple code, nous attendons qu'ils obtiennent des résultats plus faibles que les enfants tout-venant sur les deux dimensions, analogique et symbolique, dans les épreuves de comparaisons de quantités. Nous pensons observer, grâce aux performances aux rapports, des différences dans la finesse des discriminations entre les deux groupes. Ces différences pourront être relevées éventuellement avec la représentation analogique, mais, plus sûrement, avec la représentation symbolique. Nous attendons de retrouver notre hypothèse hiérarchique au niveau individuel où nous mettrons en perspective les connaissances des enfants avec les performances aux épreuves de comparaisons de quantités.

## **IV- 1 - Méthode**

### ***Participants :***

Les enfants prématurés sont de grands prématurés, nés entre 28 et 32 SA. Ils sont âgés de 5 ans et scolarisés en grande section de maternelle. Ils viennent de la région Franche-Comté. Ils ont été hospitalisés au service de néonatalogie de l'hôpital Saint Jacques de Besançon. Tous étaient indemnes de séquelles neurologiques, et leur développement avait été jugé harmonieux lors des dernières consultations de suivi systématique des enfants anciens prématurés. Sept enfants anciens grands prématurés ont effectué les épreuves. Nous avons exclu de notre échantillon les enfants présentant un handicap sévère, un déficit intellectuel, ou une pathologie diagnostiquée.

Les performances réalisées à un certain nombre d'épreuves par les enfants grands prématurés seront comparées à celles d'enfants tout-venant. Le groupe témoin est constitué de 7 enfants de 5 ans issus de classes urbaines ou semi urbaines et de milieux sociaux variés de la région Auvergne. Les enfants du groupe témoin faisaient partie de l'échantillon décrit précédemment et avaient déjà passé les épreuves.

Sept enfants prématurés ont donc été appariés à sept enfants issus de notre population d'enfants de 5 ans. Ces appariements ont été réalisés par rapport aux résultats des enfants grands prématurés aux épreuves initiales (définissant les caractéristiques cognitives des participants).

### ***Procédure et matériel***

Pour les enfants prématurés, la procédure est semblable à celle utilisée avec les enfants de 4 et 5 ans. Un expérimentateur a fait passer individuellement à chaque participant le protocole, en deux sessions, afin d'éviter un éventuel effet de fatigue.

Au cours de la première session, les enfants ont répondu à plusieurs épreuves afin de déterminer leurs caractéristiques cognitives (temps de réaction simple x 2 ; subtest Vocabulaire de la WPPSI ; contrôle du niveau de connaissances numériques avec énonciation de la chaîne verbale, comptage/dénombrément, constitution de collections, comptage en écriture arabe ; subtest Résolution de Problèmes abstraits de l'ECS II).

Au cours de la seconde session, les participants ont été soumis aux épreuves de comparaisons afin d'évaluer les trois types de représentations. L'ordre et la nature des tâches étaient les mêmes que lors des expériences précédentes.

## **IV- 2 - Résultats**

Comme précédemment, nous présenterons les résultats de groupe, avant d'analyser les profils individuels. Au niveau du groupe, nous comparerons les performances des enfants prématurés et des enfants tout-venant. Nous exposerons tout d'abord les épreuves définissant les caractéristiques des deux populations puis les corrélations existant entre ces épreuves. Nous présenterons ensuite les analyses de variances pour chacune des épreuves de comparaisons de quantités (avec, là aussi, l'évaluation des performances de chaque groupe) et un tableau général des corrélations. Nous terminerons par l'analyse des profils individuels.

### **A- Résultats pour les deux groupes.**

#### **Epreuve contrôle : comparaisons de réglettes**

Les enfants tout-venant, choisis dans la population des enfants de 5 ans, avaient préalablement passé avec succès l'épreuve de comparaison de réglettes visant à contrôler que l'enfant comprenait bien les notions de « plus grand » et « plus petit ». Aucun enfant prématuré n'échoue à cette tâche qui est réussie à hauteur de 86 % ( $ET = 10$ ) par le groupe des enfants prématurés.

### *Caractéristiques cognitives des deux groupes*

Les résultats aux épreuves suivantes définissant les connaissances des enfants ont servi de base pour constituer l'appariement des enfants prématurés avec des enfants tout-venant.

- Vocabulaire

L'épreuve de vocabulaire de la WPPSI est étalonnée de telle manière que la moyenne des performances d'une tranche d'âge se situe à 10. La moyenne des grands prématurés est de 8,71 ( $ET = 2,22$ ) tandis que les tout-venant obtiennent 9,14 ( $ET = 2,61$ ). Les performances en vocabulaire sont sensiblement identiques dans nos deux populations.

- Chaîne verbale :

La tâche d'énonciation de la chaîne verbale prenait en compte le dernier élément de la séquence correcte et avait comme limite supérieure « 20 ». La moyenne pour cette épreuve est 11,43 ( $ET = 4,61$ ) pour les grands prématurés et de 20 pour les tout venant. Ainsi, les enfants tout-venant sont significativement meilleurs que les enfants grands prématurés,  $t(12) = 4,92$  ;  $p < .001$  .

- Dénombrement de points :

L'enfant était invité à dénombrer des séries de 3, 7, 9, 12 puis 18 points collés sur des cartes. La moyenne à cette épreuve est de 2,29 ( $ET = 1,11$ ) pour les grands prématurés et de 4 ( $ET = 1,41$ ) pour les tout-venant. Les tout-venant sont significativement meilleurs que les prématurés,  $t(12) = 2,52$  ;  $p = .027$ .

- Constitution de collections :

L'enfant devait constituer des collections de 2, 4, 6, 9 ou 12 cubes. Les résultats des prématurés ( $M = 3,43$  ;  $ET = 0,98$  ) et des tout-venant ( $M = 4$  ;  $ET = 1,16$ ) ne diffèrent pas significativement, ( $t(28) = 1$  ;  $p = ns$ ).

- Comptage en écriture arabe :

L'enfant était invité à effectuer un comptage écrit en utilisant le code indo-arabe. La moyenne des tout-venant est de 5 ( $ET = 3,32$ ) et de 3,71 ( $ET = 1,98$ ) pour les prématurés, le critère d'arrêt ayant été établi à 20. Aucun enfant des deux groupes n'atteint la limite supérieure. Les deux groupes obtiennent des performances équivalentes en ce qui concerne le comptage en écriture arabe ( $t(12) = .88$  ;  $p = ns$ ).

- Epreuve de résolution de problèmes abstraits :

Cette épreuve de matrices consiste à choisir une réponse parmi cinq proposées, pour compléter un dessin auquel un élément a été ôté. Pour chaque enfant, la note brute était prise en compte. Les deux populations obtiennent une moyenne équivalente de 12,71 (/24), ( $t(12) = .00$  ;  $p = ns$ ).

Ainsi, les deux groupes obtiennent des performances équivalentes aux épreuves de vocabulaire, de constitution de collections, de raisonnement et de comptage mobilisant la chaîne arabe. En revanche, les deux groupes diffèrent relativement aux épreuves d'énonciation de la chaîne verbale et de comptage de points : dans les deux cas, les enfants tout-venant sont significativement meilleurs que les enfants grands prématurés. Ces deux facteurs pourront évidemment influencer sur les performances aux épreuves ultérieures. Les résultats à ces premières épreuves nous ont servi à appairer les enfants prématurés avec des enfants tout-venant issus de notre population d'enfants de 5 ans : les appariements se sont faits en fonction du sexe, des performances en vocabulaire et des performances à l'ECS II.

Le tableau 4-1 présente les résultats aux épreuves définissant les caractéristiques de la population pour les enfants tout-venant (TV) et prématurés (P) : les épreuves de vocabulaire,

d'énonciation de la chaîne verbale, de dénombrement, de constitution de collections, de comptage en écriture arabe et de résolution de problèmes abstraits de l'ECS II.

**Tableau 4-1.** Performances initiales moyennes des deux populations : enfants prématurés et enfants tout-venant âgés de 5 ans.

	Age moyen en mois	Sexe	Niveau scolaire	Vocabulaire. /20	Chaîne verbale /20	Comptage points /5	Collections /5	Comptage écrit /20	ECS II /24
T-V	65,9	4 garçons 3 filles	GSM	9,14	20	4	4	5	12,71
P	60	4 garçons 3 filles	GSM	8,71	11,43	2,29	3,43	3,71	12,71
Seuil de significativité				NS	p<.005	P<.05	NS F<1	NS F<1	NS F<1

### *Corrélations entre les épreuves d'évaluation des caractéristiques cognitives*

Nous présentons les corrélations pour l'une et l'autre des deux populations. Pour les prématurés, on note une corrélation entre comptage écrit et constitution de collections,  $r = .765$  ;  $p < .047$ . Aucune corrélation n'apparaît avec les résultats des enfants tout-venant.

**Tableau 4-2.** Corrélations entre les épreuves évaluant les caractéristiques cognitives des enfants prématurés et tout-venant. Les résultats pour les P figurent en clair en haut du tableau; ceux des TV en grisé (vocab = vocabulaire ; chverb = chaîne verbale ; points = comptage de points ; collect = constitution de collections ; escrit = comptage en écriture arabe ; ECS II = raisonnement abstrait).

	Vocab	chverb	points	collect	ecrit	ECSII
vocab	1	0,291	-0,435	0,066	0,397	-0,016
chverb	.b	1	0,264	0,212	0,71	0,108
points	-0,316	.b	1	0,175	0,347	-0,252
collect	0,111	.b	-0,204	1	,765*	0,576
ecrit	0,713	.b	-0,142	0,131	1	0,271
ECSII	-0,238	.b	0,262	-0,08	-0,531	1

b. La variable Chaîne Verbale pour les TV est considérée comme une constante. Il n'y a donc pas de calcul.

### *Analyses des résultats aux épreuves de comparaisons*

Nous avons analysé chacune des épreuves en traitant les bonnes réponses. Les Temps de Réaction de base ont été calculés à partir de la deuxième mesure de temps de réaction simple, en effectuant la moyenne des trois derniers scores. Comme les Temps de Réaction de base varient significativement - les enfants grands prématurés sont significativement plus lents que les enfants tout-venant (707 et 459 ms, respectivement),  $t(12) = -3,86$  ;  $p < 0,003$  -, le Temps de Réaction de base a été entré systématiquement comme covariant dans toutes les analyses de variance. Ces ANOVA ont été conduites avec le facteur groupe (grands prématurés vs enfants nés à terme) comme facteur inter et le facteur rapport (1/2, 2/3, 3/4) comme facteur intra.

#### ● Quantités continues : comparaisons de cercles

Cette épreuve demande de comparer des quantités continues : deux cercles dont les diamètres différaient selon trois distances : 0,5 cm, 1 cm et 1,5 cm, chaque distance comprenant 12 items.



L'effet du groupe n'est pas significatif ( $F(1,12)=1,99$ ,  $CME = .08$ ), même si les performances des grands prématurés (71 % de réussite) sont descriptivement inférieures à celles des tout-venant (84 % de réussite). La prise en compte du Temps de Réaction de base comme covariant ne modifie pas les résultats ( $F < 1$ ). Les deux groupes ont des performances équivalentes à l'épreuve de comparaisons de quantités continues.

L'effet de distance est significatif,  $F(2,24) = 5,4$ ,  $CME = .016$ ,  $p < .02$  : les performances s'améliorent lorsque les différences de dimensions entre les cercles augmentent, 69% ( $ET = 18$ ), 77% ( $ET = 22$ ) et 86% ( $ET = 19$ ) respectivement pour les trois dimensions croissantes des cercles. Conformément aux attentes, plus la distance séparant deux cercles à comparer est petite, plus le nombre d'erreurs augmente, ce qui correspond à l'effet de distance décrit dans la littérature. L'interaction n'est pas significative, ce qui suggère que l'effet de distance est identique pour les deux groupes.

En résumé, les performances des deux groupes ne diffèrent pas : les enfants prématurés et les enfants tout-venant sont également sensibles aux différences de distances entre les cercles.

**Tableau 4-3.** Moyennes des bonnes réponses pour les deux populations à l'épreuve des cercles.

<b>Cercles (36 items)</b>	<b>TV</b>	<b>P</b>	<b>Moyenne des deux populations</b>
Distance 1 (0,5 cm)	0,75	0,64	0,69
Distance 2 (1 cm)	0,82	0,71	0,77
Distance 3 (1,5 cm)	0,94	0,77	0,86
Moyenne de chaque population	0,84	0,71	0,77

### ● Comparaisons d'ensembles de jetons

L'effet du groupe est significatif,  $F(1,12) = 10,16$ ,  $CME = .03$ ,  $p < .02$  : le pourcentage de réussite des prématurés (66 %) est inférieur à celui des tout-venant (85 %). L'entrée du Temps de Réaction de base comme covariant fait disparaître l'effet du groupe ( $F < 1$ ).

Les effets des Rapports et de l'interaction Groupe x Rapports sont tous deux significatifs, respectivement,  $F(2, 24) = 17,56$ ,  $CME = .008$ ,  $p < .0001$  et  $F(2, 24) = 8,16$ ,  $CME = .008$ ,  $p < .002$ . D'une part, les performances des deux groupes s'améliorent lorsque le rapport s'éloigne de 1 : 65%, 76% et 86% pour 3/4, 2/3 et 1/2, respectivement. D'autre part, les performances des groupes diffèrent avec les rapports 1/2,  $t(12) = 2,50$  ;  $p < .03$ , et 2/3,  $t(12) = 5,88$  ;  $p < .001$ , mais non avec le rapport 3/4 ( $F < 1$ ). Les enfants tout-venant obtiennent de meilleures performances avec le rapport 1/2, (92% contre 80%), 2/3 (93% contre 58%) et, à un moindre degré, 3/4 (69% vs 61%). Leurs capacités de discrimination des différences numériques sont plus fines que celles des enfants prématurés.

En résumé, relativement aux épreuves non symboliques, les performances aux comparaisons de cercles des deux groupes ne diffèrent pas. Dans les comparaisons de jetons, lorsque le Temps de Réaction de base est entré comme covariant, l'effet du groupe n'est plus relevé. L'interaction Groupe x Rapport fait apparaître que les enfants tout-venant sont plus performants dans la perception des différences numériques que les enfants prématurés.

**Tableau 4-4.** Moyennes des bonnes réponses pour les deux populations à l'épreuve des jetons.

<b>Jetons (36 items)</b>	<b>TV</b>	<b>P</b>	<b>Moyenne des deux populations</b>
Rapport 1/2	0,92	0,80	0,86
Rapport 2/3	0,93	0,58	0,76
Rapport 3/4	0,69	0,61	0,65
Moyenne de chaque population	0,85	0,66	0,76

● Comparaisons de surfaces rectangles

Les effets du groupe et des rapports sont seuls tendanciellement significatifs ou significatifs, respectivement,  $F(1, 12) = 3,79$ ,  $CME = .05$ ,  $p = .07$ , et  $F(2, 24) = 16,45$ ,  $CME = .01$ ,  $p < .0001$ . La prise en compte du Temps de Réaction de base fait disparaître l'effet du groupe ( $F < 1$ ). Les performances s'améliorent pour chacun des deux groupes à mesure que le rapport s'éloigne de « 1 » : 57% (pour 3/4), 71% (pour 2/3) et 80% (pour 1/2) même si les pourcentages de réussite sont plus faibles chez les prématurés que chez les tout-venant. Bien que l'interaction ne soit pas significative, une série d'analyses opposant les réussites des prématurés et des tout-venant à chacun des rapports montre que les deux groupes ne diffèrent ni pour le rapport 1/2 ( $F < 1$ ), ni pour le rapport 3/4 ( $t(12) = 1,39$  ; ns) mais présentent un score significativement différent pour le rapport 2/3,  $t(12) = 2,65$  ;  $p < .03$ . Les enfants prématurés semblent moins sensibles aux différences de rapports que les enfants tout-venant.

En résumé, avec les comparaisons de surfaces rectangles, les performances des enfants tout-venant et des enfants prématurés ne diffèrent pas lorsque le Temps de Réaction de base est entré comme covariant. Toutefois, les prématurés sont moins sensibles aux différences de rapports, notamment le plus précis, que les enfants tout-venant.

**Tableau 4-5.** Moyennes des bonnes réponses aux comparaisons des surfaces rectangles.

<b>Surf. Rect. (36 items)</b>	<b>TV</b>	<b>P</b>	<b>Moyenne des deux populations</b>
Rapport 1/2	0,83	0,76	0,80
Rapport 2/3	0,83	0,60	0,71
Rapport 3/4	0,63	0,51	0,57
Moyenne de chaque population	0,76	0,62	0,69

● Comparaisons présentées verbalement.

L'effet du groupe est significatif,  $F(1, 12) = 32,77$ ,  $CME = .018$ ,  $p < .0001$ , même après entrée du Temps de Réaction de base comme covariant ( $p < .005$ ) : les prématurés ont des performances inférieures (64%) à celles des tout-venant (87%). Les effets des rapports et d'interaction Groupe x Rapport sont tous deux tendanciellement significatifs, respectivement :  $F(2, 24) = 2,77$ ,  $CME = .011$ ,  $p = .08$ , et  $F(2, 24) = 2,8$ ,  $CME = .011$ ,  $p = .08$ . Les performances varient peu en fonction des rapports : 81%, 72% et 74% respectivement pour les rapports 1/2, 2/3 et 3/4. Toutefois, ces variations sont surtout présentes chez les prématurés (respectivement 74%, 61% et 57%) alors que les performances sont quasi stables chez les tout-venant (88%, 83% et 90%). Les performances des groupes diffèrent avec les trois rapports : avec le rapport 1/2,  $t(12) = 3,13$  ;  $p < .01$ , avec le rapport 2/3,  $t(12) = 3,49$  ;  $p < .005$ , et avec le rapport 3/4,  $t(12) = 4,76$  ;  $p < .001$ . Les enfants prématurés seraient plus sensibles aux différences de rapport lorsque les quantités sont présentées sous un format auditivo-verbal.

En résumé, les prématurés obtiennent des performances inférieures à celles des enfants tout-venant, même quand le Temps de Réaction de base est entré comme covariant. Les

différences entre les deux groupes sont importantes quel que soit le rapport. Les performances sont plus précises et plus homogènes chez les tout-venant que chez les prématurés.

**Tableau 4-6.** Moyennes des bonnes réponses aux comparaisons verbales.

<b>Verbal (36 items)</b>	<b>TV</b>	<b>P</b>	<b>Moyenne des deux populations</b>
Rapport 1/2	0,88	0,74	0,81
Rapport 2/3	0,83	0,61	0,72
Rapport 3/4	0,90	0,57	0,73
Moyenne de chaque population	0,87	0,64	0,75

● Comparaisons de quantités exprimées en chiffres arabes.

