



MEMOIRE présenté pour l'obtention du
CERTIFICAT DE CAPACITE D'ORTHOPHONISTE

Par

BATILLY Lydie
DENEDNIA Meriem

SELECTION ET EXECUTION STRATEGIQUES
EN ESTIMATION NUMERIQUE CHEZ DES ENFANTS
DE 10 ET 12 ANS

Maître de Mémoire

LEMAIRE Patrick

Membres du Jury

TIRABOSCHI-CHOSSON Christine

METRAL Emmanuelle

OLLAGNON Pascale

Date de Soutenance

03 juillet 2008

ORGANIGRAMMES

1. Université Claude Bernard Lyon1

Président
Pr. COLLET Lionel

Vice-président CEVU
Pr. SIMON Daniel

Vice-président CA
Pr. LIETO Joseph

Vice-président CS
Pr. MORNEX Jean-François

Secrétaire Général
M. GAY Gilles

1.1. Secteur Santé :

U.F.R. de Médecine Lyon Grange
Blanche
Directeur
Pr. MARTIN Xavier

U.F.R. d'Odontologie
Directeur
Pr. ROBIN Olivier

U.F.R. de Médecine Lyon R.T.H.
Laennec
Directeur
Pr. COCHAT Pierre

Institut des Sciences Pharmaceutiques
et Biologiques
Directeur
Pr. LOCHER François

U.F.R. de Médecine Lyon-Nord
Directeur
Pr. ETIENNE Jérôme

Institut des Sciences et Techniques de
Réadaptation
Directeur
Pr. MATILLON Yves

U.F.R. de Médecine Lyon-Sud
Directeur
Pr. GILLY François Noël

Département de Formation et Centre
de Recherche en Biologie Humaine
Directeur
Pr. FARGE Pierre

1.2. Secteur Sciences :

Centre de Recherche
Astronomique de Lyon -
Observatoire de Lyon
Directeur
M. GUIDERDONI Bruno

I.S.F.A. (Institut de Science Financière
et D'assurances)
Directeur
Pr. AUGROS Jean-Claude

U.F.R. Des Sciences et
Techniques des Activités
Physiques et Sportives
Directeur
Pr. COLLIGNON Claude

U.F.R. de Génie Electrique et des
Procédés
Directeur
Pr. CLERC Guy

U.F.R. de Physique
Directeur
Mme FLECK Sonia

U.F.R. de Chimie et Biochimie
Directeur
Pr. PARROT Hélène

U.F.R. de Biologie
Directeur
Pr. PINON Hubert

U.F.R. des Sciences de la Terre
Directeur
Pr. HANTZPERGUE Pierre

I.U.T. A
Directeur
Pr. COULET Christian

I.U.F.M.
Directeur
M. BERNARD Régis

I.U.T. B
Directeur
Pr. LAMARTINE Roger

Institut des Sciences et des
Techniques de l'Ingénieur de Lyon
Directeur
Pr. LIETO Joseph

U.F.R. De Mécanique
Directeur
Pr. BEN HADID Hamda

U.F.R. De Mathématiques
Directeur
Pr. GOLDMAN André

U.F.R. D'informatique
Directeur
Pr. AKKOUCHE Samir

2. Institut Sciences et Techniques de Réadaptation FORMATION ORTHOPHONIE

Directeur I.S.T.R.
Pr. MATILLON Yves

Directeur de la formation
Pr. TRUY Eric

Directeur des études
BO Agnès

Directeur de la recherche
Dr. WITKO Agnès

Responsables de la formation clinique
PERDRIX Renaud
MORIN Elodie

Chargée du concours d'entrée
PEILLON Anne

Secrétariat de direction et de scolarité
BADIOU Stéphanie
CLERC Denise

REMERCIEMENTS

Nous tenons tout d'abord à remercier notre maître de mémoire, Mr. Patrick Lemaire, pour nous avoir donné la possibilité de participer à son programme de recherche, et pour avoir toujours répondu à nos sollicitations avec rapidité et clarté.

Nous remercions également Delphine Gandini pour sa gentillesse et son aide précieuse concernant aussi bien le protocole expérimental que l'analyse statistique.

Ensuite, nous remercions les directeurs et enseignants des écoles qui nous ont accueillies, et surtout les enfants pour leur participation et leur patience.

Lydie et Meriem

Je remercie mon conjoint pour son support, sa patience et son énorme travail de relecture. Merci également à mes parents et mes frères et sœurs pour leur soutien moral et leur joie de vivre.

Lydie

Je remercie du fond du cœur tous ceux qui m'ont aidée et soutenue. Je remercie particulièrement ma mère et mon conjoint pour m'avoir comprise et épaulée depuis le début, pour leur aide morale et matérielle. Merci à Maman pour sa disponibilité auprès de ses petits-enfants, pour tout l'amour et la compréhension qu'elle nous a témoignés, et à Schéhérazade ma petite sœur adorée.

Je dédie ce travail à mes enfants : Léo, Lucas, Mathéo, et mes nièces, Lisa et Orane, ainsi qu'à ma grand-mère.

Meriem

SOMMAIRE

ORGANIGRAMMES	2
REMERCIEMENTS	5
SOMMAIRE	6
INTRODUCTION	9
PARTIE THEORIQUE	11
I. GENERALITES SUR L'ESTIMATION.....	12
II. COMPETENCES IMPLIQUEES DANS L'ESTIMATION	14
III. ESTIMATION DE NUMEROSITE	19
PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES	23
PARTIE EXPERIMENTALE	26
I. PROTOCOLE EXPERIMENTAL	27
II. POPULATION	27
III. MATERIEL	28
IV. PROCEDURE EXPERIMENTALE.....	30
V. EXPERIMENTATION TEST	35
PRESENTATION DES RESULTATS	37
I. SELECTION STRATEGIQUE	38
II. EXECUTION STRATEGIQUE	40
III. PERFORMANCES DES SUJETS DYSLEXIQUES	42
DISCUSSION DES RESULTATS	46
I. LIMITES DE L'EXPERIMENTATION	47
II. VALIDATION DES HYPOTHESES.....	49
III. DEVELOPPEMENT DES PISTES DE REFLEXION.....	52
IV. SUJETS DYSLEXIQUES	61
V. APPORTS POUR LA PRATIQUE ORTHOPHONIQUE	63
CONCLUSION	65
BIBLIOGRAPHIE	66

GLOSSAIRE	71
ANNEXES	72
ANNEXE I : MODELE DE MCCLOSKEY	73
ANNEXE II : FEUILLE DE PASSATION DU TEST DES CLOCHES.....	74
ANNEXE III : ETALONNAGE DU TEST DES CLOCHES.....	75
ANNEXE IV : FEUILLE D'EXEMPLES DE GRILLES.....	76
ANNEXE V : FICHES DE NOTATION.....	77
ANNEXE VI : TABLEAUX DE RESULTATS STATISTIQUES	79
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	87
TABLE DES MATIERES	89

INTRODUCTION

La rééducation des troubles logico-mathématiques et du raisonnement fait partie du champ de compétences de l'orthophoniste, au même titre que celle des troubles du langage et de la communication. Il nous semblait important dans notre pratique de considérer un individu dans sa globalité, et dans cette approche, d'explorer tous les aspects de la cognition, quelles que soient les manifestations de surface observées. Dans cette optique, nous avons souhaité approfondir le domaine logico-mathématique, pour lequel nous avons peu de connaissances. Nous avons alors rencontré le Professeur Patrick Lemaire, chercheur en Psychologie Cognitive au CNRS de Marseille, qui nous a proposé de nous intégrer dans son programme de recherche sur la quantification approximative, aussi appelée estimation.

Selon Camos (2006, p. 74), « *les processus de quantification sont [...] fondamentaux. Ils consistent à déterminer la numérosité d'un ensemble d'objets. Trois processus de quantification ont été distingués : le dénombrement, le subitizing et l'estimation.* » Les deux premiers permettent un comptage exact. Cependant, le subitizing ne concerne que les petites quantités alors que le dénombrement n'a pas de limitation de numérosité. Ces trois processus, bien qu'indépendants (Piazza, 2007), entretiennent des relations de complémentarité les uns avec les autres.

L'habileté la moins étudiée est la quantification approximative. Pourtant, il s'agit d'une habileté essentielle dans la vie de tous les jours, aussi bien chez les adultes que chez les enfants. Nous nous en servons par exemple pour estimer le temps qu'il nous faudra pour rentrer chez nous, le poids d'un objet, la distance entre deux points, ou encore le nombre de personnes dans une pièce. Selon le cas, différents types d'estimation pourront être utilisés, en particulier l'estimation numérique.

Comme pour toute tâche cognitive, plusieurs compétences développementales sont impliquées dans les processus de quantification approximative : la compréhension du concept d'estimation, la perception du stimulus, la représentation des magnitudes, la mémoire et les compétences numériques.

L'estimation numérique a fait l'objet de quelques études chez les adultes qui ont permis de mettre en évidence les phénomènes suivants. Tout d'abord, les participants possèdent plusieurs stratégies leur permettant d'effectuer une tâche d'estimation. De plus, grâce à ce répertoire, ils peuvent choisir la stratégie la plus adaptée en fonction des caractéristiques

physiques des items à quantifier, mais aussi de la disposition des éléments dans la collection.

Chez les enfants, nous connaissons peu de choses sur le développement de cette habileté. Nous savons qu'ils possèdent le même répertoire stratégique que les adultes. Cependant, nous ignorons comment des enfants d'âge différent exécutent (avec quels niveaux de rapidité et de précision) ces stratégies, et comment ils les sélectionnent sur chaque problème. Nous ignorons encore davantage comment évoluent, avec l'âge, ces différentes dimensions stratégiques. Or, ces dimensions sont cruciales au cours du développement cognitif et nous nous proposons donc de les traiter dans cette étude.