L'effet de groupe est significatif,  $F(1, 12) = 12,5$ ,  $CME = .054$ ,  $p < .005$ , mais il disparaît lorsque le Temps de Réaction de base est pris en considération comme covariant ( $F < 1$ ). Les enfants prématurés ont des scores moyens inférieurs (61% de réussite) à ceux des enfants tout-venant (86%). L'effet de rapport n'est pas significatif et n'interagit pas avec le groupe ( $F < 1$ ). Les performances varient peu en fonction des rapports : 77 %, 70 %, 73 % respectivement pour les rapports 1/2, 2/3, 3/4. Ceci vaut pour les deux groupes. Toutefois, les prématurés obtiennent des scores inférieurs aux tout-venant à chacun des rapports.

En résumé, pour les comparaisons indo-arabes, les performances des prématurés et des tout-venant ne diffèrent pas et varient peu en fonction des rapports. Ainsi, le caractère peu marqué de l'effet de rapport suggère que la mise en correspondance entre représentations analogique et indo-arabe n'est pas encore effective à 5 ans.

**Tableau 4-7.** Moyennes des bonnes réponses aux comparaisons de chiffres arabes.

<b>Arabe (36 items)</b>	<b>TV</b>	<b>P</b>	<b>Moyenne des deux populations</b>
Rapport 1/2	0,89	0,65	0,77
Rapport 2/3	0,86	0,54	0,70
Rapport 3/4	0,83	0,63	0,73
Moyenne de chaque population	0,86	0,61	0,73

### *Corrélations entre l'ensemble des épreuves*

Les corrélations pour les deux populations sont présentées dans le tableau 4-8. Pour les prématurés, on note une corrélation significative entre épreuves analogiques : les performances aux comparaisons de jetons sont corrélées avec celles aux comparaisons de surfaces,  $r = 0,78$  ;  $p < .04$ . Concernant la représentation symbolique, la corrélation entre performances aux comparaisons verbales et indo-arabes n'est pas significative,  $r = 0,26$  ;  $p = ns$ ). Pour les prématurés, le même mécanisme n'est pas à la base du traitement des comparaisons verbales et indo-arabes.

Plusieurs corrélations sont significatives entre performances aux épreuves analogiques et symboliques. Les bonnes réponses aux chiffres arabes sont corrélées avec celles aux cercles et aux jetons, respectivement,  $r = 0,93$  ;  $p < .001$ , et  $r = 0,80$  ;  $p < .04$ . Les bonnes réponses aux comparaisons verbales sont corrélées avec celles aux surfaces rectangles,  $r = 0,78$  ;  $p < .04$ . Concernant la représentation symbolique, selon le format de présentation, verbal ou indo-arabe, les prématurés se réfèrent soit au traitement des surfaces rectangles pour la dimension verbale, soit à celui des cercles et des jetons pour la dimension indo-arabe. Deux corrélations apparaissent entre caractéristiques cognitives et épreuves de comparaisons : le vocabulaire

avec les chiffres arabes,  $r = 0,78$  ;  $p < .04$ , et le comptage écrit avec les jetons,  $r = 0,79$  ;  $p < .04$ .

Pour les tout-venant, deux corrélations sont significatives entre les performances à l'épreuve de comparaisons de cercles et, d'une part, celles aux comparaisons verbales,  $r = 0,88$  ;  $p < .01$ , et, d'autre part, celles aux comparaisons indo-arabes,  $r = 0,78$  ;  $p < .04$ . De manière intéressante, on relève une corrélation - qui n'apparaît pas avec les prématurés - entre les deux comparaisons symboliques : les performances en verbal sont corrélées à celles aux chiffres arabes,  $r = 0,89$  ;  $p < .009$ . Avec les tout-venant, le traitement des numéraux oraux se fait en lien avec la dimension verbale, ce qui n'est pas le cas pour les prématurés.

**Tableau 4-8.** Corrélations entre les épreuves évaluant les caractéristiques cognitives et les épreuves de comparaisons pour les P et les TV. Les résultats pour les P figurent en clair en haut du tableau ; ceux des TV en grisé (vocab = vocabulaire ; chverb = chaîne verbale ; points = comptage de points ; collect = constitution de collections ; escrit = comptage en écriture arabe ; ECS II = raisonnement abstrait).

	vocab	chverb	points	collect	ecrit	ECSII	Cercles	Jetons	Surf.Rect	Verbal	arabe
vocab	1	0,291	-0,435	0,066	0,397	-0,016	0,641	0,682	0,476	0,105	,781*
chverb	.b	1	0,264	0,212	0,71	0,108	0,191	0,378	-0,009	-0,736	0,27
points	-0,316	.b	1	0,175	0,347	-0,252	-0,329	-0,12	-0,573	-0,693	-0,395
collect	0,111	.b	-0,204	1	,765*	0,576	0,688	0,677	0,649	0,158	0,578
ecrit	0,713	.b	-0,142	0,131	1	0,271	0,612	,790*	0,404	-0,351	0,609
ECSII	-0,238	.b	0,262	-0,08	-0,531	1	0,678	0,126	0,426	0,264	0,538
Cercles	0,487	.b	-0,162	0,088	0,691	0,089	1	0,716	0,738	0,335	,963**
Jetons	0,277	.b	-0,303	-0,743	0,4	-0,371	0,224	1	,781*	0,091	,799*
Surf.Rect	0,033	.b	0,05	-0,709	0,107	0,438	0,513	0,61	1	,781*	0,091
Verbal	0,589	.b	0,147	-0,18	0,642	0,227	,878**	0,288	0,635	1	0,256
arabe	0,717	.b	-0,137	-0,335	0,603	0,036	,779*	0,513	0,606	,886**	1

b. La variable Chaîne Verbale pour les TV est considérée comme une constante. Il n'y a donc pas de calcul.

## **B - Analyse des profils individuels**

Nous avons analysé les profils individuels des 7 prématurés (P) et des 7 tout-venant (TV) appariés. Pour chaque enfant, nous observerons d'abord les performances aux épreuves de caractéristiques cognitives et les bonnes réponses aux tâches de comparaisons ; nous analyserons ensuite le détail des performances selon la distance (cercles) ou le rapport (jetons, surfaces, numéraux oraux et chiffres arabes). Notre hypothèse prévoit que les performances aux épreuves analogiques (notamment cercles et jetons) seront supérieures ou égales aux épreuves nécessitant le recours aux représentations symboliques (soit  $A \geq S_v \geq S_a$ ). Nous aborderons d'abord les profils pour chacune des épreuves avant d'analyser les résultats lorsque la distance et le rapport sont (I) les plus larges et (II) les plus étroits.

### **1. Profil des réussites aux différentes épreuves**

La comparaison du nombre de réussites des deux groupes sur l'ensemble des épreuves (tableau 4-9) fait apparaître que les performances des prématurés sont largement inférieures à celles des tout-venant : les premiers obtiennent seulement 7 réussites sur l'ensemble des comparaisons alors que les tout-venant en obtiennent 28 (dont 3 dans toutes les conditions).

Le nombre d'enfants atteignant le seuil de réussite (75%) varie d'une épreuve à l'autre. Aux épreuves analogiques, 6 (aux cercles) et 5 (aux jetons) tout-venant sur 7 obtiennent des performances supérieures au seuil alors que seulement 2 prématurés parviennent à ce niveau. Ces résultats suggèrent un possible déficit de la représentation analogique chez les prématurés.

Concernant la représentation verbale, aucun prématuré ne réussit cette épreuve alors que 6 tout-venant parviennent au seuil de réussite. Tous les enfants tout-venant obtiennent des scores supérieurs au seuil aux comparaisons de chiffres présentés sous format arabe alors que



seuls 2 enfants prématurés y parviennent. Enfin, l'épreuve des surfaces rectangles est la plus échouée chez les tout-venant (4 réussites sur 7) et chez les prématurés, seul un enfant réussit.

La hiérarchie des performances diffère en fonction de la condition de naissance : pour les prématurés, cercles, jetons et chiffres arabes sont réussis par deux enfants (29%), les surfaces par un enfant (14 %) et aucune réussite n'apparaît pour le verbal. Pour les tout-venant, tous les enfants réussissent avec les chiffres arabes, 6 (86 %) réussissent aux cercles et aux comparaisons verbales, 5 (71 %) aux jetons et 4 (57 %) aux surfaces rectangles.

Nous avons fait l'hypothèse que la représentation symbolique viendrait se « greffer » sur la représentation analogique sans pouvoir la dépasser et qu'au sein de la représentation symbolique, la dimension verbale générerait de meilleures performances que le code indo-arabe (soit  $A \geq Sv \geq Sa$ ). Le constat que, dans notre échantillon, les enfants tout-venant réussissent mieux avec le code arabe qu'avec le code verbal vient questionner notre hypothèse. De même, on note l'échec inattendu à la comparaison de cercles chez TV1 ou à la comparaison de jetons chez TV7. Chez les prématurés, certains profils montrent des incohérences avec nos prédictions. P5 échoue à toutes les tâches analogiques et aux comparaisons verbales, mais réussit, de manière inattendue, aux comparaisons indo-arabes. P7 réussit avec toutes les comparaisons analogiques, échoue aux comparaisons de numéraux oraux et réussit avec les chiffres arabes : les caractéristiques de P7 sont intéressantes dans la mesure où cet enfant qui réussit dans 4 épreuves sur 5 est aussi celui qui, chez les prématurés, a le meilleur niveau de vocabulaire, connaît le mieux la chaîne verbale et va « le plus loin » dans le comptage écrit.

**Tableau 4-9.** Caractéristiques cognitives et profils des réussites aux différentes épreuves de comparaisons (sur 36 par condition) pour les P et les TV (en grisé). Pour les profils aux comparaisons, la réussite est notée 1. Elle est considérée comme effective lorsque le score a atteint 27 (soit 75%) sur 36.

id	Caractéristiques cognitives						Comparaisons				
	vocab	chverb	points	collect	ecrit	ECSII	Cercles	Jetons	Surf.	Verbal	Arabe
P1	6	15	4	4	5	12	0	0	0	0	0
P2	6	9	2	4	3	16	0	0	0	0	0
P3	8	5	1	2	0	10	0	0	0	0	0
P4	9	15	3	2	3	11	0	0	0	0	0
P5	10	9	2	4	4	16	0	0	0	0	1
P6	10	9	3	4	5	10	1	1	0	0	0
P7	12	18	1	4	6	14	1	1	1	0	1
TV1	5	20	5	5	4	13	0	1	0	0	1
TV2	7	20	4	4	0	12	1	0	0	1	1
TV3	9	20	5	2	6	12	1	1	0	1	1
TV4	10	20	1	4	6	12	1	1	1	1	1
TV5	13	20	4	5	11	10	1	1	1	1	1
TV6	11	20	4	5	4	15	1	1	1	1	1
TV7	9	20	5	3	4	15	1	0	1	1	1

## 2. Profils individuels à chacune des épreuves en fonction des distances (0,5 cm, 1 cm et 1,5 cm) ou des rapports (1/2, 2/3 et 3/4).

L'examen détaillé des profils montre le décalage existant entre les groupes, quant au nombre de participants atteignant le seuil de réussite, en fonction des trois distances et des trois rapports. Dans cette configuration, seul un enfant, TV4, est en réussite dans les 15 situations de comparaisons. Le meilleur prématuré, P7, obtient 12 réussites : de manière intéressante, il est en échec avec les rapports 2/3 et 3/4 en verbal et 2/3 avec les chiffres arabes.

Concernant les comparaisons de cercles, la distance la plus grande (1,5 cm) est la mieux réussie par 4 prématurés (57 %) et 6 tout-venant (86 %). Avec la distance médiane (1 cm), le nombre des réussites chute pour les P (3) et reste stable pour les TV. Avec la distance la plus réduite (0,5 cm), 3 prématurés franchissent le seuil de réussite, avec néanmoins un

résultat inattendu celui de P4 qui avait échoué avec les deux distances les plus larges ; les TV ne sont plus que 4 à réussir dans cette condition.

Avec les comparaisons de jetons, tous les enfants, P et TV, réussissent avec le rapport 1/2. Le nombre de réussites chute de manière marquée pour les prématurés avec le rapport 2/3 : ils ne sont que 2 (29 %) à atteindre le seuil alors qu'aucun tout-venant n'est en échec. Les 2 prématurés qui avaient réussi avec 2/3 font de même avec 3/4 ; avec ce rapport plus étroit, les tout-venant sont 3 à réussir.

Avec les comparaisons de surfaces, 4 prématurés (57 %) réussissent avec le rapport 1/2 auquel aucun tout-venant n'échoue. Avec le rapport 2/3, le nombre de réussites chute dans les deux groupes : 2 prématurés et 4 tout-venant. Avec le rapport 3/4, ils ne sont plus qu'un prématuré et deux tout-venant à réussir.

Les profils aux épreuves analogiques montrent que le nombre des participants qui franchissent le seuil de réussite diminue avec l'étroitesse de la distance ou du rapport quel que soit le groupe - ce qui est un résultat attendu. A l'exception de la réussite paradoxale de P4 avec la distance 0,5 aux comparaisons de cercles, tous les résultats sont cohérents : les enfants discriminent mieux lorsque le rapport s'éloigne de « 1 ».

Avec les comparaisons verbales, 5 prématurés (71 %) et l'ensemble des tout-venant réussissent avec le rapport 1/2. Avec le rapport 2/3, la chute des performances est plus importante pour les prématurés que pour les tout-venant : seuls 2 P (29 %) réussissent contre 6 TV (86 %) ; on note que P3 réussit avec ce rapport 2/3 alors qu'il avait échoué avec 1/2. Avec le rapport 3/4, tous les prématurés sont en échec alors que les 6 mêmes tout-venant réussissent.

Avec les comparaisons en chiffres arabes, 3 prématurés (43 %) et 6 tout-venant (86 %) franchissent le seuil de réussite avec le rapport 1/2. Seuls 2 prématurés (29 %) réussissent avec les rapports 2/3 et 3/4 ; la performance de P6 est paradoxale puisqu'il réussit 2/3 après

avoir échoué à 1/2. Pour les rapports 2/4 et 3/4, les tout-venant franchissent tous le seuil de réussite.

Les profils aux épreuves symboliques diffèrent de ceux observés aux épreuves analogiques. Avec la représentation verbale, l'écart est important entre prématurés et tout-venant lorsque le rapport se rapproche de « 1 ». Alors que les TV se montrent précis pour les comparaisons avec le rapport 3/4, tous les prématurés échouent. Les tout-venant sont aussi plus habiles avec le code indo-arabe que les prématurés. Tout comme le code verbal, il permet aux TV une amélioration des performances quand le rapport se rapproche de « 1 », comparativement aux comparaisons analogiques.

**Tableau 4-10.** Récapitulatif des profils individuels pour les P et les TV (en grisé) aux comparaisons selon les 3 distances (1,5 ; 1,0 et 0,5 cm) ou les rapports (1/2 ; 2/3 et 3/4) pour chacune des épreuves de comparaisons. La réussite est notée 1. Elle est considérée comme effective lorsque le score atteint 9 (soit 75%) sur 12 .

	Cercles			Jetons			Surf.Rect			Verbal			Arabe		
	1,5	1,0	0,5	1/2	2/3	3/4	1/2	2/3	3/4	1/2	2/3	3/4	1/2	2/3	3/4
<b>P1</b>	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0
<b>P2</b>	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0
<b>P3</b>	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
<b>P4</b>	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>P5</b>	1	1	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1
<b>P6</b>	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0
<b>P7</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	0	1
<b>TV1</b>	0	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1
<b>TV2</b>	1	1	0	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1
<b>TV3</b>	1	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1
<b>TV4</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>TV5</b>	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
<b>TV6</b>	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
<b>TV7</b>	1	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1

### **IV - 3 - Discussion**

Dans notre investigation du modèle du triple code, nous avons choisi de travailler avec des enfants prématurés. La prématurité est susceptible de s'accompagner de déficiences plus ou moins sévères et de troubles du développement cognitif. L'incidence de la prématurité a été mise en évidence sur le fonctionnement intellectuel et le langage. Les enfants prématurés sont plus exposés que les enfants tout-venant à être en retard dans les apprentissages, notamment en arithmétique (Ross, Lipper & Auld, 1991). Afin d'observer les incidences de la prématurité sur les représentations analogique et symbolique, nous avons apparié des enfants prématurés de 5 ans à des tout-venant de même âge, sexe, performances en vocabulaire et à l'ECS II.

Nous avons soumis l'ensemble des participants aux épreuves de comparaisons destinées à évaluer les performances aux différentes dimensions du modèle du triple code pour déterminer dans quelle mesure une ou plusieurs représentations étaient déficitaires. Nous voulons étudier l'articulation du symbolique sur l'analogique et attendons une vérification de l'hypothèse Analogique  $\geq$  Symbolique verbal  $\geq$  Symbolique arabe.

Concernant l'épreuve de comparaison des cercles, les deux groupes ne présentent pas de différences significatives. Comme les enfants tout-venant, les enfants prématurés sont sensibles aux différences entre les cercles : les performances diminuent lorsque la taille des cercles se rapproche. Cette sensibilité à l'analogique est attendue et correspond aux données de la littérature (Moyer & Landauer, 1967).

Aux épreuves analogiques de comparaisons de quantités discrètes (jetons et surfaces), la différence entre les groupes n'est pas significative lorsque les Temps de Réaction de base sont mis en covariant. Les participants des deux groupes montrent une sensibilité aux différences numériques entre les collections. Néanmoins, l'examen des profils individuels fait apparaître que, dans les deux épreuves, les enfants tout-venant sont plus nombreux à atteindre

le taux de 75% de réussite que les prématurés. D'autre part, si les deux groupes ne se différencient pas lorsque le rapport se rapproche de « 1 », les tout-venant sont plus précis lorsque les rapports s'éloignent de « 1 ». Il est possible que la faiblesse dans les performances et la lenteur dans les latences constatées avec les prématurés dans la représentation analogique des quantités discrètes tiennent à un déficit général de la représentation analogique en rapport avec des difficultés attentionnelles et visuo-perceptives.

Concernant la représentation verbale, on observe un décalage important entre les performances des prématurés et des tout-venant. Cette faiblesse de la représentation verbale était perceptible avec les épreuves initiales d'évaluation cognitive pour lesquelles une différence significative en faveur des tout-venant apparaît dans l'énonciation de la chaîne verbale et le comptage de points. Ce déficit est aussi perceptible dans les profils individuels : aucun enfant prématuré n'atteint le seuil de 75% de réussite à l'épreuve verbale (contre 6 enfants tout-venant) ; lorsque la distance ou le rapport sont les plus grands, 3 prématurés (contre aucun TV) sont encore en dessous du seuil ; avec la distance et les rapports les plus faibles, aucun prématuré (contre 6 TV) ne réussit. Alors que les enfants tout-venant peuvent utiliser le code verbal pour comparer de manière précise les quantités, ce n'est pas le cas des prématurés. Au-delà des spécificités inhérentes au système numérique verbal français (voir notre partie théorique), spécificités auxquelles sont confrontés l'ensemble des enfants, les faiblesses de la représentation verbale touchant les prématurés peuvent être mises en relation avec les difficultés langagières en rapport avec la prématurité, rapportées dans la littérature (e.g., Jansson-Verkasalo et al., 2004).