Chapitre I
PARTIE THEORIQUE

I. GENERALITES SUR L'ESTIMATION

1. Définition de l'estimation

La définition la plus concise que nous avons trouvée dans la littérature nous est proposée par Siegler et Booth (2005, p.198) : « *Estimation is a process of translating between alternative quantitative representations, at least one of which is inexact* ». ¹

De plus, Pesenti (2001, p.103) précise les contraintes qui amènent à utiliser ce processus :

« Lorsque la taille de la collection à quantifier est trop importante et/ou que le temps disponible est insuffisant pour réaliser la quantification par dénombrement, une réponse approximative peut néanmoins être donnée. On appelle estimation globale le processus mis en jeu dans de telles circonstances ».

2. Différents types d'estimation

Il existe différents types d'estimation, selon la nature des représentations quantitatives en jeu (*i.e.* qu'elles soient numériques ou non).

Les formes les plus prototypiques de l'estimation sont numériques, c'est à dire qu'au moins une des deux parties de la translation implique l'utilisation de nombres. Parmi ces tâches nous pouvons citer :

- l'estimation computationnelle, qui est la translation d'une représentation numérique en une autre (*ex.* : 75x29 correspond à environ 2200),
- l'estimation de numérosité, qui correspond à la translation d'une représentation quantitative non numérique en un nombre (*ex.* : estimer le nombre de perles dans un bocal),
- et enfin l'estimation sur ligne des nombres qui est la translation d'un nombre en une position spatiale sur une ligne ou inversement.

¹ « L'estimation est un processus de translation entre des représentations quantitatives alternatives, dont au moins une est inexacte »

Certaines de ces tâches peuvent demander des connaissances antérieures sur l'objet à quantifier, comme par exemple la connaissance des unités de mesure (*ex.* : estimer la distance à laquelle se trouve un véhicule, ou le poids d'un objet), ou encore la connaissance d'entités du monde réel (*ex.* : estimation de la population d'un pays, du nombre de personnes touchées par une maladie).

L'estimation non numérique quant à elle implique qu'aucune des deux parties de la translation ne soit numérique (*ex.* : traduire la luminosité d'une ampoule en une position spatiale sur une ligne). C'est un processus qui est utilisé bien moins fréquemment dans la vie quotidienne que les tâches d'estimation numérique décrites précédemment.

3. Apport du subitizing

Le subitizing correspond au processus qui permet de déterminer très rapidement et avec exactitude la numérosité de petites collections.

De nombreux modèles proposés attribuent l'émergence de ce processus au système perceptif humain et aux capacités de la mémoire à court terme. Dans ces hypothèses, l'accent est mis sur la faible densité spatiale et sur le caractère canonique de la collection présentée. Ces modèles insistent également sur le lien sémantique entre l'étiquette verbale et la configuration spatiale perceptive, lien qui est appris dès le plus jeune âge. Enfin ils mettent en avant les caractéristiques de la mémoire visuo-spatiale à court terme permettant la prise d'indices dans la configuration présentée. Cette dernière est ensuite appariée à une représentation en mémoire à long terme.

Les modèles pré-attentionnels attribuent l'émergence du subitizing à des mécanismes attentionnels de traitement visuel des stimuli fonctionnant de manière parallèle. Citons parmi d'autres le modèle FINST [FINgers of INSTanciation] (Trick & Pylyshyn, 1993, cités par Pesenti, 2001) qui introduit la notion de pointeurs mentaux.

Enfin, d'autres modèles explicatifs attribuent l'émergence du subitizing aux mécanismes de dénombrement qui est rapide pour de petites numérosités et lent pour les plus importantes (Gallistel & Gelman, 1992).

Toutefois, quels que soient les modèles ou hypothèses avancés, on considère aujourd'hui que l'empan du subitizing est de 4 éléments, au-delà desquels d'autres procédures de quantification sont sollicitées (le dénombrement ou l'estimation). Dans ce cas, des

collections supérieures à l'empan du subitizing pourraient être estimées par addition de plusieurs quantités subitisées (Van Oeffelen & Vos, 1982).

II. COMPETENCES IMPLIQUEES DANS L'ESTIMATION

1. Compréhension du concept d'estimation

La première compétence nécessaire pour réussir une tâche d'estimation est la compréhension du concept d'estimation. En effet, le sujet doit comprendre que l'objectif d'une estimation est de donner une réponse relativement proche numériquement de la valeur exacte. Selon Sowder et Wheeler (1989), les enfants auraient tendance à voir l'estimation comme une procédure algorithmique rigide nécessitant de suivre des règles préétablies.

Selon ces auteurs, trois concepts sont donc essentiels à saisir pour mener à bien une tâche d'estimation :

- le rôle des nombres approximatifs dans l'estimation,
- l'implication de nombreux processus dans l'estimation et donc le grand nombre de réponses acceptables,
- et enfin l'influence du contexte numérique sur le caractère approprié ou non d'une estimation.

2. Perception du stimulus

La théorie de la Gestalt en tant que théorie générale sur la perception de l'environnement a largement inspiré les recherches visant à comprendre les mécanismes de perception humaine, notamment visuelle.

Ainsi, les tâches d'estimation suivraient certaines lois qui s'imposent au sujet lorsqu'il perçoit le stimulus, et dont le principe de base est que « *le tout* » est perçu avant « *la partie* ». Ainsi, conformément à la loi principale de la bonne forme, il est affirmé qu'un ensemble de parties informes tel que des groupements aléatoires de points tend à être perçu d'abord et automatiquement comme une forme qui se veut simple, symétrique, stable, en somme une « *bonne forme* ».

Cette hypothèse implique d'autres facteurs d'influence : la régularité (par exemple la symétrie d'une collection de points), la continuité (à savoir un groupe unique d'éléments), la proximité des stimuli entre eux, la similitude des éléments et la loi de clôture.

Cependant, selon Ginsburg et Nicholls (1988), il conviendrait d'ajouter deux autres facteurs : le temps dont dispose le sujet pour percevoir et la distance du sujet par rapport à l'objet perçu.

3. Représentation des magnitudes

Le modèle de McCloskey (McCloskey, Caramazza, & Basili, 1985, cités par Seron & Pesenti, 2000) propose une architecture fonctionnelle des activités numériques (voir Annexe 1). Cette architecture est composée de plusieurs modules fonctionnellement indépendants : un système de compréhension, un système de production, un système comprenant les mécanismes du calcul proprement dit, et pour finir un système de représentation abstraite propositionnelle (sémantique) sous-jacent à ces mécanismes.

À la suite des travaux de McCloskey, Dehaene (1992) a ajouté un nouvel ensemble modulaire qui tient compte des activités numériques de quantification reposant sur la comparaison des nombres, l'appréhension immédiate (subitizing) et les approximations. D'après l'auteur, la représentation des quantités existerait également sous une forme analogique. C'est à partir de cette hypothèse qu'il a conceptualisé une nouvelle architecture fonctionnelle pour le traitement des nombres et du calcul, en y introduisant la notion de triple code : un code visuel arabe, un code verbal auditif et un code analogique. Ce dernier autorise les comparaisons numériques, les approximations et l'appréhension immédiate de la valeur d'un nombre. Il pourrait aussi servir de base pour les mathématiques formelles (Barth & *al.*, 2006).

La précision et la rapidité des réponses dans des tâches d'estimation numérique sont donc fortement reliées au type de représentation que le sujet a des magnitudes. Il est aujourd'hui prouvé que cette représentation des quantités numériques peut être symbolisée par une ligne mentale, sur laquelle les nombres seraient répartis en un continuum (voir De Hevia, Girelli, & Vallar, 2006, pour des résultats récents).

Dans notre système décimal, la chaîne numérique est linéaire ; la différence entre nombres consécutifs est toujours la même. Il paraîtrait donc évident que notre représentation des magnitudes soit linéaire elle aussi. Or Moyer et Landauer (1967, cités

par Seron & Pesenti, 2000) ont montré qu'il existait au moins deux effets contredisant cette intuition : l'effet de distance (plus un nombre est grand et moins sa représentation mentale est précise) et l'effet de grandeur (plus les nombres à comparer sont grands, plus il devient difficile de les discriminer les uns des autres). Ces résultats suggèrent donc une représentation logarithmique de notre ligne numérique mentale.

En 1995, Siegler élabora un modèle théorique qu'il appela « *overlapping waves theory* » pour rendre compte de la variabilité importante des comportements stratégiques. Cette théorie évolutionniste du développement diffère de la théorie piagétienne des stades dans le sens où elle postule que les individus connaissent et utilisent simultanément de multiples stratégies et représentations (voir Figure 1).

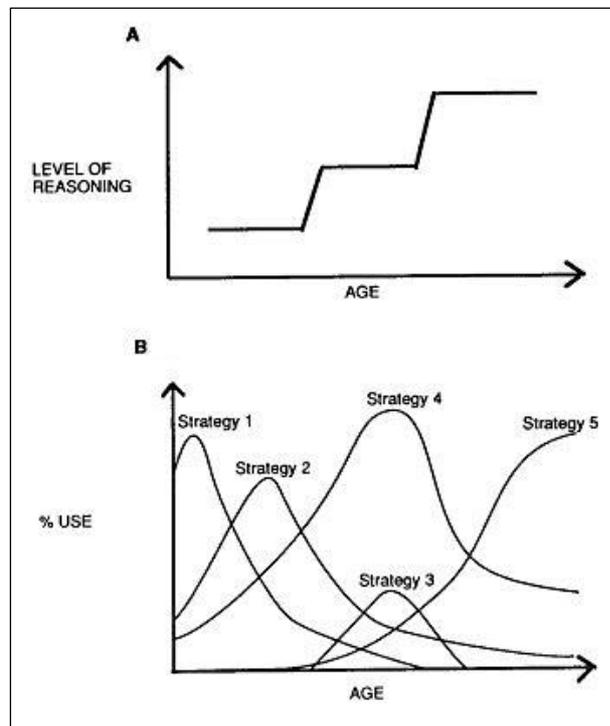


Figure 1 : Deux Représentations Schématiques du Changement. Issu de Siegler, 1995.