Avec le code indo-arabe, même si les prématurés réussissent moins bien les comparaisons que les tout-venant, l'effet de groupe n'est pas présent. De la même manière, on ne note pas d'effet de rapport pour les deux groupes. Ces résultats vont dans le sens attendu dans la mesure où ils attestent que la dimension indo-arabe, dépendante en grande partie d'un

enseignement formel qui n'est pas encore dispensé en GSM, n'a pu se « greffer » sur la représentation analogique. A l'examen des profils individuels, il apparaît des différences entre prématurés et tout-venant. Malgré l'absence (ou plutôt un temps limité) d'enseignement formel, les enfants tout-venant utilisent le code indo-arabe de manière plus précoce et efficace que leurs pairs prématurés. Lorsque les profils portent sur la totalité des 36 items, seuls 2 prématurés (vs les 7 tout-venant) franchissent le seuil de réussite. Avec la distance et le rapport le plus proche de « 1 », la répartition est identique. Lorsque le rapport se rapproche de « 1 », les tout-venant ne perdent pas de précision dans les comparaisons avec le code indo-arabe contrairement aux prématurés. Comme avec le code verbal, des différences massives apparaissent entre prématurés et tout-venant concernant le traitement des quantités avec la représentation symbolique. L'analyse des corrélations montre que, pour les prématurés et les tout-venant, les traitements symboliques ne se font pas en lien avec les mêmes dimensions analogiques : les performances aux comparaisons verbales et aux comparaisons indo-arabes des prématurés sont liées à celles des comparaisons de surfaces pour les premières et aux comparaisons de cercles et de jetons pour les secondes. De plus, on ne note pas de corrélation entre les deux épreuves symboliques chez les prématurés. Ce patron est différent pour les tout-venant : les deux comparaisons symboliques sont, d'une part, corrélées à la seule épreuve des cercles, et, d'autre part, très corrélées entre elles. Ce double constat va dans le sens d'un « détachement » progressif des codes symboliques par rapport à la dimension analogique.

Une des questions abordées dans la littérature est celle de la relation entre représentation verbale et représentation indo-arabe (pour une revue, voir Fayol et al., 2004). Un passage systématique par la représentation verbale est-il nécessaire au développement de la représentation indo-arabe ? Comme nous l'avons précédemment avancé, nos résultats étayeraient plutôt l'idée d'une indépendance possible entre les deux représentations. D'autant que le profil de P5 plaide pour une dissociation entre les deux représentations : P5 réussit avec

les trois rapports aux comparaisons en chiffres arabes et seulement avec le rapport 1/2 aux comparaisons verbales.

En conclusion, avec les deux populations, nous avons cherché (I) à évaluer la sensibilité à la différence numérique en évaluant l'impact de l'effet de rapport et (II) à vérifier l'hypothèse d'une hiérarchie où l'analogique serait prédominant sur le symbolique. Concernant la représentation analogique, les enfants prématurés sont, dans l'ensemble, moins précis et plus lents que les tout-venant, mais ils manifestent une sensibilité à la distance et aux rapports conforme aux attentes. La représentation symbolique verbale est, par contre, particulièrement affectée chez les prématurés. Alors que les tout-venant de 5 ans connaissent la chaîne verbale et sont efficaces dans les comparaisons de numéraux oraux, les prématurés du même âge sont en retard. Comme attendu, la représentation indo-arabe n'est pas suffisamment automatisée pour permettre une articulation avec l'analogique perceptible par un effet de rapport. Chez les enfants prématurés, on constate donc une faiblesse de la représentation analogique mais, surtout, un déficit de la représentation symbolique. L'examen des corrélations montre que les prématurés et les tout-venant ne traitent pas les codes symboliques en référence aux mêmes épreuves analogiques. Par rapport à notre hypothèse,  $A \geq Sv \geq Sa$ , des profils particuliers de réussite avec la dimension symbolique montrent que, pour certains enfants, la hiérarchie n'est pas respectée : ils réussissent mieux avec la représentation arabe qu'avec la représentation verbale, ce qui laisse supposer une possible indépendance entre les deux représentations.

Nous avons observé avec les prématurés que lorsque la dimension verbale était affectée, la représentation du nombre était déficitaire non seulement sur la dimension symbolique mais, également, sur la dimension analogique. Avec une nouvelle population constituée d'enfants trisomiques, nous allons maintenant chercher à évaluer à nouveau les



relations entre représentation analogique et représentations symboliques et, de plus, à intervenir sur la représentation verbale en évaluant les éventuels effets d'une telle intervention. Ces effets seront analysés par leur impact sur les performances de ces enfants en arithmétique.

## **CHAPITRE V - EXPERIENCE 5 - Traitement du nombre et syndrome de**

### **Down.**

Avec cette nouvelle expérience, nous allons tester, d'une part, à nouveau, l'existence d'une dissociation entre représentations analogiques et représentations symboliques et, d'autre part, l'impact d'une intervention améliorant le langage associé à la numération élémentaire et au dénombrement sur les performances aux épreuves de comparaisons symboliques (verbales et indo-arabes) et, possiblement, de comparaisons des représentations analogiques. La population des enfants présentant un syndrome de Down est particulièrement bien adaptée à ces objectifs. Premièrement, les données de la littérature (voir ci-dessous Chapman & Hesketh, 2000 ; Comblain & Thibaut, 2009 ; Paterson, 2001) attestent que les Downs, une fois passée la période de « l'infance », ne présentent pas de déficit de la représentation analogique alors qu'ils manifestent un retard important dans l'utilisation des systèmes symboliques, notamment le langage oral. Deuxièmement, cette faiblesse verbale peut être améliorée par des interventions directes, permettant éventuellement d'observer la mise en relation entre les caractéristiques de la représentation analogique et la représentation verbale. Troisièmement, l'amélioration des performances verbales pourrait se traduire par celle des comparaisons analogiques, un résultat qui irait à l'encontre de la conception classique du triple code.

Afin d'étudier les effets de cette intervention, nous avons élaboré un dispositif expérimental spécifique destiné à tester, dans un premier temps, la stabilité des (faibles) performances de la population des Downs (tests T1 puis T2) en l'absence de toute intervention ciblée sur le langage puis, dans un deuxième temps, les améliorations de performances associées à l'introduction d'activités sollicitant le langage et le dénombrement

(test T3). Avec notre dispositif expérimental, nous avons ainsi soumis à trois reprises 14 enfants atteints de trisomie 21 ou syndrome de Down (SD).

Notre étude repose sur l'idée qu'un déficit dans le traitement du nombre pourrait être consécutif à une faiblesse de la représentation verbale. Cela a pu être constaté dans l'étude précédente avec les prématurés (Chapitre IV). Une telle intervention pourrait permettre d'améliorer certaines habiletés numériques, notamment celles qui sont associées aux noms de nombres. Notre hypothèse est qu'une stimulation centrée sur la dimension symbolique verbale peut induire chez l'enfant trisomique une amélioration des performances mobilisant les représentations symboliques. Par ailleurs, nous n'écartons pas a priori la possibilité d'un impact indirect sur les traitements de la représentation analogique, qui resterait à expliquer .

Avant d'aborder la méthode et les résultats de notre étude, nous présentons certaines caractéristiques des enfants SD. Le syndrome de Down (du nom du médecin anglais qui, en 1866, a décrit cette pathologie) est une anomalie génétique touchant le chromosome 21. Selon Comblain & Thibaut (2009), la prévalence de cette pathologie dans les pays occidentalisés est de 1/1500 naissances. Trois formes de trisomie ont été mises en évidence :

- La forme standard, présente dans 95 % des cas, lorsque toutes les cellules de l'embryon ont un chromosome supplémentaire ;
- La forme mosaïque, environ 2 % des cas, lorsque deux types de cellules coexistent chez la personne - i.e., avec ou sans trisomie ;
- La dernière forme, environ 3 % des cas, résulte de la translocation d'une partie du chromosome 21 sur un autre chromosome.

Chapman et Hesketh (2000) relèvent que cette pathologie chromosomique produit des effets sur le développement du cerveau du fœtus, effets dont l'incidence va se faire sentir durant toute la vie de l'individu. Ces auteurs ont établi un tableau récapitulatif des caractéristiques cognitives et comportementales. Pour la période qui nous intéresse plus

particulièrement (de 4 à 12 ans), les enfants trisomiques présentent un déficit de la mémoire à court terme, des troubles de la parole et un retard du langage, en compréhension mais surtout en expression.

Pour Comblain et al. (2009), le développement lexical et conceptuel des enfants trisomiques est plus ralenti que celui des enfants non trisomiques mais il suit le même décours. Concernant le développement cognitif, ces deux auteurs notent une grande variabilité inter-individuelle avec un QI moyen de 40-45 (retard mental léger). Il n'en demeure pas moins que les personnes atteintes du syndrome de Down peuvent, à un rythme plus lent que la moyenne, effectuer des apprentissages scolaires en lecture et en arithmétique.

Afin d'étudier le langage et les habiletés numériques dans le syndrome de Down, Paterson (2001) a mené deux études avec des enfants et des adultes présentant des syndromes de Down (SD) ou de Williams (SW). Cette chercheuse a choisi ces pathologies à cause de leurs caractéristiques cognitives distinctes : le syndrome de Williams s'accompagne d'un retard mental et, à l'âge adulte, d'une préservation des habiletés lexicales et d'un déficit dans le domaine du nombre. Nous nous intéresserons plus particulièrement à l'étude 2 qu'elle a consacré à la numérosité. Dans la 1<sup>ière</sup> partie de cette seconde étude, Paterson a apparié 22 SD et 13 SW âgés de 30 mois avec des enfants normaux : l'appariement s'est fait sur l'âge chronologique et sur l'âge mental. Elle a habitué les participants à des cartes comportant 2 objets. Puis, lors de la phase test, elle leur a montré des cartes de soit 2 soit 3 objets afin d'observer la réaction au changement de numérosité. Les résultats révèlent que les SW sont sensibles à la nouveauté numérique de la même manière que leurs pairs de même âge chronologique et mental mais cet effet n'est pas présent chez les SD qui ne regardent pas plus longtemps la nouvelle quantité. Durant la prime enfance, les deux groupes se comportent donc différemment face à une tâche de discrimination de quantités.

L'un des objectifs de Paterson était d'investiguer les différences de trajectoires de développement des SD et des SW. Elle a donc recueilli aussi des données auprès d'adultes SW et SD. Les participants devaient choisir de deux collections celle qui comportait le plus de points. Une différence apparaissait entre les groupes : l'effet de distance existait chez les adultes SD, mais non chez les adultes SW. L'auteur suggère que, malgré un retard important, la compréhension du sens du nombre va se développer chez les SD, et sera attesté, au cours du développement, par la capacité de discriminer des numérosités et l'émergence de l'effet de distance.

Nye, Fluck et Buckley (2001) ont étudié le comptage et la compréhension de la cardinalité chez des enfants SD. Ils ont apparié des enfants trisomiques (de 3 ans 1/2 à 7 ans) avec des tout-venant (de 2 à 4 ans) suivant un critère d'âge mental non verbal (test d'intelligence non verbale de Leiter). Ces chercheurs ont proposé aux enfants des tâches d'évaluation de la chaîne verbale (l'enfant devait compter en accompagnant le pointage d'étoiles effectué par une marionnette), de dénombrement d'ensembles de jouets et des constitutions de collections. Ils ont aussi testé si l'aide d'un adulte améliorerait les performances des enfants des deux populations. Leurs résultats montrent des différences significatives entre les enfants trisomiques et leurs pairs : les performances de ces derniers sont meilleures en production de la chaîne verbale ou en comptage d'objets. La compréhension de la cardinalité présente un patron de réponse similaire quel que soit le groupe : la cardinalité est comprise par à peu près un tiers des enfants de chaque groupe. L'aide de l'adulte améliore également la performance pour les deux groupes d'enfants. Ainsi, l'enfant trisomique est capable d'apprentissage dans le domaine numérique et le soutien de l'adulte lui est bénéfique.

Notre dernière expérimentation se situe, elle aussi, dans le cadre du modèle du triple code. Nous testons les participants sur leurs connaissances numériques et nous les soumettons

à des épreuves de comparaisons analogiques et symboliques. Tous sont évalués à trois reprises : une évaluation initiale (T1), une 2<sup>ème</sup> passation (T2) 7 semaines plus tard pour observer, en l'absence d'intervention ciblée, les acquisitions des enfants ; une 3<sup>ème</sup> passation (T3) après 6 semaines d'entraînement. Nous prédisons une absence d'amélioration significative des performances arithmétiques entre T1 et T2 car, durant cette période, les enfants ne reçoivent pas d'entraînement spécifique sur la représentation verbale. Par contre, nous prédisons en T3 des progrès, dans le domaine numérique, consécutifs à l'entraînement proposé : nous attendons une amélioration des performances avec la représentation verbale et vraisemblablement sur la représentation arabe ; nous n'éliminons pas la possibilité d'un impact sur la représentation analogique qui poserait la question des caractéristiques de la représentation analogique et de ses liens avec les représentations symboliques.

Comme dans les recherches précédentes, nous testerons la présence d'un effet de rapport « signant » le traitement cognitif des quantités. Cet effet devrait être présent en T1 et T2, chez les SD, au niveau analogique mais sans doute pas au niveau symbolique (les performances à T1 et T2 seront présentées ensemble du fait de quasi-équivalence). Notre hypothèse repose sur la prédominance de l'analogique sur le symbolique verbal et le symbolique arabe ( $A \geq Sv \geq Sa$ ). Nous la testerons sur les performances de groupe et sur les profils individuels. Nous prédisons que les effets de l'entraînement au comptage et au dénombrement auront un impact significatif sur les performances dans le domaine numérique et dans les épreuves de comparaisons verbales et indo-arabes en T3, moins sûrement sur la représentation analogique.

## **V- 1 - Méthode**

### ***Participants :***

L'échantillon d'enfants est issu de deux classes intégrées d'enfants trisomiques, l'une située à St Etienne (42), l'autre à Gleizé (69). Compte tenu des problèmes de comportement et

de compréhension, 7 enfants de chaque classe ont été testés. soit au total 14 enfants (dont 12 filles). De grandes disparités d'âges apparaissent : de 88 mois à 156 mois en T1 (la moyenne d'âge est de 127 mois). La population étudiée est très diverse : elle présente des variantes de capacités intellectuelles et de milieux socioculturels. Il était difficile dans ces conditions de constituer un groupe parfaitement homogène. Le critère commun est la trisomie 21.

### ***Procédure et matériel***

Afin de tester l'éventuel impact de l'amélioration de la représentation verbale sur l'évaluation des quantités, nous avons conçu un dispositif en trois étapes :

1. T1: une première passation a permis d'évaluer les performances dans le domaine numérique ; les comparaisons de quantités, présentées sous divers formats, ont testé les représentations analogiques et symboliques.
2. T2: après 7 semaines, la deuxième passation a repris les mêmes épreuves pour évaluer la stabilité des performances.
3. T3: 6 semaines après T2, après un travail systématique portant sur la comptine numérique, le dénombrement, la constitution de collections, une 3<sup>ème</sup> passation a été effectuée.

Le protocole comporte une série d'épreuves présentées individuellement à chaque enfant. Il s'agit de l'adaptation du protocole informatisé utilisé lors des études précédentes. Cependant, il a semblé préférable de ne pas utiliser l'ordinateur avec des enfants trisomiques afin de ne pas risquer d'influer sur leurs performances.

Compte tenu des difficultés d'attention des enfants trisomiques, le protocole a été divisé en trois parties. La passation a eu lieu dans une même journée, pour disposer d'un temps de concentration adéquat :

- Contrôle du niveau de connaissances numériques (chaîne numérique, dénombrement, collections) et épreuves de comparaisons de quantités continues (réglettes, cercles) ;
- Comparaison de quantités discontinues (billes, surfaces) ;
- Comparaison de quantités présentées sous formes symboliques (numéraux oraux, chiffres arabes).

Deux types d'épreuves étaient proposées aux enfants : d'une part, des épreuves de contrôle du niveau de connaissances numériques ; d'autre part, des épreuves de comparaisons. A l'exception de quelques modifications, les épreuves ont été présentées au chapitre II.

↳ Les épreuves de contrôle du niveau de connaissances numériques visaient à évaluer les compétences des enfants en arithmétique et la façon dont ils se servent du nombre :

- Enonciation de la chaîne verbale : l'enfant doit montrer jusqu'où il sait compter. Le plafond est fixé à 20.

- Ecriture des chiffres arabes : l'enfant a pour consigne d'écrire les chiffres aussi loin qu'il peut. L'item plafond est 20.

- Constitution de collections : 4 collections sont à constituer (2, 4, 6 et 9 jetons), la première servant toujours d'exemple. La cotation est d'un point par collection correctement réalisée. La note maximale est donc 3.

- Dénombrement : cette épreuve comporte quatre planches de 3, 7, 12 et 18 points. La première constitue l'exemple. Pour les trois autres planches, l'enfant se voit attribuer un point pour chaque dénombrement correct. La note maximale est 3.

↳ Pour l'ensemble des épreuves suivantes, il s'agissait de comparer deux entités, l'une située à droite et l'autre à gauche sur une feuille de format A4 plastifiée. L'enfant doit pointer



l'entité la plus grande. Dès qu'il a répondu, l'examineur tourne la page et une nouvelle comparaison apparaît. Pour chaque épreuve, les premières comparaisons servent d'exemple. La moitié des comparaisons est présentée dans la configuration petit/grand et l'autre moitié dans la configuration inverse.

Les épreuves suivantes ont été précisément décrites au chapitre I :

- Comparaisons de réglettes.

L'enfant doit comparer des paires de réglettes de longueurs différentes. Cette épreuve vise à contrôler que l'enfant comprend bien les notions de « plus grand » et « plus petit ». Cette épreuve sert de contrôle, c'est-à-dire que si l'enfant ne répond pas différemment du hasard, il ne sera pas pris en compte pour la suite des épreuves.

- Comparaisons de cercles.

Cette épreuve vise à comparer deux à deux des cercles de surfaces différentes. La différence de surface correspond à trois tailles de diamètre s'échelonnant de 4,5 à 8 cm : ces diamètres peuvent différer de 0.5 cm (distance 1), de 1 cm (distance 2) ou de 1.5 cm (distance 3). La note maximale est 36.

Les comparaisons suivantes proposent de discriminer des quantités numériques. Elles mettent en jeu deux personnages fictionnels. Cependant, pour que l'enfant ne se fixe pas sur l'image des personnages, mais sur les quantités à comparer, ils sont simplement évoqués. L'enfant doit montrer qui en a le plus. La dimension analogique est testée à travers les épreuves de billes et de surfaces ; la dimension symbolique à travers les comparaisons de numéraux oraux et de chiffres arabes.