(A) Modèle Classique des Stades. (B) « Overlapping Waves Theory »

S'appuyant sur cette théorie, Siegler et Booth ont démontré en 2004 que notre représentation des magnitudes numériques ne serait ni linéaire ni logarithmique mais l'une ou l'autre selon notre âge et l'intervalle numérique concerné. Ainsi, des élèves de 6 ans pouvaient à la fois avoir une représentation linéaire pour l'intervalle [0 ; 100] et une représentation logarithmique pour l'intervalle [0 ; 1000]. (voir aussi Opfer & Siegler, 2004, 2007, Siegler & Opfer, 2003)

L' « *overlapping waves theory* » a permis à Lemaire et Siegler (1995) d'élaborer un cadre conceptuel d'analyse, en combinant la méthode des protocoles verbaux et la mesure des performances, afin de mieux rendre compte de la diversité des stratégies et de leur évolution. D'après ce cadre conceptuel, il existe trois dimensions stratégiques principales à analyser dans toute tâche cognitive :

- le répertoire stratégique, qui constitue l'ensemble des stratégies dont dispose l'enfant à un moment donné pour résoudre un problème, et la fréquence d'utilisation de chacune de ces stratégies,
- la sélection stratégique, qui correspond à l'ensemble des mécanismes par lesquels l'enfant opère un choix stratégique particulier en fonction d'un problème donné,
- l'exécution stratégique, qui réfère aux caractéristiques quantitatives d'une stratégie en termes de rapidité et de précision.

4. Mémoire de travail et mémoire à long terme

Quelles que soient la tâche d'estimation et la stratégie utilisée, la mémoire à long terme et la mémoire de travail sont fortement sollicitées.

D'une part, comme nous l'avons montré plus haut, le système de traitement des nombres est composé en partie de données stockées dans notre mémoire à long terme : les représentations numériques abstraites, les faits arithmétiques et les procédures de calcul. Selon Dehaene (1997b, p.74), « *whenever we see a digit, its quantitative representation is immediately retrieved* »². Il en est de même pour toutes les modalités d'entrée dans le code analogique, qu'elles soient visuelles (arabes ou verbales) ou auditives. Ainsi, dans certaines tâches d'estimation numérique, le sujet récupère directement dans sa mémoire à long terme les représentations mentales proches de la collection à estimer.

Il est nécessaire de noter cependant que l'enfant peut moins aisément que l'adulte récupérer les faits arithmétiques ou les représentations numériques mentales stockées en mémoire à long terme, car leur traitement est plus récent. Les représentations numériques associées à des « mots-nombres » donnés, comme des configurations de doigts ou des points, sont progressivement acquises par l'enfant. Pour Dessailly (1992, p.158) les

² « Lorsque l'on voit un nombre en écriture arabe, sa représentation quantitative est immédiatement récupérée en mémoire. »

« *représentations fixes [...], par leur forme structurée, sont susceptibles de faciliter la mise en mémoire d'une empreinte stable* ». car elles peuvent être associées entre elles sans utiliser le dénombrement. Cela permettra à l'enfant de progresser dans le calcul. Les stratégies de récupération en mémoire à long terme sont présentes dès la maternelle en particulier pour les doubles (Geary & Burlingham-Dubree, 1989, cité par Bideaud, Lehalle & Vilette, 2003) et sont prédominantes chez l'adulte et l'enfant pour les faits multiplicatifs, ceux-ci ayant fait l'objet d'un apprentissage par cœur à l'école. (Lefèvre et al., 1996, cités par Bideaud et al., 2003).

D'autre part, la mémoire de travail détient aussi une part active dans les tâches d'estimation, part d'autant plus importante que l'enfant est jeune. Pour rappel, la mémoire de travail telle qu'elle est modélisée par Baddeley (1986) comprend un système superviseur : l'administrateur central et deux sous-systèmes esclaves : la boucle phonologique (elle-même composée de stock phonologique et de la récapitulation articulatoire) et le calepin visuo-spatial.

Chez l'adulte de nombreux travaux ont montré l'implication de la mémoire de travail. La boucle phonologique interviendrait dans les situations de simple dénombrement (Logie & Baddeley, 1987, cités par Noël, 2001) et dans le maintien temporaire des termes du problème initial. L'administrateur central interviendrait dans la réalisation de calculs mentaux complexes, et dans la gestion des reports (voir Noël, Désert, Aubrun, & Seron, 2001 pour une revue des résultats récents).

Ainsi, dans une tâche d'estimation numérique réalisée par la stratégie d'ancrage ou de décomposition-recomposition, le sujet doit mobiliser sa mémoire visuo-spatiale afin de ne pas prendre en compte les éléments déjà pointés, en garder une trace, puis doit effectuer un calcul mental impliquant la boucle phonologique et l'administrateur central. Pour les petits calculs, les faits arithmétiques sont récupérés directement en mémoire à long terme.

Les études d'Adams et Hitch (1998) et de Klein et Bisanz (2000) (cités par Noël, 2004) ont démontré que les résultats en calcul chez les enfants sont fortement limités par leurs capacités de mémoire de travail. Cependant, d'autres études permettraient de déterminer plus précisément le rôle de chaque composante impliquée dans les différentes tâches numériques et d'en suivre l'évolution au cours du développement de l'enfant (voir Gaonac'h & Pross, 2005, pour un résumé).

5. Compétences numériques

Selon Brissiaud (2003, cité par Bideaud & *al.*, 2003, p.245),

« Deux composantes sont à la base du calcul arithmétique : la pratique du comptage et l'usage de collections témoins organisées. Ces deux activités numériques sont nécessaires pour permettre aux enfants d'accéder au calcul mental. ».

Pour mener à bien une tâche d'estimation, l'enfant doit avoir acquis les principes universels du dénombrement tels que définis par Gelman et Gallistel (1978), à savoir : la correspondance terme à terme d'éléments, le principe de cardinalité, de bijection, d'ordre stable et de non pertinence de l'ordre. Ces principes sont sous-tendus par deux habiletés de base qui se coordonnent entre elles, la connaissance de la chaîne numérique et le pointage visuel ou verbal des éléments.

Il doit également être capable d'effectuer des calculs simples en accédant directement à la réponse en mémoire à long terme sans devoir effectuer l'opération, ce qui correspond à une connaissance des faits arithmétiques.

Il a aussi été démontré que les compétences des enfants en estimation étaient corrélées positivement avec le QI (Reys, Rybolt, Bestgen, & Wyatt, 1982, cités par Siegler & Booth, 2005), et avec de nombreuses mesures des compétences mathématiques issues par exemple d'évaluations scolaires nationales (Siegler & Booth, 2004 ; Dowker, 2003).

Enfin, chez les adolescents, le niveau d'efficiency dans les tâches de comptage à l'endroit, à l'envers, et par 7, serait un excellent prédicteur des performances dans les tâches d'estimation de collections importantes de points (Newman & Berger, 1984, cités par Booth & Siegler, 2006).

III. ESTIMATION DE NUMEROSITE

L'étude que nous avons choisi de mener concerne l'estimation de numérosité. Toutes les compétences citées précédemment sont donc impliquées dans la tâche que nous avons demandé d'effectuer aux participants de notre expérimentation. Il nous paraît important de compléter cette partie théorique par quelques points spécifiques ne concernant que l'estimation de numérosité.

1. Stratégies et performances des adultes

Différentes stratégies sont mises en place par les sujets pour réaliser des tâches d'estimation numérique.

Luwel, Verschaffel, Onghena et De Corte (2003) ont montré chez l'adulte la présence de trois types de stratégies de quantification approximative :

- la stratégie d'addition : les sujets comptent exactement ou approximativement des blocs et ajoutent ensuite ces blocs entre eux. Cette stratégie est utilisée préférentiellement aux autres pour les faibles numérosités car elle demande moins de ressources cognitives,
- la stratégie de soustraction : les sujets soustraient le nombre de cases vides au nombre de cases dans la grille. Cette stratégie est utilisée préférentiellement aux autres sur les grandes numérosités, et son utilisation augmente avec l'âge,
- la stratégie d'estimation : les sujets devinent le nombre de blocs.

Gandini (2007) a précisé ces résultats et a montré la présence chez l'adulte jeune et âgé d'au moins cinq stratégies principales dans une tâche d'estimation du nombre de points dans une grille :

- la stratégie de benchmark (ou stratégie d'estimation perceptive) : les sujets scannent visuellement le stimulus, retrouvent une représentation numérique en mémoire à long terme, comparent la différence entre la représentation du stimulus et celle retrouvée en mémoire et ajustent leur réponse en fonction de cette différence,
- la stratégie d'ancrage : les sujets énumèrent quelques points par comptage, estiment visuellement le nombre de points restant à partir de ce comptage et additionnent le nombre compté à celui estimé,
- la stratégie de décomposition/recomposition : les sujets repèrent un groupe de points par subitizing (jusqu'à 4 à 5 points), estiment le nombre de groupes identiques puis multiplient le nombre de points subitisé avec le nombre de groupes de points estimé,
- le comptage approximatif : les sujets perçoivent plusieurs groupes de différentes tailles et les additionnent approximativement pour produire leur estimation finale,

- le comptage exact : les sujets comptent tous les points de la grille en additionnant systématiquement tous les items.