Chaque épreuve est constituée de 30 comparaisons (15 paires présentées 2 fois : une fois dans l'ordre petit/grand et une fois dans l'ordre inverse). Les 6 premiers items ( paires : « 3 vs 8 », « 2 vs 9 » et « 3 vs 10 ») servent d'exemples. Les 12 paires prises en compte dans

les analyses varient selon les rapports  $1/2$ ,  $2/3$  et  $3/4$  (e.g.,  $2/3$  pour 4 vs 6) et les distances de 1 à 4 (e.g., 4 pour 4 vs 8). Donc, l'enfant est noté sur 24. L'ordre aléatoire de présentation des comparaisons est identique quelle que soit la tâche.

**Tableau 5.1.** Récapitulatif des 12 items de comparaisons en fonction du rapport et de la distance. Chaque item est traité deux fois, une fois dans l'ordre petit/grand, une fois dans l'ordre grand/petit.

Rapport	<b>1/2</b> <b>(0,5)</b>	<b>2/3</b> <b>(0,66)</b>	<b>3/4</b> <b>(0,75)</b>
<b>Distance</b>			
<b>1</b>	1 vs 2	2 vs 3	3 vs 4
<b>2</b>	2 vs 4	4 vs 6	6 vs 8
<b>3</b>	3 vs 6	6 vs 9	9 vs 12
<b>4</b>	4 vs 8	8 vs 12	12 vs 16

Les épreuves de comparaisons de quantités sont les suivantes :

- Comparaisons d'ensembles de billes.

Les ensembles à comparer dans cette tâche sont des collections de points (représentant des billes). Sur la planche, les points (de 3 mm de diamètre) ou billes attribués à chaque enfant sont figurés dans des cercles, les points étant répartis aléatoirement dans chaque cercle. Le sujet doit pointer lequel des deux enfants en possède le plus sans les compter.

- Comparaisons de surfaces avec contrôle de la densité.

Chaque comparaison comprend deux cercles (représentant des gâteaux). Les cercles sont de dimension identique et sont découpés selon le nombre de parties correspondant à l'item. L'enfant doit décider lequel des deux personnages a le plus de parts de gâteau.

- Comparaisons avec des stimuli verbaux.

L'enfant a devant lui deux cercles représentant les assiettes des deux personnages. L'adulte attribue à chacun des personnages le nombre de billes correspondant à l'item en montrant chaque cercle. L'enfant doit alors pointer le cercle contenant le plus grand nombre de billes.

- Comparaisons en chiffres arabes.

La quantité de billes de chaque personnage est indiquée en chiffres arabes dans chacun des cercles. L'enfant doit pointer lequel en possède le plus.

Les épreuves que nous venons de présenter ont donc été passées à trois reprises (T1, T2 et T3) par chacun des participants. Après la 2<sup>ième</sup> évaluation, les enfants ont bénéficié d'une période d'entraînement. Pendant six semaines, à raison d'une journée par semaine, les participants ont été soumis à un entraînement spécifique à base d'activités ludiques en lien avec la représentation auditive verbale. Les séances se sont déroulées avec des groupes stables de 2 ou 3 enfants.

Les activités proposées étaient les suivantes :

- Enonciation de la chaîne numérique verbale. La chaîne numérique est récitée collectivement jusqu'à 20. Ensuite, chaque enfant, l'un après l'autre, fait de même. Chaque fois qu'une erreur survient, elle est corrigée. Cette activité est systématique au début de chaque séance.

- Constitution de collections. Les enfants disposent chacun d'une réserve de billes et d'une boîte vide. La consigne est de mettre le bon nombre de billes dans sa boîte en fonction de ce qui est demandé. Une fois la collection réalisée, un autre enfant est chargé de vérifier l'exactitude de la collection.

- Dénombrement de collections. Il s'agit de reconstituer un train dont chaque wagon correspond à une planche de format A5. Sur chaque planche, des quantités de points (de 1 à 20) sont dessinées. Un train doit être reconstitué en rangeant les wagons dans l'ordre croissant du nombre de points.

- Dénombrement de collections présentées sous des configurations diverses. Sur des feuilles de format A5 sont collées de 1 à 20 gommettes. Les gommettes sont disposées soit de façon organisée, soit aléatoire. Les gommettes varient selon 4 formes différentes : ronds, étoiles, triangles ou carrés. Pour chacune des 4 formes, le nombre de gommettes va de 1 à 20. Il y a donc quatre planches pour chaque cardinalité (soit 80 planches). Chaque enfant reçoit six planches et les dispose devant lui. L'expérimentateur retourne une planche de la pioche. Un des enfants compte le nombre d'éléments et les joueurs doivent chercher s'ils possèdent une planche ayant le même nombre. Les enfants qui parviennent à trouver une carte identique se voient attribuer un jeton. A la fin du jeu, celui qui possède le plus de jetons a gagné.

- Cartes à appairer : Un jeu de cartes a été élaboré. Il est constitué de 20 paires de cartes, c'est-à-dire de cartes sur lesquelles une même quantité (de 1 à 20) est représentée. Les cartes constituant une paire de même numérosité sont différentes, l'enfant ne pouvait se fier ni à la couleur ni à la forme des éléments ni à la disposition. Les enfants doivent regrouper par paire des cartes comportant de 1 à 20 objets différents en prenant en compte le seul critère numérique. L'utilisation de ces cartes a été déclinée au cours des séances soit sous forme de jeu de type Memory, soit sous forme de jeu des familles (demander à un autre joueur la carte qui permettra de constituer une paire ayant le même nombre).

- Dominos. Des dominos sont présentés aux enfants : certains comportent d'un côté une constellation de points (de 1 à 20) et de l'autre un chiffre arabe ; les autres ont deux constellations de points. Six dominos sont distribués à chaque enfant et un domino est disposé au centre de la table pour constituer le point de départ.

- Jeu Nathan. Le jeu consiste à mettre autant de jetons que ce qui est représenté sur des planches (animaux, points, chiffres arabes). L'enfant doit compter sur la carte et disposer dans le compartiment prévu à cet effet le même nombre de jetons. Les jetons sont d'une taille suffisamment importante pour que l'enfant ne puisse pas, s'il met sa carte sur la table, opérer par correspondance terme à terme. Il lui est donc nécessaire de dénombrer.

- Les boîtes alignées. (Activité inspirée du jeu du même nom élaboré par le groupe de recherche pédagogique Ermel). Six boîtes contenant de 1 à 6 jetons sont alignées mais non ordonnées. Chaque joueur possède un dé et joue à tour de rôle. Le premier joueur lance son dé, compte le nombre de points représentés sur le dé et cherche la boîte contenant le même nombre de jetons. Au fur et à mesure de l'avancée du jeu, le nombre de boîtes restantes diminue. Les enfants sont amenés à compter avant de lancer le dé pour savoir quel nombre il faudrait qu'ils fassent.

## **V- 2 - Résultats**

Nous présentons les performances des SD aux trois différentes périodes de passation des épreuves : évaluation initiale (T1), évolution naturelle ou spontanée (T2) et après entraînement (T3). Nous analyserons particulièrement les résultats en T1 et T3 pour montrer la dynamique des acquisitions entre l'évaluation initiale et celle qui a suivi la phase d'entraînement. L'évaluation en T2 nous a permis de constater la stabilité des résultats lorsque aucune intervention spécifique n'est mise en place : les données pour T2 seront présentées dans les tableaux et nous résumerons les résultats. Pour les périodes T1 et T3, nous décrirons les performances aux épreuves de connaissances numériques de notre population et nous présenterons les corrélations entre ces épreuves. Nous effectuerons ensuite une ANOVA pour chacune des tâches de comparaisons de quantités (cercles, billes, surfaces, numéraux oraux et chiffres arabes) avant d'analyser globalement les variables. Nous établirons ensuite les corrélations en regroupant l'ensemble des épreuves de connaissances et de comparaisons.

Dans une dernière partie, nous mettrons en perspective les performances observées lors des 1<sup>ière</sup> et 3<sup>ième</sup> passations et nous présenterons les profils individuels aux périodes T1 et T3 de manière à observer les évolutions de chaque participant.

### **V - A - Analyses des performances en T1.**

Epreuve contrôle : comparaisons de réglettes. L'épreuve des réglettes permet de s'assurer que les enfants ne répondent pas au hasard et ont bien compris la consigne de choisir « le plus ». Aucun enfant n'a échoué, le taux de réussite est de 87,50 % ( $ET = 6,23$ ). Les scores s'échelonnent de 27 à 35 bonnes réponses (/36).

#### *Caractéristiques de la population en T1*

- Enonciation de la chaîne numérique verbale : les résultats s'échelonnent de 8 (un participant) à 20 (4 participants). La moyenne est 14,64 ( $ET = 4,05$ ).
- Ecriture des chiffres arabes : la chaîne numérique en chiffres arabes est brève ( $M = 5,86$  ;  $ET = 2,80$ ). Trois enfants se sont contentés de recopier les items d'amorce. Le maximum est « 10 » pour trois enfants, loin du maximum fixé à « 20 ».
- Constitution de collections : ( $M = 1,29$  ;  $ET = .99$ ), seuls deux enfants parviennent à réaliser les trois collections demandées. Trois enfants n'en réussissent aucune.
- Dénombrement : aucun enfant ne réussit les trois séries de points ( $M = .93$  ;  $ET = .73$ ). Trois parviennent à en dénombrer deux et quatre échouent aux trois planches (le plus petit nombre de points était 7).

Le tableau 5.4 récapitule l'ensemble des résultats pour les épreuves d'évaluation des connaissances numériques pour les passations en T1, T2 et T3.

### *Corrélations entre les épreuves d'évaluation des caractéristiques cognitives en T1*

La capacité à constituer des collections est corrélée avec, d'une part, la connaissance de la chaîne verbale,  $r = 0,715$  ;  $p = .004$ , et, d'autre part, l'empan d'écriture en chiffres arabes,  $r = 0,597$  ;  $p = .024$ .

**Tableau 5.2.** Corrélations entre les épreuves d'évaluation des connaissances numériques en T1 (en grisé) et T2.

	Chaîne verbale	Comptage écrit	Collections	Dénombrement
Chaîne verbale	1	0,51	0,387	0,477
Comptage écrit	0,369	1	0,421	0,327
Collections	,715*	,597*	1	,622*
Dénombrement	0,329	-0,269	0,242	1

### *Analyse des résultats pour chaque épreuve de comparaison en T1*

Nous présentons l'étude détaillée des résultats pour chacune des épreuves de comparaisons de quantités en T1. Nous commencerons par les comparaisons de cercles puis nous poursuivrons par les deux tâches avec une dimension analogique (billes et surfaces). Nous terminerons par les comparaisons symboliques (numéraux oraux et chiffres arabes). Pour chacune des épreuves de comparaisons numériques, une ANOVA à 3 (rapport : 1/2, 2/3 et 3/4) a été effectuée.

#### ● Quantités continues : comparaisons de cercles

Une ANOVA à 3 (distance « 1 (0,5 cm) », « 2(1 cm), » et « 3 (1,5 cm) ») facteurs avec mesures répétées montre un effet de la distance,  $F(2,26) = 3,38$ ,  $CME = 1,47$ ,  $p < .05$ . Les performances s'améliorent avec l'augmentation de la distance. Sur 12 réussites possibles, la moyenne est de 9,50 ( $ET = 1,51$ ) pour une distance de 0,5 cm, de 9,79 ( $ET = .89$ ) pour une distance de 1 cm et de 10,64 ( $ET = 1,87$ ) pour une distance de 1,5 cm. Les enfants de notre échantillon sont sensibles à la différence de taille des cercles à comparer.

## *Analyses des épreuves de comparaisons de quantités numériques en T1*

- Comparaisons d'ensembles de billes.

L'ANOVA à 3 (rapport : 1/2, 2/3 et 3/4) facteurs avec mesures répétées montre un effet significatif du rapport,  $F(2,26) = 5,80$ ,  $CME = .015$ ,  $p = .008$ . Les performances diminuent lorsque le rapport se rapproche de « 1 » : .75 ( $ET = .19$ ), .64 ( $ET = .15$ ) et .60 ( $ET = .12$ ) pour respectivement les rapports 1/2, 2/3 et 3/4.

- Comparaisons avec contrôle des surfaces.

L'ANOVA à 3 (rapport : 1/2, 2/3 et 3/4) facteurs avec mesures répétées montre un effet significatif du rapport,  $F(2,26) = 16,64$ ,  $CME = .015$ ,  $p < .001$ . Le pourcentage de réussite diminue lorsque le rapport se rapproche de « 1 » : .90 ( $ET = .11$ ), .75 ( $ET = .15$ ) et .64 ( $ET = .13$ ) pour, respectivement, les rapports 1/2, 2/3 et 3/4.

- Comparaisons présentées verbalement.

L'ANOVA à 3 (rapport : 1/2, 2/3 et 3/4) facteurs avec mesures répétées montre un effet de rapport tendanciel,  $F(2,26) = 3,18$ ,  $CME = .023$ ,  $p < .06$ . Les enfants sont moins sensibles au rapport pour cette épreuve symbolique que pour les épreuves analogiques précédentes. D'un point de vue descriptif, les performances sont meilleures lorsque le rapport est éloigné de « 1 », respectivement .65 ( $ET = .17$ ), .55 ( $ET = .14$ ) et .51 ( $ET = .15$ ) pour les rapports 1/2, 2/3 et 3/4.

- Comparaisons de quantités exprimées en chiffres arabes

L'effet de rapport n'est pas significatif ( $F < 1$ ). D'un point de vue descriptif, le rapport 1/2 est mieux réussi que les rapports 2/3 et 3/4, respectivement .54 ( $ET = .16$ ), .53 ( $ET = .21$ ) et .50 ( $ET = .24$ ). Le fait que l'effet de rapport n'apparaisse pas avec les SD n'est pas surprenant dans la mesure où l'acquisition du code indo-arabe est la plus tardive.



En résumé, nos participants manifestent, comme prévu, un effet de distance et un effet de rapport aux épreuves analogiques. Leur capacité de discrimination diminue lorsque la différence entre les cercles diminue et lorsque le rapport se rapproche de « 1 ». En revanche, l'effet de rapport n'est pas présent avec les codes symboliques, notamment avec le code indo-arabe.

### *Analyse de variance avec l'ensemble des variables en T1*

Nous avons effectué une analyse de variance avec 4 (tâches : billes, surfaces, verbal et chiffres arabes) x 3 (rapports : 1/2, 2/3 et 3/4) facteurs avec mesures répétées. Les résultats de l'ANOVA montrent un effet de la tâche et du rapport. On ne note pas d'interaction. Les performances varient selon la tâche,  $F(3,39) = 12,55$ ,  $CME = 0,037$ ,  $p < .001$ , avec un taux moyen de réussite de 68 % ( $ET = 12$ ), 79 % ( $ET = 8,69$ ), 61 % ( $ET = 10$ ) et 55 % ( $ET = 13$ ) pour, respectivement, les comparaisons de billes, de surfaces, de numéraux oraux et de chiffres arabes. Les comparaisons de surfaces sont significativement mieux réussies que les comparaisons de billes, de numéraux oraux et de chiffres arabes, respectivement,  $t(13) = 2,87$  ;  $p < .02$ ,  $t(13) = 5,05$  ;  $p < .001$ , et  $t(13) = 5,66$  ;  $p < .001$ . Les comparaisons d'ensembles de billes sont mieux réussies que les comparaisons de chiffres arabes,  $t(13) = 2,73$  ;  $p < .02$ . La différence entre les deux épreuves symboliques n'est pas significative. Concernant les rapports, le taux de réussite diminue quand le rapport se rapproche de « 1 » : 71 %, 62 % et 56 % pour, respectivement, les rapports 1/2, 2/3 et 3/4.

En résumé, l'ANOVA montre que les tâches de comparaisons analogiques sont mieux réussies par nos participants que les comparaisons symboliques. Ce constat est conforme à nos prédictions. Avec la dimension analogique, les SD sont sensibles au rapport : plus il se rapproche de « 1 », moins ils sont précis. Une particularité notable est la réussite de notre

échantillon à l'épreuve de comparaisons de surfaces dont nous avons vu - avec les enfants de 4 et 5 ans - qu'elle générerait une difficulté de discrimination.

Le tableau 5.7 récapitule les performances moyennes aux épreuves de comparaisons des quantités numériques en fonction de la tâche et du rapport en T1, T2 et T3.

### ***Corrélations entre l'ensemble des épreuves en T1***

Le tableau 5.3 présente l'ensemble des corrélations (connaissances numériques et épreuves de comparaisons). Entre épreuves analogiques, on note une corrélation entre comparaisons de cercles et de surfaces,  $r = 0,56$  ;  $p < .04$ . Entre épreuves analogiques et symboliques, la réussite aux comparaisons présentées verbalement est corrélée avec, d'une part, la connaissance de la chaîne verbale,  $r = 0,819$  ;  $p < .001$ , et, d'autre part, la capacité à constituer des collections,  $r = 0,668$  ;  $p = .009$ . Enfin, les performances aux comparaisons de cercles sont corrélées avec la capacité à constituer des collections,  $r = 0,55$  ;  $p < .045$ .

**Tableau 5.3.** Récapitulatif de l'ensemble des corrélations pour la 1<sup>ière</sup> passation et 2<sup>ième</sup> passation. La partie en grisé correspond à T1, la partie sans trame à T2. (Chverb = chaîne verbale ; Ecrit = comptage en écriture arabe; Collect = constitution de collections ; points = comptage de points).

T1	Chverb	Ecrit	Collect	Points	Cercles	Billes	Surfaces	Verbal	Arabe
Chverb	1	0,51	0,387	0,477	-0,02	,614*	-0,138	,712**	,608*
Ecrit	0,369	1	0,421	0,327	0,158	0,497	-0,082	0,476	0,104
Collect	,715**	,597*	1	,622*	0,373	0,428	0,17	0,383	-0,005
Points	0,329	-0,269	0,242	1	0,235	0,437	0,016	0,386	0,22
Cercles	0,05	0,316	,547*	0,062	1	,655*	,770**	0,418	-0,002
Billes	0,081	0,126	0,096	-0,276	0,299	1	0,483	,736**	0,407
Surfaces	-0,489	-0,078	-0,153	-0,17	,562*	0,148	1	0,375	-0,15
Verbal	,819**	0,359	,668**	0,495	0,311	0,143	-0,072	1	,533*
Arabe	0,471	-0,085	0,322	0,254	0,176	-0,187	-0,073	0,237	1

En résumé, l'analyse des performances de cette 1<sup>ière</sup> passation montre une dissociation entre représentations non symbolique et symbolique. Lors des comparaisons, les enfants trisomiques perçoivent et traitent les quantités analogiques continues et discrètes en manifestant un effet de rapport. Avec les codes symboliques, le code verbal est un peu mieux manipulé que le code indo-arabe pour lequel les réponses sont proches du hasard. Ainsi, une bonne connaissance de la chaîne verbale est associée à la réussite dans la constitution de collections et la comparaison de numéraux oraux.

### **V - B - Résumé des performances en T2.**

Après sept semaines durant lesquelles les enfants ont normalement continué leur scolarité, les mêmes épreuves leur ont donc été proposées une 2<sup>ième</sup> fois. Nous voulions observer si, dans ce laps de temps, se produisait une évolution spontanée significative dans les acquisitions numériques. Les résultats montrent que, pour les connaissances numériques, les moyennes de performances ne sont pas différentes entre T1 et T2.

Concernant les épreuves de comparaisons - et malgré certaines variations intra individuelles -, les performances sont stables entre les deux périodes. Concernant les épreuves

de comparaisons, la même hiérarchie de résultats est observée en T2 qu'en T1 avec de meilleures performances sur l'analogique que sur le symbolique. Avec la dimension analogique, les comparaisons de cercles sont mieux réussies que celles avec les billes et les surfaces ( $M = .85$ ,  $M = .69$  et  $M = .78$ , respectivement),  $t(13) = 8,02$  ;  $p < .001$ , et,  $t(13) = 4,43$  ;  $p < .002$ . La différence entre surfaces et billes est aussi significative,  $t(13) = 3,94$  ;  $p < .003$ . Au niveau de la représentation symbolique, on ne note pas de différence entre comparaisons verbales et indo-arabes ( $M = .61$  et  $M = .59$ , respectivement),  $t(13) < 1$  ; ns. Entre T1 et T2, la différence des moyennes pour les épreuves de comparaisons de quantités n'est significative que pour les chiffres arabes,  $t(13) = -2,59$  ;  $p = .023$ , avec une progression de la réussite moyenne de 54 % à 59 %.

Des corrélations sont relevées en T2 qui n'apparaissent pas en T1. La chaîne verbale est toujours corrélée avec les comparaisons verbales, mais elle est aussi corrélée avec les comparaisons de billes,  $r = 0,614$  ;  $p < .02$  et de chiffres arabes,  $r = 0,608$  ;  $p < .03$ . En T2, comparativement à T1, les comparaisons verbales et arabes sont maintenant corrélées,  $r = 0,53$  ;  $p < .05$ .

En résumé, comme nous l'attendions, en l'absence d'intervention ciblée, les performances entre les deux premières passations montrent une stabilité dans les performances de nos participants dans le domaine des connaissances numériques et des comparaisons de quantités. Nous allons maintenant observer les effets d'une stimulation sur la représentation verbale.

### **V - C - Analyses des performances en T3.**

L'entraînement précédant T3 portait principalement sur le comptage et le dénombrement. Nous attendions une amélioration des performances relatives à la

représentation verbale, sans exclure que l'ensemble des activités ait un effet bénéfique sur l'ensemble des performances numériques.

### *Caractéristiques de la population en T3*

- Enonciation de la chaîne numérique verbale : les résultats ( $M = 17,79$  ;  $ET = 2,55$ ) montrent que 7 participants (contre 4 en T1) atteignent maintenant le maximum (20), le score le plus faible étant passé de 8 à 13.
- Ecriture des chiffres arabes : le comptage écrit ( $M = 8,36$  ;  $ET = 5,54$ ) est mieux réussi (2 enfants ne vont pas au-delà des items d'amorce). Deux participants vont jusqu'à 20.
- Constitution de collections : plus de la moitié des participants (contre 2 en T1) parviennent à constituer les trois collections ( $M = 2,64$  ;  $ET = .49$ ).
- Dénombrement : les progrès concernent le dénombrement de séries de points ( $M = 2,43$  ;  $ET = .51$ ). Six participants (contre aucun en T1) sont capables de compter le nombre exact de points (maximum « 18 »).

Conformément aux prédictions, l'entraînement a induit une amélioration des performances numériques des enfants dans cette première série d'épreuves.

**Tableau 5.4.** Récapitulatif des moyennes aux épreuves de connaissances en T1, T2 et T3.

Périodes	T1			T2			T3		
	Moy. (ET)	Min.	Max.	Moy. (ET)	Min.	Max.	Moy. (ET)	Min.	Max.
Chaîne verbale (/20)	14,64 (4,05)	8	20	13,86 (4,17)	7	20	17,79 (2,55)	13	20
Comptage écrit (/20)	5,86 (2,80)	3	10	6,64 (4,72)	3	20	8,36 (5,54)	3	20
Collections (/3)	1,29 (0,99)	0	3	1,43 (1,09)	0	3	2,64 (0,50)	2	3
Dénombrement points (/3)	0,93 (0,73)	0	2	0,93 (0,73)	0	2	2,43 (0,51)	2	3

### ***Corrélations entre les épreuves d'évaluation des caractéristiques cognitives en T3***

Des corrélations apparaissent entre la connaissance de la chaîne verbale et les capacités à constituer des collections,  $r = 0,66$  ;  $p < .02$ , déjà présente en T1, et à dénombrer,  $r = 0,78$  ;  $p < .002$ . La corrélation entre constitution de collections et dénombrement, déjà présente en T2 mais pas en T1, est aussi significative,  $r = 0,65$  ;  $p < .02$ .

**Tableau 5.5.** Corrélations entre épreuves d'évaluation des connaissances numériques en T3

	Chaîne verbale	Comptage écrit	Collections	Dénombrement
Chaîne verbale				
Comptage écrit	0,453			
Collections	,664**	0,217		
Dénombrement	,781**	0,131	,645*	

### ***Analyse des résultats pour chaque épreuve de comparaison en T3***

Nous observerons le même plan de présentation que pour les résultats en T1. Nous commencerons par l'étude de chaque épreuve avant de procéder à une analyse globale.

#### **● Quantités continues : comparaisons de cercles**

Une ANOVA à 3 (distance « 1 (0,5 cm) », « 2(1 cm), » et « 3 (1,5 cm) ») facteurs avec mesures répétées montre un effet de la distance,  $F(2,26) = 11,07$ ,  $CME = .665$ ,  $p < .001$ . La difficulté s'accroît quand la différence entre les deux cercles diminue (respectivement :  $M = 10,50$  ( $ET = 1,23$ ),  $M = 11,43$  ( $ET = 0,76$ ) et  $M = 11,93$  ( $0,27$ ) pour les distances 0,5 cm, 1 cm et 1,5 cm).

**Tableau 5.6.** Moyenne de bonnes réponses pour l'épreuve des cercles en T1, T2 et T3 (grisé).

	T1	T2	T3
<b>Cercles (36 items)</b>	Moy. (ET)	Moy. (ET)	Moy. (ET)
Cercle distance 1 (0,5 cm)	9,50 (1,51)	9,50 (1,29)	10,5 (1,29)
Cercle distance 2 (1 cm)	9,79 (0,89)	9,71 (1,81)	11,43(0,76)
Cercle distance 3 (1,5 cm)	10,64 (1,87)	11,43 (1,09)	11,93(0,27)

### *Analyses des épreuves de comparaisons de quantités numériques en T3*

- Comparaisons d'ensembles de billes.

L'ANOVA à 3 (rapport : 1/2, 2/3 et 3/4) facteurs avec mesures répétées montre un effet significatif du rapport,  $F(2,26) = 11,01$ ,  $CME = .022$ ,  $p < .001$ . Les performances s'améliorent lorsque le rapport s'éloigne de « 1 », respectivement : .91 ( $ET = .10$ ), .83 ( $ET = .17$ ) et .65 ( $ET = .19$ ) pour les rapports 1/2, 2/3 et 3/4.

- Comparaisons avec contrôle des surfaces.

L'ANOVA à 3 (rapport : 1/2, 2/3 et 3/4) facteurs avec mesures répétées montre un effet de rapport significatif,  $F(2,26) = 14,22$ ,  $CME = .012$ ,  $p < .001$ , avec des moyennes de .96 ( $ET = .08$ ), .80 ( $ET = .15$ ) et .75 ( $ET = .12$ ) pour les rapports 1/2, 2/3 et 3/4. Les performances baissent quand le rapport se rapproche de « 1 ».

- Comparaisons présentées verbalement.

L'ANOVA à 3 (rapport : 1/2, 2/3 et 3/4) facteurs avec mesures répétées montre un effet de rapport significatif,  $F(2,26) = 7,30$ ,  $CME = .022$ ,  $p = .003$ , avec une diminution des bonnes réponses lorsque le rapport se rapproche de « 1 » ( $M = .82$  ( $ET = .17$ ),  $M = .70$  ( $ET = .17$ ) et .61 ( $ET = .15$ ) pour les rapports 1/2, 2/3 et 3/4, respectivement). Ce résultat avec le code symbolique verbal n'était pas forcément attendu.

- Comparaisons en chiffres arabes.

L'effet de rapport est ici tendanciel,  $F(2,26) = 3,31$ ,  $CME = .034$ ,  $p = .052$ , mais aucun effet n'apparaissait en T1. Ce résultat est intéressant dans la mesure où il montre que les enfants trisomiques, après entraînement, semblent se comporter comme les enfants tout-venant de 4 et 5 ans : avec la modalité arabe, ils obtiennent, comme attendu, leur meilleure réussite ( $M = .78$  ;  $ET = .19$ ) avec le rapport 1/2, le plus éloigné de « 1 ». Par contre, le rapport 3/4 ( $M = .67$  ;  $ET = .17$ ) est mieux réussi que le rapport 2/3 ( $M = .60$  ;  $ET = .21$ ) en particulier à cause de la difficulté à traiter les comparaisons « 6 vs 9 » et « 9 vs 6 » qui ne sont réussies que dans 50 % des cas.

En résumé, les analyses des épreuves en T3 confirment les résultats obtenus en T1 pour la représentation analogique : les participants montrent un effet de rapport et font plus d'erreurs lorsque le rapport se rapproche de « 1 ». Avec la représentation symbolique, l'effet de rapport apparaît avec le code verbal, ce qui suggère une mise en relation avec l'analogique. Le traitement du code arabe présente un profil de performances particulier ce qui laisse supposer qu'il ne se fait pas en lien avec la représentation analogique.

### *Analyse de variance avec l'ensemble des variables en T3*

Nous avons effectué une analyse de variance avec 4 (tâches : billes, surfaces, verbal et chiffres arabes) x 3 (rapports : 1/2, 2/3 et 3/4) facteurs avec mesures répétées. Les résultats montrent un effet significatif de la tâche et du rapport. L'interaction entre tâches et rapports n'est pas significative.

Les performances varient selon la tâche,  $F(3,39) = 10,15$ ,  $CME = 0,022$ ,  $p < .001$ , avec une réussite moyenne de .80 ( $ET = .10$ ), .83 ( $ET = .08$ ), .71 ( $ET = .11$ ) et .68 ( $ET = .11$ ), pour respectivement, les comparaisons de billes, de surfaces, de numéraux oraux et de



chiffres arabes. On ne note pas de différence entre épreuves analogiques ; ces dernières sont mieux réussies que les épreuves symboliques. Les comparaisons de billes sont mieux réussies que les comparaisons verbales,  $t(13) = 2,78 ; p < .02$ , et les comparaisons de chiffres arabes,  $t(13) = 3,91 ; p < .003$ . De même, les comparaisons de surfaces sont mieux réussies que les comparaisons verbales,  $t(13) = 3,20 ; p < .01$ , et les comparaisons de chiffres arabes,  $t(13) = 4,28 ; p < .002$ . La différence entre les deux épreuves symboliques n'est pas significative. Avec les rapports, les performances sont moins bonnes quand le rapport se rapproche de « 1 » : le taux de réussite est de 87 % pour le rapport 1/2, de 73 % et 67 % pour les rapports 2/3 et 3/4, respectivement.

En résumé, l'analyse de variance en T3 confirme que les performances des enfants trisomiques, après la période de stimulation, restent meilleures aux comparaisons analogiques qu'aux comparaisons symboliques. Alors qu'en T1, les réussites étaient meilleures pour l'épreuve des surfaces comparativement à celle des billes, un rapprochement des performances des deux épreuves de comparaisons de quantités discontinues s'opère en T3. La différence de performance entre comparaisons symboliques n'est pas significative.

**Tableau 5.7.** Moyenne des performances aux épreuves de comparaisons de quantités numériques en fonction de la tâche et du rapport en T1, T2 et T3.

Tâches	Rapports T1			Rapports T2			Rapports T3		
	1/2	2/3	3/4	1/2	2/3	3/4	1/2	2/3	3/4
<b>Billes</b>	0,75	0,64	0,60	0,86	0,58	0,47	0,91	0,83	0,65
<b>Surfaces</b>	0,90	0,76	0,64	0,95	0,67	0,57	0,97	0,81	0,75
<b>Verbal</b>	0,65	0,55	0,51	0,64	0,64	0,52	0,82	0,71	0,61
<b>Arabe</b>	0,54	0,53	0,50	0,62	0,59	0,46	0,78	0,60	0,67

### *Corrélations entre l'ensemble des épreuves en T3*

Les performances aux comparaisons de cercles et de billes sont significativement corrélées,  $r = .623$  ;  $p < .02$ . Une corrélation non présente en T1 apparaît entre les deux épreuves symboliques, verbale et arabe,  $r = .614$  ;  $p < .03$  : cette corrélation laisse supposer que l'entraînement a permis de « lier » les traitements symboliques.

Des corrélations sont présentes entre connaissances numériques et épreuves de comparaisons. La connaissance de la chaîne verbale est corrélée aux performances aux comparaisons d'ensembles de billes,  $r = .62$  ;  $p = .02$ , et aux comparaisons verbales,  $r = .55$  ;  $p < .05$ . L'épreuve de comptage écrit est corrélée négativement aux comparaisons de surfaces,  $r = -.58$  ;  $p < .04$  : les deux épreuves ne nécessitent pas les mêmes mécanismes de traitement. Le comptage écrit est aussi corrélé aux comparaisons verbales,  $r = .704$  ;  $p < .01$ . La capacité à constituer des collections est corrélée avec les performances aux comparaisons de billes,  $r = .623$  ;  $p < .02$ , de numéraux oraux,  $r = .613$  ;  $p < .03$ , et de chiffres arabes,  $r = .66$  ;  $p < .02$ . Une dernière corrélation apparaît entre le dénombrement de points et les comparaisons de billes,  $r = .63$  ;  $p < .02$ .

**Tableau 5.8.** Récapitulatif de l'ensemble des corrélations pour la 3<sup>ième</sup> passation. La partie sans trame correspond aux caractéristiques de la population. La partie en grisé fait apparaître les épreuves de comparaisons (Chverb = chaîne verbale ; Ecrit = comptage en écriture arabe ; Collect = constitution de collections ; points = comptage de points).

T3	Chverb	Ecrit	Collect	Points	Cercles	Billes	Surfaces	Verbal	Arabe
<b>Chverb</b>									
<b>Ecrit</b>	0,453								
<b>Collect</b>	,664**	0,217							
<b>Points</b>	,781**	0,131	,645*						
<b>Cercles</b>	0,454	0,34	0,298	0,515					
<b>Billes</b>	,618*	-0,021	,623*	,630*	,623*				
<b>Surfaces</b>	-0,041	-,578*	0,058	0,011	-0,135	0,245			
<b>Verbal</b>	,545*	,704**	,613*	0,434	0,331	0,388	-0,232		
<b>Arabe</b>	0,416	0,172	,660*	0,426	0,224	0,476	0,033	,614*	

### *Mise en perspective des résultats à T1 et à T3*

Notre objectif était d'étudier l'impact d'un entraînement, centré sur la chaîne verbale et le dénombrement, sur les représentations du triple code. Nous avons montré que la poursuite à l'identique de la scolarité sans entraînement spécifique n'amenait pas une amélioration des performances aux épreuves de connaissances numériques et aux comparaisons de quantités. Afin de savoir quels effets l'entraînement avait produits sur les acquisitions numériques et les représentations analogique et symbolique des participants, nous avons comparé les moyennes aux différentes épreuves en T1 et en T3 ; i.e., aux deux moments principaux de la recherche. Les comparaisons de moyennes montrent qu'une amélioration des performances est présente à chacune des épreuves de connaissances numériques. L'empan de la chaîne verbale progresse significativement ( $M = 14,64$  et  $M = 17,79$ , respectivement),  $t(13) = -4,33$  ;  $p < .002$ . Il en va de même pour la capacité à écrire les nombres ( $M = 5,86$  et  $M = 8,36$ , respectivement),  $t(13) = -2,74$  ;  $p < .02$ , à constituer des

collections ( $M = 1,29$  et  $M = 2,64$ , respectivement),  $t(13) = -6,03$  ;  $p < .001$ , et à dénombrer des séries de points ( $M = .93$  et  $M = 2,43$ , respectivement),  $t(13) = -8,63$  ;  $p < .001$ .

Le constat est identique avec les comparaisons de quantités. Entre T1 et T3, augmentent significativement : les pourcentages de bonnes réponses aux comparaisons de cercles (83 et 94 %, respectivement),  $t(13) = -5,49$  ;  $p < .001$ , de collections de billes (69 et 84 %, respectivement),  $t(13) = -4,25$  ;  $p < .002$ , de surfaces (79 et 87 %, respectivement),  $t(13) = -2,73$  ;  $p < .02$ , de numéraux oraux (61 et 73 %, respectivement),  $t(13) = -7,65$  ;  $p < .001$ , et de chiffres arabes (55 et 71 %, respectivement),  $t(13) = -4,72$  ;  $p < .001$ .

En résumé, les activités mobilisées lors de la période d'entraînement ont eu un impact sur la réussite des participants aux différentes épreuves. Les performances ont augmenté avec chacune des représentations postulées par le modèle du triple code, analogique, verbale et indo-arabe. Toutefois, les enfants trisomiques, même si leurs performances augmentent en T3 aux tâches symboliques, sont loin de réaliser avec les codes symboliques des performances équivalentes à celles de la représentation analogique, comme le font les enfants dès 5 ans.

### *Analyse des profils individuels*

Comme nous l'avons fait pour les autres populations, nous avons établi pour chaque participant le profil individuel de ses performances aux épreuves de connaissances numériques et aux comparaisons de quantités. Les résultats sont présentés dans le tableau 5.9. Pour les comparaisons de quantités, le seuil de réussite est fixé à 75%. Pour l'épreuve des cercles, l'ensemble des items traités par chaque enfant est pris en compte soit 36 items (seuil de réussite à 27). Pour les autres épreuves de comparaisons (billes, densité, numéraux verbaux et chiffres arabes), les scores correspondent aux réussites pour les rapports 1/2, 2/3 et 3/4, soit 24 items (seuil de réussite à 18). La réussite est notée « 1 ».

Les résultats individuels aux épreuves de connaissances numériques permettent de constater les progrès réalisés par chacun des participants entre T1 et T3 pour la chaîne verbale, le comptage écrit, la constitution de collections et le dénombrement de points. Concernant les comparaisons, aucun des enfants ne réussit à l'ensemble des 10 épreuves ; P9, seul, a franchi le seuil de réussite à 9 reprises, échouant aux comparaisons arabes en T1. Aucun enfant ne présente que des échecs. Même si le nombre de participants qui atteignent 75 % de réussites entre T1 et T3 augmente pour toutes les épreuves, le décalage entre analogique et symbolique reste important. En T1, le seuil est franchi 12 fois pour les épreuves des billes et des surfaces contre 2 fois pour les numéraux verbaux et les chiffres arabes. En T3, l'écart demeure important : 24 réussites aux deux épreuves analogiques contre 11 aux épreuves symboliques. Malgré une amélioration des résultats, les enfants trisomiques n'atteignent pas avec le code symbolique verbal ou indo-arabe une précision identique à celle qu'ils peuvent avoir avec l'analogique. La majorité des enfants présentent un profil conforme à la théorie et répondent en cohérence avec la hiérarchie faisant l'hypothèse d'un taux de réussite supérieur sur l'analogique.