D'une manière générale, la précision des estimations de numérosité augmente lentement avec l'âge. Les estimations d'un nombre d'objets discrets par des adultes sont plus précises que celles d'enfants de 11 à 14 ans, elles-mêmes plus précises que celles d'enfants de 7 à 11 ans (Siegel, Goldsmith & Madson, 1982, cités par Gandini, 2007). Des résultats similaires ont été observés pour des stimuli bidimensionnels (estimation du nombre de points dans une grille) (Luwel, Verschaffel, Onghena, & De Corte, 2000, cités par Gandini, 2007).

Concernant l'adulte, les travaux font état des manifestations suivantes. D'abord, les participants utilisent les caractéristiques physiques des items à quantifier. Ainsi, lorsque les objets à quantifier sont de grande taille, les participants ont tendance à surévaluer leur nombre dans une collection (Ginsburg & Nicholls, 1988). De même, lorsque deux collections d'items de même numérosité occupent une surface différente, celle occupant une surface plus grande sera jugée plus nombreuse (Bevan, Maier, & Helson, 1963), ou encore celle ayant la plus forte densité (Allik & Tuulmets, 1991). Par ailleurs, les participants sont influencés par la disposition des éléments dans la collection. Ainsi, leurs réponses sont plus précises et plus rapides pour estimer le nombre d'éléments dans une collection organisée de manière canonique que dans une collection où les éléments sont disposés aléatoirement, c'est la « *regular-random numerosity illusion* » (Ginsburg, 1978, 1991). De plus, pour une même numérosité, la collection serait jugée plus nombreuse si elle est composée de plusieurs petits groupes de points que si elle est composée d'un grand groupe, c'est « *l'illusion du solitaire* » (Frith & Frith, 1972).

Certains chercheurs comme Van Oeffelen et *al.* (1982) ont cherché à décrire mathématiquement la manière dont le cerveau humain perçoit des arrangements de points, et comment il les divise en groupes de points. Ils ont ainsi créé un algorithme baptisé CODE en se basant entre autres sur la théorie de la Gestalt (Koffka, 1935) et en particulier sur le principe de proximité.

D'autres résultats ont montré que les sujets étaient également influencés par la numérosité de l'arrangement. Ainsi, pour des collections importantes on peut observer une tendance générale à sous-estimer la numérosité réellement présentée (Krueger, 1972, 1982, 1984; Whalen, Gallistel, & Gelman, 1999, cités par Lemaire & Lecacheur, soumis).

2. Stratégies et performances des enfants

Chez l'enfant, peu d'études ont porté sur l'estimation puisqu'elle est employée principalement sur des collections de grande numérosité impliquant une bonne connaissance linguistique des nombres. La plupart des travaux ont porté essentiellement sur des tâches de comparaison de collections. Les modèles explicatifs en référence ont été formulés dans le cadre de travaux chez l'adulte. Ainsi, l'illusion du solitaire est observée dès 8 ans (Frith & Frith, 1972) et la tendance à surestimer des ensembles de points distribués de manière régulière est peu présente avant 5 ans mais augmente progressivement entre 7 et 11 ans. (Ginsburg & Deluco, 1979, cités par Pesenti, 2001).

En 1984, Newman et Berger (cités par Fayol, 1990) ont montré dans leur étude que les enfants mettaient en place quatre stratégies pour effectuer une tâche d'évaluation globale. Une de ces stratégies comportait la mise en œuvre par le sujet de points de référence variables, et deux autres se basaient sur un comptage approximatif. Ces stratégies peuvent se rapprocher des stratégies de benchmark et d'ancrage décrites plus haut.

L'étude récente d'Ardiale (2007) sur des enfants de 10-11 ans et 12-13 ans fait état de l'existence de cinq stratégies identiques à celles de l'adulte. L'analyse a également révélé des différences de sélection stratégique en fonction de la classe d'âge mais aussi de la configuration et de la numérosité des collections présentées. Les enfants de 10-11 ans ont majoritairement utilisé la stratégie de benchmark alors que les plus grands ne l'ont employée que dans 9% des cas et lui ont préféré les stratégies sollicitant le calcul mental. En outre, sur le plan des performances, les résultats montrent une augmentation de la précision des réponses avec l'âge. Compte tenu du nombre insuffisant d'observations par stratégie, il n'a cependant pas été possible pour Ardiale de déterminer si la qualité des estimations des enfants de 12-13 ans était due au seul effet de la sélection stratégique ou à de meilleures compétences, dans ce cas liées à l'âge.

Par ailleurs, on ignore comment les enfants utilisent ces stratégies en fonction de leur âge, comment ils les exécutent (avec quels niveaux de rapidité et de précision), et comment ils les sélectionnent pour chaque problème. Nous ignorons encore davantage comment évoluent, avec l'âge, ces différentes dimensions stratégiques.