Nous avons fait l'hypothèse que l'entraînement centré sur la dimension symbolique devrait avoir un impact sur les performances aux comparaisons avec les codes symboliques. Cette prédiction est réalisée : 4 participants (P3, P5, P6 et P8) atteignent le seuil de réussite avec les comparaisons verbales en T3 alors que ce n'était pas le cas en T1 ; avec les chiffres arabes, ils sont 5 (P3, P9, P11, P12 et P14) à progresser. Les activités centrées sur une meilleure connaissance de la chaîne verbale et une pratique accrue du dénombrement ont eu un impact positif sur les performances aux représentations symboliques.

Nous avons aussi envisagé la possibilité d'un impact de l'entraînement sur les performances de la représentation analogique : c'est ici le cas. Cinq participants (P3, P5, P11, P12 et P14) progressent à la fois avec la dimension analogique et avec la dimension

symbolique. Ce constat est compatible avec les résultats obtenus par Rousselle et Noël (2007) qui ont avancé que la faiblesse des performances en arithmétique pouvait être comprise comme la conséquence de difficultés pour les enfants à accéder à la représentation analogique à partir des symboles numériques.

Certains profils questionnent sur les relations entre les codes symboliques. Le résultat de P5 aux comparaisons de chiffres arabes en T1 montre qu'il est possible de réussir les comparaisons indo-arabes indépendamment du verbal et de l'analogique discontinu. Une dissociation entre le code verbal et arabe apparaît avec P11, P12 et P14 en T3.

**Tableau 5.9.** Profils individuels des réussites aux épreuves de connaissances numériques (en grisé) et aux différentes épreuves de comparaisons (en clair) lors des 1<sup>ière</sup> et 3<sup>ième</sup> passations. Pour les tâches de comparaisons, la réussite est considérée comme effective lorsque le score atteint 27 (soit 75%) sur 36 à l'épreuve des cercles et 18 (/24) pour les autres épreuves. La réussite est notée 1 (CHV = chaîne verbale ; Ecrit = comptage écrit ; Coll.= constitution de collections ; Points = dénombrement de points).

id	CHV		Ecrit		Coll.		Points		Cercles		Billes		Surf.		Verbal		Arabe	
	T1	T3	T1	T3	T1	T3	T1	T3	T1	T3	T1	T3	T1	T3	T1	T3	T1	T3
1	13	20	4	4	1	3	1	3	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0
2	8	15	4	6	0	2	1	2	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0
3	20	20	10	20	2	3	0	2	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1
4	10	13	3	3	1	2	0	2	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0
5	20	20	9	9	3	3	2	3	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1
6	10	15	10	11	1	2	0	2	1	1	0	0	1	1	0	1	0	0
7	14	18	7	9	0	2	0	2	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
8	15	20	10	20	3	3	1	3	1	1	1	1	1	0	0	1	0	0
9	20	20	6	10	2	3	1	3	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
10	15	15	3	5	1	3	1	2	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0
11	14	20	4	7	1	3	1	3	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1
12	20	20	5	5	2	3	2	3	0	1	0	1	0	1	0	0	0	1
13	14	17	4	5	1	2	1	2	1	1	0	1	1	1	0	0	0	0
14	12	16	3	3	0	3	2	2	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1

### **V - 3 - Discussion**

Les enfants atteints du syndrome de Down présentent un retard important au niveau du langage oral, mais dans le domaine numérique ils montrent un effet de distance dans les comparaisons de quantités, attestant de la préservation de la représentation analogique (Paterson, 2001). Avec cette population, nous avons voulu observer l'impact d'un entraînement centré sur la représentation symbolique verbale. Nous avons fait l'hypothèse d'une amélioration des performances sur la dimension symbolique sans avoir de certitude quant à une progression avec les comparaisons de la dimension analogique.

Nous avons travaillé avec 14 enfants trisomiques (âgé de 7 à 13 ans) auxquels une évaluation portant (I) sur les connaissances numériques et (II) sur les épreuves de comparaisons issues du triple code a été proposée trois fois, en T1, T2 et T3. Entre la période T2 et la période T3, un entraînement centré sur l'amélioration de la chaîne numérique verbale et le dénombrement a été proposé aux participants.

Lors de la 1<sup>ière</sup> évaluation (T1), nous avons pu constater que les performances dans le domaine numérique étaient globalement faibles comparativement à l'âge. Ce résultat n'est guère surprenant car les études sur les enfants trisomiques montrent qu'ils peuvent faire des apprentissages mais à un rythme plus lent que les enfants tout-venant (Comblain & Thibaut, 2009). Nous avons relevé, dès cette 1<sup>ière</sup> passation, un effet de rapport avec toutes les comparaisons analogiques. Cet effet de rapport tend à apparaître avec le symbolique verbal, mais demeure absent avec les chiffres arabes. La dimension analogique est donc traitée différemment de la dimension symbolique. Comme prévu, nous n'avons pas perçu en T2 une évolution spontanée significative par rapport à T1. Les performances sont, par contre, en nette amélioration entre T2 et T3 - après la période d'entraînement. La progression est générale et ne touche pas uniquement la représentation verbale, comme nous en avons formulé

l'hypothèse : l'entraînement a aussi eu un impact sur l'analogique dans toutes ses composantes (cercles, billes et surfaces) et sur le code indo-arabe.

En T3, avec notre population, les épreuves analogiques ont bénéficié de l'entraînement et demeurent celles où les performances sont les meilleures, conformément à l'hypothèse  $A \geq Sv \geq Sa$ . Comme en T1, l'effet de distance (cercles) et de rapport (billes, surfaces) sont présents. De manière intéressante, les comparaisons verbales progressent et les progrès dans le code verbal s'accompagnent de l'apparition d'un effet de rapport. Entre T1 et T3, on note l'apparition d'une corrélation entre les performances aux deux épreuves symboliques ce qui laisse supposer l'émergence d'un mécanisme de traitement spécifiquement dédié aux codes symboliques.

Concernant le code indo-arabe, le profil des performances est différent de celui du code verbal : l'effet de rapport n'apparaît pas. Il est intéressant de constater que les enfants trisomiques de notre échantillon, avec une moyenne d'âge plus avancée, se comportent à l'épreuve de comparaison des chiffres arabes comme les enfants de 4 et 5 ans ; ils éprouvent des difficultés avec le rapport 2/3, à cause notamment de la difficulté de traitement de la comparaison « 6 vs 9 ». Des particularités apparaissent au niveau du symbolique : des participants réussissent mieux avec le code indo-arabe qu'avec le code verbal. Comme nous l'avons constaté dans les études précédentes, la hiérarchie  $Sv \geq Sa$  n'est pas forcément respectée. Le problème de l'indépendance des deux codes est posé.

Nos résultats montrent qu'un impact de l'entraînement spécifique sur la représentation verbale améliore les performances des comparaisons analogiques. Ce constat pose la question des relations entre les représentations du triple code à la lumière des troubles du traitement du nombre. Deux conceptions ont été avancées. La 1<sup>ière</sup> considère l'existence d'un système analogique inné de traitement des quantités, supportant la sémantique du nombre. Butterworth



(1999) avance que nous possédons un module du nombre. Selon ce chercheur, si tout le monde compte, c'est parce que nous sommes nés avec des circuits cérébraux nous permettant de catégoriser le monde en termes de numérosités, indépendamment des aspects culturels et linguistiques de la société dans laquelle nous vivons. La cause des troubles en arithmétique tiendrait dans une atteinte de ce module du nombre ayant pour conséquence une incapacité à traiter correctement les informations numériques. Une 2<sup>ème</sup> conception défend l'idée que les troubles dans le traitement du nombre ne découleraient pas d'un déficit du système analogique mais de difficultés pour accéder au sens du nombre à partir des symboles. A l'appui de cette hypothèse, Rousselle et al (2007) ont montré que les enfants présentant des troubles en arithmétique présentaient des difficultés à traiter la numérosité à partir des symboles, mais non à traiter la numérosité en soi. Selon ces auteurs, les enfants faibles en calcul sont capables de comparer les quantités de manière analogique, mais ils présentent un déficit d'accès à la représentation symbolique, par exemple avec les chiffres arabes. Nos résultats sont un élément de confirmation de leurs constatations : les enfants trisomiques peuvent comparer assez efficacement les quantités avec un format analogique - ce que prouve l'effet de rapport ; mais ils ont un déficit avec la représentation symbolique. Lorsque le traitement cognitif de cette représentation est amélioré par une meilleure connaissance des codes, l'accès à l'information concernant la quantité est amélioré (ce que montrent les profils individuels de P3, P5, P11, P12 et P14) et l'effet se fait sentir sur l'ensemble des performances liées au nombre.

Pour terminer ce chapitre consacré aux enfants atteints du syndrome de Down, il est intéressant de constater que nos observations rejoignent celles de Nye et al.(2001) : ces chercheurs avaient noté combien les enfants trisomiques pouvaient bénéficier pour leurs apprentissages numériques de l'aide d'un adulte. Dans notre étude, la régularité dans les interventions d'entraînement entre T2 et T3, la familiarisation avec l'adulte et les tâches (il est

d'ailleurs possible que les performances des enfants de notre échantillon aux épreuves de comparaisons bénéficient d'un effet test/retest) ont pu avoir une influence positive et favorisante pour les acquisitions numériques.

## **DISCUSSION GENERALE**

L'objectif de ce travail était d'étudier la façon dont l'acquisition du nombre s'effectue chez les enfants dans le cadre du modèle dit du triple code. Le modèle du triple code a été élaboré par Dehaene (1992 ; Dehaene & Cohen, 2000) sur la base d'arguments neuropsychologiques et de données issues de la neuro-imagerie. Il décrit une architecture cognitive et postule que le traitement des nombres et des quantités repose sur un ensemble interconnecté, composé de trois représentations mentales distinctes : une représentation analogique et deux représentations symboliques, l'une auditive verbale et l'autre visuelle arabe. Ces trois représentations vont être activées selon la nature des opérations numériques à effectuer.

La représentation analogique est préverbale, universelle et indépendante du langage. Elle est peu précise et permet d'effectuer des estimations et des comparaisons de quantités. Elle ne serait pas spécifique aux êtres humains qui la partageraient avec les animaux. Elle correspond au sens du nombre et serait organisée selon la métaphore d'une ligne numérique mentale, compressible, orientée de gauche à droite. Cette organisation sous forme de ligne rend compte de plusieurs effets : effet de taille, de distance, de rapport, SNARC. L'évaluation de ces effets permet de décrire le système analogique des quantités. Concernant le système analogique, Whalen et al. (1999) ont montré que dans des conditions où des adultes sont empêchés de compter, ils donnent une réponse approximative proportionnelle (e.g., appuyer x fois sur un bouton) à la grandeur de la cible.

La représentation verbale est culturellement déterminée ; elle est précise, en lien avec le système linguistique de comptage. Elle est asémantique et permet le traitement des mots de nombres et des faits arithmétiques. La représentation indo-arabe correspond à la forme visuelle des nombres. Elle est aussi asémantique. Selon le modèle, chaque représentation peut fonctionner de manière indépendante et il existe des relations bidirectionnelles entre chacune

des représentations et les deux autres. La représentation analogique, à laquelle viendraient se lier les représentations symboliques, supporterait donc le sens du nombre. En terme de performances, ces dernières ne pourraient toutefois pas être supérieures à cette dernière. Le modèle fait donc l'hypothèse d'une hiérarchie dominée par la représentation analogique.

Chez l'adulte, l'existence des trois représentations a été attestée par différentes observations. Elles ont été étudiées avec des patients présentant des doubles dissociations relevées entre système analogique et codes symboliques, et entre représentations verbale et arabe (Warrington & Butterworth, 1995). Chez le nouveau-né, les chercheurs se sont attachés à montrer que le très jeune enfant possédait déjà un système analogique préverbal ; diverses expériences ont montré que les bébés pouvaient discriminer soit de petites numérosités de 2 vs 3 objets (cf. Antell & Keating, 1983), soit des numérosités plus importantes à condition que le rapport soit suffisamment important, e.g. 8 vs 16 objets (cf. Xu & Spelke, 2000).

Au cours du développement, on peut considérer que l'acquisition du nombre consiste en une mise en relation de la dimension analogique et de la dimension symbolique. Les représentations symboliques vont venir se « greffer » sur la représentation non symbolique ; la « signature » de cette mise en connexion de l'analogique et du symbolique repose sur l'un des effets caractéristique mais non spécifique, de la ligne numérique : l'effet de distance (Moyer et al., 1967) : dans une comparaison de quantités, les performances sont meilleures et les temps de réaction plus courts lorsque les deux éléments à comparer sont éloignés que lorsqu'ils sont proches. Cet effet de distance a été mis en évidence, chez les adultes, dans les comparaisons numériques avec des ensembles de points ou de carrés (e.g., Ansari, Dhital & Siong, 2006), des noms de nombres, des chiffres arabes (e.g., Dehaene & Akhavein, 1995). Cet effet de distance a aussi été étudié avec les enfants (e.g., Sekuler et Mierkiewicz, 1977 ; Holloway et Ansari, 2008).

Si l'effet de distance « signe » la mise en connexion de la représentation analogique avec les représentations symboliques, il est un indicateur intéressant pour répondre à la question, qui n'a pas été étudiée dans le cadre du modèle du triple code, de savoir à quelle période et de quelle manière cette mise en relation s'effectue au cours du développement. En effet, le modèle du triple code n'a jamais été abordé dans une perspective développementale, ce que nous avons décidé de faire. Notre investigation avait pour but de comprendre à quel moment, et comment, les codes culturels, verbal et indo-arabe, sont suffisamment articulés à la représentation analogique préverbale pour traiter le nombre et les quantités. Le dispositif expérimental que nous avons élaboré devait nous permettre, à partir d'une série d'épreuves de comparaisons directement inspirées par le modèle du triple code, de tester le fonctionnement des trois représentations analogique, verbale et indo-arabe. Il comprenait trois épreuves en lien avec l'analogique (cercles, ensembles de jetons et surfaces rectangles) et deux en lien avec les codes symboliques (verbal et arabe).

Si la représentation analogique permet très précocement le traitement des quantités ce qui se traduit par un effet de distance, le code verbal des mots de nombre devrait s'installer progressivement et précéder le code arabe qui fait l'objet d'un enseignement formel (Van Nieuwenhoven, Grégoire et Noël ; 2001). Conformément à la théorie, la présence dans les performances de nos participants d'un effet de distance avec les comparaisons symboliques serait un indicateur de la « greffe » des dimensions symbolique sur la dimension analogique. De plus, nous avons fait l'hypothèse d'une hiérarchie des performances : nous prévoyons des résultats supérieurs aux comparaisons analogiques comparativement, d'une part, aux comparaisons symboliques verbales et, d'autre part, aux représentations symboliques arabes ( $A \geq Sv \geq Sa$ ).

Afin de tester notre dispositif expérimental et obtenir une ligne de base pour les études ultérieures, nous avons effectué une première étude avec des adultes. Cette étude

devait aussi nous permettre de choisir la variable la plus appropriée pour évaluer l'effet de distance : soit le simple écart numérique (1, 2 ou 3) soit le rapport (1/2, 2/3 ou 3/4). L'effet de rapport prend en compte la taille des collections et la distance entre les deux éléments à comparer ; la discrimination doit être d'autant plus fine que le rapport se rapproche de « 1 ». Ensuite, nous avons travaillé avec des participants tout-venant de 4 et 5 ans, à l'âge auquel le « maillage » entre représentations analogique et symbolique est attendu selon les données de la littérature (Lipton & Spelke, 2005). L'étude suivante a été conduite avec des enfants prématurés que nous avons appariés avec des tout-venant. Les participants des deux groupes étaient âgés de 5 ans. De nombreuses données de la littérature ont montré que les prématurés présentaient des troubles en arithmétique (e.g., Sayeur et al., 2011). Nous avons supposé que notre protocole basé sur le modèle du triple code pouvait être un instrument de compréhension de cette atteinte : dans la mesure où le système analogique est présent, le déficit pouvait toucher les représentations symboliques et le lien établi avec l'analogique. Enfin, une dernière expérimentation a été menée avec des enfants atteints du syndrome de Down. Avec cette population, nous avons proposé un entraînement ciblé sur la représentation verbale. Nous voulions savoir si cet entraînement aurait un effet sur le seul code verbal (ou éventuellement le code arabe) ou si son impact se ferait aussi sentir sur la dimension analogique. Pour l'ensemble des participants, nous avons pris le parti de ne pas s'en tenir à des données de groupe et présenter le profil individuel des performances afin d'observer dans le détail les variations des réussites en fonction des épreuves.

### **Résumé des résultats**

Le travail avec les adultes nous a permis de constater qu'ils accomplissaient les tâches de comparaisons avec une grande précision, ce qui nous a amené à analyser leurs temps de réaction. Il est apparu que l'effet de rapport était plus à même que l'effet de distance « simple » de décrire les résultats aux épreuves de comparaisons d'ensembles de jetons, de

surfaces rectangles et de chiffres arabes. Les adultes mettent d'autant plus de temps pour répondre aux comparaisons que le rapport se rapproche de « 1 ». C'est donc l'articulation entre dimension analogique et dimension verbale que nous avons décidé de retenir pour les analyses ultérieures pour les études avec les enfants.

Il ressort des données avec les adultes, d'une part, une dissociation entre les deux épreuves analogiques discontinues : les temps de réaction à l'épreuve des surfaces - dans laquelle la densité est contrôlée - sont plus longs qu'à l'épreuve des ensembles de jetons. Les comparaisons de rectangles de taille identique mais de numérosité différente exigent un traitement plus précis que celui des ensembles de jetons où le nombre covarie avec la surface occupée. Ce constat a été retrouvé avec les populations d'enfants tout-venant et prématurés. D'autre part, les adultes ont montré des performances pour le code analogique sans corrélation avec celles des épreuves arabes ce qui suggère que le traitement par les adultes du code indo-arabe ne se fait pas selon les mêmes modalités que celles des codes analogiques.

Nous avons mis en perspective les résultats obtenus avec les enfants de 4 et 5 ans. Selon le modèle du triple code, le système analogique de traitement des quantités est opérationnel de manière précoce, ce qui se traduit par des performances de plus en plus faibles quand le rapport se rapproche de « 1 » : nos résultats confirment cette prédiction. Si, à 5 ans, avec la dimension analogique, les enfants sont plus précis qu'à 4 ans dans les comparaisons de quantités numériques, les deux populations manifestent un effet de distance pour les cercles et un effet de rapport pour les ensembles de jetons et les surfaces rectangles. Par contre, des différences intéressantes sont relevées avec les comparaisons symboliques : si l'effet de rapport apparaît avec les comparaisons verbales à 4 (mais pas à 5 ans) et il n'est pas présent, tel qu'attendu, avec les chiffres arabes. L'articulation entre dimension analogique et symbolique n'est pas réalisée. Un point réside donc dans la différence entre traitements analogique et symbolique qui n'offrent pas les mêmes patrons de performances. Un autre

point notable consiste dans l'amélioration importante - voire spectaculaire - des performances au niveau des codes symboliques entre 4 et 5 ans. Cette amélioration est perceptible à l'examen des profils individuels et, notamment, lorsque les comparaisons exigent une discrimination fine. A 5 ans, les numéraux oraux et les chiffres arabes rendent précises les comparaisons numériques de rapport  $3/4$  ; avec ce rapport, le nombre d'enfants de 5 ans à franchir le seuil de réussite de 75 % est supérieur dans les deux épreuves symboliques comparativement à l'ensemble des épreuves analogiques - ce qui n'était pas le cas à 4 ans. L'acquisition du code verbal et indo-arabe permet donc, en un temps relativement court, aux performances aux épreuves symboliques de rejoindre et, dans certains cas, de dépasser les performances aux épreuves analogiques. Ce constat est en contradiction avec notre hypothèse  $A \geq Sv \geq Sa$ . Un dernier point découle des analyses de régression et semble particulièrement intéressant pour de futures investigations. Entre 4 et 5 ans, se produit un glissement dans le traitement des symboles numériques ; les comparaisons avec les codes verbaux et indo-arabes semblent s'abstraire de la dimension analogique sur laquelle ils s'étaient ancrés avant d'acquérir leur propre autonomie.

Les études avec les prématurés ont montré l'impact d'un déficit de la représentation symbolique dans la manipulation des quantités numériques. Dans les épreuves analogiques, les prématurés sont significativement plus lents que les tout-venant, mais ils manifestent un effet de distance et de rapport. Toutefois, les prématurés se distinguent essentiellement des tout-venant par le déficit touchant l'oral (et à un degré moindre, les chiffres arabes). D'une part, leurs performances sont inférieures à celles de leurs pairs et elles ne présentent pas le même décours en fonction des rapports : le traitement des numéraux oraux des prématurés est significativement plus faible que celui des tout-venant. D'autre part, dans les épreuves de connaissances numériques, l'empan de la chaîne verbale des prématurés est faible comparativement à celui des tout-venant. Le constat d'un lien entre connaissance de la chaîne



verbale et traitement des quantités a été fait par Mix (1999). Dans une série d'expériences, elle a testé la capacité des enfants de 2 ans 1/2 à 4 ans 1/2 à reconnaître l'équivalence numérique. Elle a proposé aux participants une tâche non verbale : choisir en pointant parmi deux cartes celle correspondant à une référence. Les items étaient contrôlés sur l'espace et la densité. Mix constate que les enfants qui reconnaissent le mieux l'équivalence des collections sont ceux qui connaissent le mieux la chaîne verbale. La faiblesse de cette représentation verbale semble être une limite aux capacités numériques des prématurés. Chez les prématurés, contrairement aux tout-venant, les performances aux comparaisons verbales ne sont pas corrélées à celles des chiffres arabes, ce suggère des traitements différents. On note dans les deux populations des profils individuels de performances dans lesquels la réussite est constatée avec les chiffres arabes mais pas avec le verbal.

Avec les enfants trisomiques, nous avons testé les effets d'un entraînement sur la représentation verbale et observé l'impact attendu sur la représentation symbolique et, éventuellement, sur la représentation analogique. Les épreuves ont été passées à trois périodes et nous avons analysé l'évolution des performances entre T1 et T3. Nos résultats montrent d'abord que les enfants trisomiques manifestent un effet de distance et de rapport dans les épreuves analogiques en T1 comme en T3. Ils sont donc capables de discriminer des quantités numériques avec un format de présentation analogique ; leur représentation non symbolique des quantités est préservée. Le déficit est cependant important avec les représentations symboliques. Néanmoins, l'entraînement au comptage et au dénombrement produit des effets bénéfiques sur les performances dans le domaine symbolique et dans le domaine analogique, comme l'ont montré certains profils individuels.

Ce résultat nous a conduit à aborder les deux conceptions qui cherchent à établir la mise en relation des deux types de représentations. Le sens du nombre ne trouverait-il pas son origine dans un « module » du nombre, supportant la sémantique du nombre, indépendant des

caractéristiques culturelles, module qui, lorsqu'il est affecté, est la cause des faiblesses en arithmétique (Butterworth, 1999) ? Ou bien, comme cela a pu être suggéré par Rousselle et al. (2007), les difficultés de traitement du nombre ne découleraient-elles pas d'un déficit dans le lien entre représentation analogique et représentation symbolique, entre représentation primitive sémantique des quantités et codes verbal et arabe ? Nos données vont dans le sens de la seconde conception. Les enfants que nous avons testés lors de nos expériences ne présentent pas de déficit de la représentation analogique comme l'atteste l'effet de rapport. Par contre, les difficultés apparaissent dans deux populations, prématurés et trisomiques, avec les codes symboliques. Pour ces deux populations, l'immaturité des codes symboliques, notamment le code verbal, ne permet pas l'accès à la sémantique du nombre. Le fait qu'un entraînement sur la dimension verbale améliore les performances sur les deux dimensions va dans ce sens : une meilleure manipulation des codes symboliques favorise l'accès à la représentation analogique.

### **Limites et perspectives**

Les études présentées dans cette thèse sont une tentative pour explorer les représentations du modèle du triple code dans une perspective développementale. Elles laissent ouvertes plusieurs questions. Nos données nous ont permis à différentes reprises d'évoquer la question de la relation entre les deux représentations symboliques au moment où nous avons noté des dissociations entre performances entre les deux codes et une meilleure réussite avec les chiffres arabes. Ce constat est présent dès 4 ans ce qui signifie qu'à cet âge, les codes symboliques sont susceptibles de faire l'objet d'un traitement différent. Notre travail établit un constat, mais ne fournit pas de réponse à la question de la nature de la relation entre les deux codes. S'il existe une indépendance entre les deux codes, les voies d'accès à la

représentation analogique peuvent dépendre des caractéristiques propres à un code ou à l'autre. Il paraît donc intéressant de comprendre le détail du fonctionnement de chacun des codes et d'investiguer les étapes qui conduisent à la représentation sémantique. Dans la mesure où les deux codes fonctionneraient différemment (en lien avec l'auditif pour le code verbal, pour le visuel pour l'indo-arabe), certains troubles pourraient être liés à un code plutôt qu'à un autre ; il serait donc nécessaire de mieux cibler les interventions.

Il reste à explorer en détail la façon dont les enfants de 4 et 5 ans effectuent les comparaisons avec les codes symboliques. Nous avons émis l'hypothèse à partir d'une observation de Butterworth (1999) que, tant que les enfants n'auraient pas automatisé l'utilisation des codes symboliques, ils pourraient compter, ce qui expliquerait que l'effet de distance n'apparaisse pas. Les futures recherches pourraient se poursuivre dans deux directions : d'une part, avec des enfants de 3 ans, qui sont au tout début de la manipulation des codes symboliques ; d'autre part, avec des enfants de 6 ou 7 ans ayant bénéficié d'un enseignement formel en mathématique. Pour cette dernière population, avec laquelle l'utilisation des temps de réaction serait envisageable, l'effet de distance devrait apparaître avec les codes symboliques.

Pour la suite des investigations, afin de compléter et améliorer notre protocole expérimental, il semble intéressant d'inclure dans le dispositif deux tâches supplémentaires et d'en modifier une. Afin de mieux évaluer la connaissance du système numérique arabe, une épreuve de lecture de nombres arabes - du type de celle proposée dans le Tedi-Math (Van Nieuwenhoven et al., 2001) - pourrait utilement compléter l'écriture de chiffres arabes : nous avons vu que cette épreuve graphique posait problème graphique à beaucoup d'enfants dont les performances étaient limitées. Ensuite, il paraît intéressant de voir comment l'enfant se représente la ligne numérique à travers une épreuve de positionnement de nombres sur une ligne - du type de celle proposée par le Zareki-R (von Aster & Dellatolas, 2006) ; cette tâche

permettrait d'évaluer comment l'enfant relie la quantité à un code symbolique. Afin de mieux évaluer les performances à l'épreuve de quantités continues (cercles), il semble important de faire varier les surfaces en fonction des mêmes rapports que ceux utilisés dans les comparaisons de quantités numériques ; ainsi les performances portant sur l'analogique continu pourraient être directement incluses dans les analyses à l'ensemble des performances aux autres comparaisons.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Antell, S.E., & Keating, D.P. (1983). Perception of numerical invariance in neonates. *Child Development, 54*, 695-701.
- Ansari, D., & Dhital, B. (2006). Age-related changes in the activation of the intraparietal sulcus during nonsymbolic magnitude processing: An event-related functional magnetic resonance imaging study. *Journal of Cognitive Neuroscience, 18*(11), 1820-1828.
- Ansari, D., Dhital, B., & Siong, S. C. (2006). Parametric effects of numerical distance on the intraparietal sulcus during passive viewing of rapid numerosity changes. *Brain Research, 1067*, 181–188.
- Banks, W.P., Fujii, M., & Kayra-Stuart, F. (1976). Semantic Congruity Effects in Comparative Judgments of Magnitudes of Digits. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance, 2* (3), 435-447.
- Barber, I. & Wright, H.A. (2001). How important are familiarity benefits to shoaling fish? *Animal Behaviour, 61*, 975-979.
- Barrouillet, P., Thevenot, C., & Fayol, M. (2010). Implicit knowledge of number syntax in 5-to-6-year-old children. *Journal of Experimental Child Psychology, 105*, 264-271.
- Berteletti, I., Lucangeli, D., Piazza, M., Dehaene, S. & Zorzi, M. (2010). Numerical estimation in preschoolers. *Developmental Psychology, 46*, 545-51.
- Butterworth, B. (1999). *The mathematical brain*. London : Macmillan.
- Cantlon J.F., & Brannon E.M. (2007). Basic Math in Monkeys and College Students. *PLoS Biol 5*(12): e328.
- Chapman, R.S. & Hesketh, L. (2000). The behavioral phenotype of Down syndrome. *Mental Retardation and Developmental Disabilities Research Review, 6*, 84-95.
- Chochon, F., Cohen, L., van de Moortele, P.F., & Dehaene, S. (1999). Differential Contributions of the Left and Right Inferior Parietal Lobules to Number Processing. *Journal of Cognitive Neuroscience, 11*, 617-630.
- Cipolotti, L. (1995). Multiples routes for reading words, why not numbers ? Evidence from a case of Arabic numerical dyslexia. *Cognitive Neuropsychology, 12*, 313-342.
- Cipolotti, L., Warrington, E.K., & Butterworth, B. (1995). Selective impairment in manipulating arabic numerals. *Cortex, 31*, 73-86.
- Clearfield, M.W. & Mix, K.S. (1999). Number versus contour length in infants' discrimination of small visual sets. *Psychological Science, 10*(5), 408-411.

- Cohen, J., Mac Whinney, B., Flatt, M., & Provost, J. (1993). PsyScope : An interactive graphical system for designing and controlling experiments in the psychology laboratory using MacIntosh computers. *Behavior Methods, Research, Instruments and Computers*, 25, 257–271.
- Cohen, L. (2012). *Pourquoi les filles sont si bonnes en maths*. Paris : Odile Jacob
- Comblain, A., & Thibaut, J.P. (2009). Approche neuropsychologique du syndrome de Down. In Poncelet, M, Majerus, S., & Van der Linden, M. (Eds.), *Traité de neuropsychologie de l'enfant* (pp. 491-524). Marseille: Solal.
- Davidson, K., Eng, K., & Barner, D. (2012). Does learning to count involve a semantic induction? *Cognition*, 123, 162-173.
- de Hevia, M.D. & Spelke, E.S. (2009). Spontaneous mapping of number and space in adults and young children. *Cognition* 110, 198-207.
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities. *Cognition*, 44 , 1-42.
- Dehaene, S. (2001). Précis of the number sense. *Mind & Language*, 16, 16-36.
- Dehaene, S. (2005). Les bases biologiques de l'arithmétique élémentaire. *Pour la Science*, 330, 70-75.
- Dehaene, S. (2009). Origins of mathematical intuitions: the case of arithmetic. *Ann NY Acad Sci*. 1156, 232-259.
- Dehaene, S. (2010). *La bosse des maths*. Paris : Odile Jacob.
- Dehaene, S. & Akhavein, R. (1995). Attention, automaticity, and levels of representation in number processing. *Journal of Experimental Psychology : Learning, Memory and Cognition*, 21, 314-326.
- Dehaene, S., Bossini, S., & Giraux, P. (1993). The mental representation of parity and numerical magnitude. *Journal of Experimental Psychology : General*, 122, 371-396.
- Dehaene, S. & Brannon, E.M. (2010). Space, time, and number: a Kantian research program. Introduction. *Trends Cogn Sci*. 14, 517-519.
- Dehaene, S. & Cohen, L. (1995). Towards an anatomical and functional model of number processing. *Mathematical Cognition*, 1, 83-120.
- Dehaene, S. & Cohen, L. (1997). Cerebral pathways for calculation: Double dissociation between rote verbal and quantities knowledge of arithmetic. *Cortex*, 33(2), 219–250.
- Dehaene, S. & Cohen, L. (2000). Un modèle anatomique et fonctionnel de l'arithmétique mentale. In M. Pesenti & X. Seron (Eds.), *Neuropsychologie des troubles du calcul et du traitement des nombres* (pp. 191-232). Marseille : Solal.

- Dehaene, S., Dehaene-Lambertz, G., & Cohen, L. (1998) Abstract representations of numbers in the animal and human brain, *Trends in Neuroscience*, 21, 355-361.
- Dehaene S., Dupoux E., Mehler J. (1990). Is numerical comparison digital? Analogical and symbolic effects in two-digit number comparison. *Journal of Experimental Psychology: Human Perception and Performance*, 16, 626–641.
- Dehaene, S., Izard, V., Spelke, E.S., & Pica, P. (2008). "Log or linear ? Distinct Intuitions of the number scale in Western and Amazonian cultures". *Science*, 320, 1217-1220.
- Dehaene, S., Molko, N. & Wilson, A. (2004). Dyscalculie, le sens perdu des nombres. *La Recherche*, 379, 42-49
- Dehaene, S., Piazza, M., Pinel, P., & Cohen, L. (2003). Three parietal circuits for number processing. *Cognitive Neuropsychology*, 20, 487-506.
- Diestler, I. & Nieder, A. (2007). Semantic associations between signs and numerical categories in the prefrontal cortex. *PLoS Biol*, 5(11), e294.
- Donlan, C., & Gurlay, S. (1999). The importance of non-verbal skills in the acquisition of place-value knowledge : Evidence from normally-developing and language-impaired children. *British Journal of Developmental Psychology*, 17, 1-19.
- Fayol, M. (1990). *L'enfant et le nombre. Du comptage à la résolution de problèmes*. Paris : Delachaux & Niestlé.
- Fayol, M. (2002). Le facteur verbal dans les traitements numériques. In J. Bideaud & H. Lehalle (Eds), *Le développement des activités numériques chez l'enfant* (pp. 151-173). Paris : Hermes.
- Fayol, M. (2005). Les petits asiatiques savent-ils mieux compter ? *Cerveau & Psycho*, 9, 54-59.
- Fayol, M. (2012). *L'acquisition du nombre*. Paris : PUF.
- Fayol, M., Chazoule, G. & Fanget, M. (2006). Le langage et les opérations arithmétiques. In P. Dessus, E. Gentaz (Eds.), *Apprentissages et enseignement. Sciences cognitives et éducation* (pp. 75-89). Paris : Dunod.
- Fayol, M., Perros, H., & Seron, X. (2004). Les représentations numériques : caractéristiques, troubles et développement. In M.-N. Metz-Lutz, E. Demont, C. Seegmuller, M. de Agostini, N. Bruneau (Eds.), *Développement cognitif et troubles des apprentissages* (pp. 69-107). Marseille : Solal.
- Feigenson, L., Carey, S., & Spelke, E. (2002). Infants' discrimination of number vs. Continuous extent. *Cognitive Psychology*, 44, 33-66.
- Fias, W., & Pesenti, M. (2004). Le modèle du triple code de Dehaene. In M. Pesenti & X. Seron (Eds.), *La cognition numérique* (pp. 69-94). Paris : Hermes Science.

- Fisher, J-P. (2011). Nouveaux éclairages sur l'écriture en miroir des enfants de l'école maternelle. *Revue française de pédagogie*, 175, 99-112.
- Fisher, J-P. (2012). L'écriture en miroir. ?. *Cerveau & Psycho*, 52, 54 -59.
- Fuson, K. C., Richards, J., & Briars, D. J. (1982). The acquisition and elaboration of the number word sequence. In C. J. Brainerd (Ed.), *Children's Logical and Mathematical cognition: Progress in Cognitive Developmental Research* (pp. 33-92). New York: Springer-Verlag.
- Gallistel, C. R., and Gelman, R. (2005). Mathematical Cognition. In K Holyoak & R. Morrison (Eds), *The Cambridge handbook of thinking and reasoning*, Cambridge University Press, 23, 559-588.
- Geary, D. C. (2006). Development of mathematical understanding. In D. Kuhl & R. S. Siegler (Vol. Eds.), *Cognition, perception, and language, Vol 2* (pp. 777-810). W. Damon (Gen. Ed.), *Handbook of child psychology* (6 th Ed.). New York: John Wiley & Sons.
- Geary, D. C., Hoard, M. K., Nugent, L., & Byrd-Craven, J. (2008). Development of number line representations in children with mathematical learning disability. *Developmental Neuropsychology*, 33, 277-299.
- Gelman, R., & Gallistel, C.R. (1978). *The child's understanding of number*. Cambridge, MA : Harvard University Press.
- Gelman, R., & Meck, E. (1986). Preschooler's counting: Principles before skills. *Cognition*, 13, 343-359.
- Gilmore, C. K., McCarthy, S. E., & Spelke, E. S. (2007). Symbolic arithmetic knowledge without instruction. *Nature*, 447, 589–591.
- Girelli, L., Lucangeli, D., & Butterworth, B. (2000). The development of automaticity in accessing number magnitude. *Journal of Experimental Child Psychology*, 76, 104-122.
- Guedj, D. (1996). *L'empire des nombres*. Paris : Découvertes Gallimard.
- Gordon, P. (2004). Numerical cognition without words: Evidence from Amazonia. *Science*, 306, 496–499.
- Halberda, J. & Feigenson, L. (2008). Developmental change in the acuity of the "Number Sense": The approximate number system in 3-, 4-, 5-, 6-year-olds and adults. *Developmental Psychology*, 44(5), 1457-1465.
- Halberda, J., Mazzocco, M. & Feigenson, L. (2008). Individual differences in non-verbal number acuity correlate with maths achievement. *Nature*, 455, 665-668.
- Holloway, I. & Ansari, D. (2008) Domain-specific and domain-general changes in children's development of number comparison. *Developmental Science*, 11, 644-649.



- Houdé, O. (1997). Numerical Development: From the Infant to the Child. Wynn's (1992) Paradigm in 2- and 3-year-Olds. *Cognitive Development*, 12, 373-392.
- Houdé, O. (2011). L'intelligence se construit par inhibition. *La Recherche*, 457, 48-51.
- Huntley-Fenner, G., & Cannon, E. (2000). Preschoolers' magnitude comparisons are mediated by a preverbal analog mechanism. *Psychological Science*, 11, 147-152.
- Huntley-Fenner, G. (2001). Children's understanding of number is similar to adults' and rats' : Numerical estimation by 5-7 year-olds. *Cognition*, 78, 27-40.
- 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, 1222-1229.
- Inserm (dir.). *Grande prématurité : Dépistage et prévention du risque*. Rapport. Paris : Les éditions Inserm, 1997, 273 p. - (Expertise collective).  
<http://hdl.handle.net/10608/204>
- Izard, V., Dehaene-Lambertz, G., & Dehaene, S. (2008). Distinct Cerebral Pathways for Object Identity and Number in Human Infants. *PLoS Biol*, 275-285.
- Izard, V., Sann, C., Spelke, E.S., & Streri, A. (2009). Newborn infants perceive abstract numbers. *P.N.A.S*, 106 (25), 10382-10385.
- Jarlegan, A., Fayol, M. & Barrouillet, P. (1996). De soixante douze à 72, et inversement : une étude du transcodage chez les enfants de 7 ans. *Revue de Psychologie de l'Education*, 1, 109-131.
- Jansson-Verkasalo, E., Korpilahti, P., Jantti, V. et al. (2004). Neurophysiologic correlates of deficient phonological representations and objectnaming in prematurely born children. *Clinical Neurophysiology*, 115(1), 179-187.
- Jordan, K. E., Suanda, S. H., & Brannon, E. M. (2008). Intersensory redundancy accelerates preverbal numerical competence. *Cognition*, 108, pp. 210- 221.
- Khomsî, A. (1998). *Evaluation des compétences scolaires aux cycles II*. Paris : Editions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Laplane, D. (2005). *Penser, c'est-à-dire? Enquête neurophilosophique*. Paris : Armand Colin.
- Larroque, B., Ancel, P-Y., Marret, S. et al. (2008). Neurodevelopmental disabilities and special care of 5-year-old children born before 33 weeks of gestation (the EPIPAGE study) : a longitudinal cohort study. *The Lancet* 2008, 371, 813-20.
- Lemer, C. (2003). Acalculies. Un examen rapide (mais réfléchi) du calcul. *Neurologies*, 6, 234 – 239.
- Lemer, C., Dehaene, S., Spelke, E., & Cohen, L. (2003). Approximate quantities and exact number words: Dissociable systems. *Neuropsychologia*, 41, 1942–1958.

- Libertus, M. E., Feigenson, L., & Halberda, J. (2011). Preschool acuity of the approximate number system correlates with school math ability. *Developmental Science, 14*(6), 1292-1300.
- Lipton, J.S., & Spelke, E.S. (2003). Origins of number sense : Large number discrimination in human infants. *Psychological Science, 14*, 396-401.
- Lipton, J. S., & Spelke, E. S. (2004). Discrimination of large and small numerosities by human infants. *Infancy, 5*(3), 271-290.
- Lipton, J.S. & Spelke, E.S. (2005). Preschool children's mapping of number words to nonsymbolic numerosities. *Child Development, 76*(5), 978-988.
- Lipton, J. S., & Spelke, E. S. (2006). Preschool children master the logic of number word meanings. *Cognition, 98*(3), B57-B66
- Lochy, A., & Censabella, S. (2005). Le système symbolique arabe : acquisition, évaluation et pistes rééducatives. In M-P. Noël (Eds), *La dyscalculie* (pp. 77-104). Marseille : Solal.
- Mandler, G., & Shebo, B. J. (1982). Subitizing: An analysis of its component processes. *Journal of Experimental Psychology: General, 111*, 1-22.
- McCloskey, M. (1992). Cognitive mechanisms in numerical processing : Evidence from acquired dyscalculia. *Cognition, 44*, 107-157.
- McCrink, K. & Wynn, K. (2004). Large-number addition and subtraction by 9-month-old infants. *Psychological Science, 15*(11), 776-781
- Mehler, J., & Bever, T.G. (1967). Cognitive capacity of very young children. *Science, 158*, 141-142.
- Miller, K.F., Smith, C.M., Zhu, J. & Zhang, H. (1995). Pre-school origins of cross-national differences in mathematical competence : the role of number-naming system. *Psychological Science, 6*, 56-60.
- Mix, K.S. (1999). Similarity and numerical equivalence appearances count. *Cognitive Development, 14*, 269-297.
- Mix, K.S., Huttenlocher, J. & Levine, S.C. (2002). Multiple cues for quantification in infancy : Is number one of them ? *Psychological Bulletin, 128*, 278-294.
- Moyer, R.S. & Landauer, T.K. (1967). Time required for judgements of numerical inequality. *Nature, 215*, 1519-1520.
- Naccache, L. (2006). *Le nouvel inconscient*. Paris : Odile Jacob.
- Nieder, A., Freedman, D. J., & Miller, E. K. (2002). Representation of the quantity of visual items in the primate prefrontal cortex. *Science, 297*(5587), 1708-1711.

- Noël, M.-P., Palmers, E. (2003). La perception numérique chez le bébé et le petit enfant: une mise en question. *Enfance*, 55, 65-73.
- Nye, J., Fluck, M., & Buckley, S. (2001). Counting and cardinal understanding in children with Down syndrome and typically developing children. *Down Syndrome Research and Practice*, 7(2), 68-78.
- Paterson, S. J. (2001) Language and number in Down syndrome: The complex trajectory from infancy to adulthood. *Down Syndrome Research and Practice*, 7(2), 83-90.
- Pesenti, M., Seron, X., & Noël, M.P. (2000). Les troubles du calcul et du traitement des nombres. In : Seron, X., & Van Der Linden, M. : *Traité de neuropsychologie clinique*, tome 1, Marseille Solal, 355-371.
- Piaget, J. (1992). *Biologie et connaissance. Essai sur les relations entre les régulations organiques et les processus cognitifs*. Gallimard : Paris.
- Piaget, J., & Inhelder, B. (1966). *La psychologie de l'enfant*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Piazza, M., Izard, V., Pinel, P., LeBihan, D., & Dehaene, S. (2004). Tuning curves for approximate numerosity in the human parietal cortex. *Neuron*, 44(3), 547-555.
- Pica, P., Lemer, C., Izard, V., & Dehaene, S. (2004). Exact and approximate arithmetic in an amazonian indigene group. *Science*, 306, 499-503.
- Provasi, J., Bloch, H. & Lequien, P. (2004). Le devenir de l'enfant prématuré. *Sciences Humaines*, 45, 14-17.
- Rousselle, L. & Noël, 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.
- Rousselle, L., Palmers, E. & Noël, M-P. (2004). Magnitude comparison in preschoolers : What counts ? Influence of perceptual variables. *Journal of Experimental Child Psychology*, 87, 57-84.
- Ross, G., Lipper, E., & Auld, P. (1991). Educational status and school-related abilities of very low birth weight premature children. *Pediatrics*, 88 (6), 1125-1134.
- Sarnecka, B., & Carey, S. (2008). How counting represents number: What children must learn and when they learn it. *Cognition*, 108, 662-674.
- Sayeur, M. S., McKerral, M. & Lassonde, M. (2011). Les troubles cognitifs, comportementaux et d'apprentissage chez les enfants nés prématurément : une revue de littérature. *Revista Neuropsicologia Latinoamericana*, 2, 14-22.
- Sekuler, R., & Mierkiewicz, D. (1977). Children's judgements of numerical inequality. *Child Development*, 48, 630-633.
- Seron, X. (2002). *La neuropsychologie cognitive*. Paris : PUF.

- Seron, X., & Fayol, M. (1994). Number transcoding in children : A functional analysis. *British Journal of Developmental Psychology*, *12*, 281-300.
- Simon, T.J.(1999). The foundations of numerical thinking in a brain without numbers. *Trends in Cognitive Sciences*, *3*, 363-364.
- Siegler, R. S., & Opfer, J. E. (2003). The development of numerical estimation : evidence for multiple representations of numerical quantity. *Psychological Science*, *14*, 237-243.
- Starkey , P.(1992). The early development of numerical reasoning. *Cognition*, *43*, 93-126.
- Starkey, P., & Cooper, R.G. (1980). Perception of numbers by human infants. *Science*, *210*, 1033-1035.
- Taylor, H.G., Espy, K.A., & Anderson, P.J. (2009). Mathematics Deficiencies in Children with Very Low Birth Weight or Very Preterm Birth. *Developmental Disabilities Research Reviews*, *15*, 52-59.
- Temple, E., & Posner, M.I. (1998). Brain mechanism of quantity are similar in 5-year-old children and adults. *Proceedings of the National Academy of Sciences (USA)*, *95*, 7836-7841.
- Van Nieuwenhoven, C. (1999). *Le comptage. Vers la construction du nombre*. Paris, Bruxelles : De Boeck Université.
- Van Nieuwenhoven, C., Grégoire, J., & Noel, M.-P. (2001). *TEDI-MATH : Test Diagnostique des Compétences de Base en Mathématiques*. Paris, France : Les Éditions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Verguts, T., & Fias, W. (2004). Representation of number in animal and humans. *Journal of Cognitive Neuroscience*, *16*, 1493–1504.
- Vilette, B. (1994). Des processus de quantification à la cardinalité. *L'Année Psychologique*, *94*, 25 - 44.
- Von Aster, M., & Dellatolas, G. (2006). *ZAREKI-R. Batterie pour l'évaluation du traitement des nombres et du calcul chez l'enfant*. Paris, France : Les Éditions du Centre de Psychologie Appliquée.
- Wynn, K. (1992a). Addition and subtraction in human infants. *Nature*, *358*, 155-193.
- Wynn, K. (1992b). Children's acquisition of the number words and the counting system. *Cognitive Psychology*, *24*, 220-251.
- Whalen, J., Gallistel, C.R., & Gelman, R. (1999). Non-verbal counting in humans: The psychophysics of number representation. *Psychological Science*, *10*, 130-137.
- Xu, F., & Spelke, E.S. (2000). Large number discrimination in 6-month-old infants. *Cognition*, *74*, B1-B11.

## ANNEXES

**Annexe 1** : protocole utilisé pour la passation des épreuves

## Protocole (enfants/adultes)

### 1) Epreuve de mesure de temps de réactions simple :

5 présentations d'étoile

-Consigne : « Tu vas voir apparaître une étoile sur l'écran ; dès que tu la verras, appuie le plus vite possible sur cette touche » (Touche espace marquée d'une gomme rouge)

### 2) Epreuves de comparaison de quantités continues :

#### a) COMPARAISONS REGLETTES : 12 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 noires du clavier. Appuie le plus vite possible sans te tromper ».

Distance : 1cm

P = petit ; G = grand

Image n°	<u>R2 PG2</u>	<u>R2 PG1</u>	<u>R3 PG4</u>	<u>R2 PG3</u>	<u>R2 PG5</u>	<u>R3 PG6</u>
PG	4,5 vs 5,5	4,7 vs 5,7	5 vs 6	5,3 vs 6,3	5,5 vs 6,5	6 vs 7
Image n°	<u>R2 GP1</u>	<u>R3 GP2</u>	<u>R3 GP3</u>	<u>R3 GP5</u>	<u>R2GP 4</u>	<u>R2 GP6</u>
GP	5,5 vs 4,5	5,7 vs 4,7	6 vs 5	6,3 vs 5,3	6,5 vs 5,5	7 vs 6

Ordre aléatoire de passation

1) R3 GP5	2) R2 PG 5	3) R2 PG 2	4) R3 GP3	5)R2 GP1	6)R3 GP2
7)R2 PG 1	8)R3 PG 6	9)R3 PG 4	10)R2 PG 3	11)R2 GP6	12)R2 GP4
13) R3 GP5	14) R2 PG 5	15) R2 PG 2	16) R3 GP3	17)R2 GP1	18)R3 GP2
19)R2 PG 1	20)R3 PG 6	21)R3 PG 4	22)R2 PG 3	23)R2 GP6	24)R2 GP4

#### b) COMPARAISONS CERCLES : 36 Items

-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 noires du clavier. Appuie le plus vite possible sans te tromper ».

<b>Dist /n°</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>C1 PG</b>	5 vs 5,5	5,5 vs 6	6 vs 6,5	6,5 vs 7	7 vs 7,5	7,5 vs 8
<b>C1 GP</b>	5,5 vs 5	6 vs 5,5	6,5 vs 6	7 vs 6,5	7,5 vs 7	8 vs 7,5

<b>Dist /n°</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>C2 PG</b>	5 vs 6	5,5 vs 6,5	6 vs 7	6,5 vs 7,5	7 vs 8	7,5 vs 8,5
<b>C2 GP</b>	6 vs 5	6,5 vs 5,5	7 vs 6	7,5 vs 6,5	8 vs 7	8,5 vs 7,5

<b>Dist /n°</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>
<b>C3 PG</b>	5 vs 6,5	5,5 vs 7	6 vs 7,5	6,5 vs 8	7 vs 8,5	7,5 vs 9
<b>C3 GP</b>	6,5 vs 5	7 vs 5,5	7,5 vs 6	8 vs 6,5	8,5 vs 7	9 vs 7,5

**Ordre (aléatoire) de passation pour épreuves de comparaisons cercles**

1) C3 GP5	2) C1 GP3	3) C3 GP4	4) C2 PG5	5) C3 PG3	6) C2 PG2
7) C3 GP3	8) C1 PG5	9) C3 PG5	10)C1 PG6	11)C3 PG1	12)C2 GP3
13)C2 GP1	14)C1 PG3	15)C3 GP2	16)C1 GP6	17)C1 PG1	18)C2 PG1
19)C3 GP1	20)C1 PG2	21)C3 PG6	22)C2 GP2	23)C1 GP1	24)C3 PG4
25)C2 PG3	26)C3 PG2	27)C2 GP6	28)C1 GP5	29)C1 GP2	30)C3 GP6
31)C2 PG6	32)C2 GP4	33)C1 PG4	34)C2GP5	35)C2 PG4	36)C1 GP4

**Evaluation triple – code**

Présentation des 44 items de la partie expérimentale (22 x 2) valable pour chacune des deux modalités analogiques (jetons et surfaces) et des deux modalités symboliques (verbal et chiffres arabes).

	items en ordre G/F		items en ordre F/G	
1	1vs4g	4vs1g	1vs4f	4vs1f
2	1vs3g	3vs1g	1vs3f	3vs1f
3	1vs2g	2vs1g	1vs2f	2vs1f
4	2vs3g	3vs2g	2vs3f	3vs2f
5	3vs4g	4vs3g	3vs4f	4vs3f
6	2vs4g	4vs2g	2vs4f	4vs2f
7	4vs6g	6vs4g	4vs6f	6vs4f
8	6vs8g	8vs6g	6vs8f	8vs6f
9	3vs6g	6vs3g	3vs6f	6vs3f
10	6vs9g	9vs6g	6vs9f	9vs6f
11	9vs12g	12vs9g	9vs12f	12vs9f

**Ordre de présentation des items pour chacune des modalités**

1	1vs4g	23	3vs6f
2	1vs3f	24	6vs9g
3	3vs1f	25	12vs9g
4	1vs3g	26	8vs6f
5	1vs4f	27	3vs2f
6	4vs1f	28	2vs4f
7	3vs1g	29	4vs6g
8	4vs1g	30	4vs3f
9	3vs2g	31	1vs2g
10	2vs4g	32	6vs3g
11	4vs6f	33	9vs6g
12	4vs3g	34	9vs12g
13	1vs2f	35	6vs8f
14	6vs3f	36	2vs3g
15	9vs6f	37	4vs2g
16	9vs12f	38	6vs4g
17	6vs8g	39	3vs4g
18	2vs3f	40	2vs1f
19	4vs2f	41	3vs6g
20	6vs4f	42	6vs9f
21	3vs4f	43	12vs9f
22	2vs1g	44	8vs6g



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

ratio distance	1/4 (0,25)	1/3 (0,33)	1/2 (0,5)	2/3 (0,66)	3/4 (0,75)
1			1 vs 2	2 vs 3	3 vs 4
2		1 vs 3	2 vs 4	4 vs 6	6 vs 8
3	1 vs 4		3 vs 6	6 vs 9	9 vs 12

**Les 8 premiers items de toutes les épreuves de comparaison 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.**

### **3) Epreuves de comparaison :**

#### **a) Epreuve de comparaisons de quantités discrètes (jetons):**

- Présentation de l'item 1 vs 4 g
- Consigne : "*Voici les deux enfants, le garçon et la 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 noires du clavier ? Appuie le plus vite possible sans te tromper*".
- Présentation de la suite des items.

#### **b) Epreuve de surfaces rectangles (contrôle de la densité):**

- Présentation de l'item 1 vs 4 g
- 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 noires du clavier. Appuie le plus vite possible sans te tromper*".

- Présentation de la suite des items.

c) Epreuve de comparaisons de quantités présentées sous forme de numéraux oraux (évaluation de la représentation auditive verbale) :

- Ouverture de l'image

- Utilisation de 6 items supplémentaires d'exemple (8 vs 3 ; 2 vs 9 ; 3 vs 10 ; 3 vs 8 ; 9 vs 2 ; 10 vs 3).

- Enoncé par l'expérimentateur de la consigne : *"Si je donne n bonbons au garçon (montrer) et p bonbons à la fille (montrer) , peux-tu me montrer qui en aura le plus ? Montre-moi le plus vite possible sans te tromper "* pour les items 8 vs 3 ; 2 vs 9 ; 3 vs 10.

- Pour les 3 items suivants (3 vs 8 ; 9 vs 2 ; 10 vs 3), ne plus dire la phrase et expliquer que le premier nombre correspond à l'image de gauche et le second à celle de droite.

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

d) Epreuve de comparaisons de quantités présentées en chiffres arabes (évaluation de la représentation visuelle arabe) :

- Présentation de l'item 1 vs 4 g

-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 noires du clavier ? Appuie le plus vite possible sans te tromper "*.

-Présentation de la suite des items.

**4) Epreuve de mesure de temps de réactions simple :**

5 présentations d'étoile

-Consigne : *«Tu vas voir apparaître une étoile sur l'écran ; dès que tu la verras, appuie le plus vite possible sur cette touche »* (Touche espace marquée d'une gommette rouge)