Chapitre II
PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES

A la suite des travaux d'Ardiale (2007) que nous venons de résumer, il nous paraissait effectivement intéressant d'explorer plus précisément les performances stratégiques dont sont capables les enfants de 10 et de 12 ans sur des tâches de quantification approximative. Parmi les cinq stratégies mises en évidence, nous avons sélectionné les deux stratégies utilisées principalement : les stratégies de benchmark et d'ancrage.

Pour rappel, lors de l'utilisation de la stratégie de benchmark, les sujets scannent visuellement le stimulus et le comparent à une représentation numérique en mémoire à long terme. Lorsqu'ils utilisent la stratégie d'ancrage, ils énumèrent quelques points par comptage, estiment visuellement le nombre de points restant à partir de ce comptage, et additionnent le tout.

Nous nous sommes donc interrogées sur les trois points suivants :

Comment évoluent les choix des stratégies d'estimation numérique utilisées par les enfants en fonction de l'âge ? Sur quels critères s'effectuent ces choix ? Et enfin comment évolue l'efficacité des stratégies utilisées par les enfants en fonction de l'âge ?

A partir de ces problématiques, nous avons émis trois hypothèses.

Premièrement, comme le suggère les travaux d'Ardiale, plus les enfants seraient grands et plus ils choisiraient la stratégie d'ancrage, au détriment de celle de benchmark. Cette hypothèse s'accompagne de la prédiction suivante : comme les enfants de 5^e possèdent de meilleures habiletés numériques que les enfants de CM2, ils utiliseraient plus souvent la stratégie d'ancrage que ces derniers.

Deuxièmement, selon l'« *overlapping waves theory* », l'enfant baserait ses choix stratégiques sur des critères différents en fonction de son âge. Ainsi, les déterminants du choix stratégique des enfants de 5^e lors d'une tâche d'estimation numérique seraient différents de ceux des enfants de CM2.

Troisièmement, bien que Ardiale ait observé de meilleurs temps de réponses pour les élèves de 10-11 ans que pour ceux de 12-13 ans, nous avons supposé que cet écart serait uniquement dû à la différence des choix stratégiques et non à une meilleure exécution stratégique. Les performances en estimation numérique augmenteraient donc pour chaque stratégie avec l'âge des enfants, aussi bien au niveau de la précision que du temps de réponse. Ainsi, les enfants de 5^e ayant plus d'expérience, et ayant été confronté à plus de situations les amenant à émettre des hypothèses d'estimation de numérosité et à les

vérifier, ils seraient plus précis et plus rapides dans leurs estimations numériques que les enfants de CM2 lorsqu'ils utilisent la stratégie de benchmark. De même, ils ont plus d'expérience d'utilisation des algorithmes de calculs et ils seraient donc plus précis et plus rapides dans leurs estimations numériques que les enfants de CM2 lorsqu'ils utilisent la stratégie d'ancrage.

Chapitre III
PARTIE EXPERIMENTALE

I. PROTOCOLE EXPERIMENTAL

Pour tester ces trois hypothèses nous avons mis en place un protocole expérimental composé de deux parties : un pré-test papier et un test informatisé.

Ce dernier est basé sur la méthode expérimentale développée par Lemaire et Siegler en 1995 : la méthode choix/non-choix. Cette méthode est parfaitement adaptée à l'analyse de la sélection et de l'exécution stratégiques. En effet, elle permet dans un premier temps au sujet de choisir parmi deux stratégies celle qu'il préfère pour réaliser une tâche. Et, dans un second temps, elle lui impose l'une puis l'autre de ces stratégies pour réaliser la même tâche.

II. POPULATION

Notre population était composée de 73 enfants : 39 élèves de CM2 et 34 élèves de 5^e. Ils étaient issus d'écoles et de collèges publics du Rhône ou de la Loire.

Nos critères d'inclusion étaient tout d'abord la classe (CM2 ou 5^e) mais aussi l'année de naissance (1997 ou 1995). Nous avons exclu les élèves ayant redoublé ou sauté une classe, ainsi que ceux ayant suivi une partie de leur scolarité à l'étranger, ceci afin d'avoir une population homogène tant au niveau de l'âge que des apprentissages scolaires. De plus, en raison de la passation fastidieuse de notre protocole, nous avons également essayé d'écartier de l'expérimentation les enfants présentant des troubles de la recherche visuelle. Enfin, nous avons retiré a posteriori les enfants dyslexiques en raison de leurs difficultés à respecter les contraintes temporelles.

Comme le montre le Tableau 1, nos résultats sont donc basés sur les performances de 60 enfants : 30 élèves de CM2, âgés en moyenne de 124 mois et 30 élèves de 5^e, âgés en moyenne de 148 mois. Nous avons essayé de contrebalancer au maximum le critère de sexe avec 15 filles pour 15 garçons en CM2 et 14 filles pour 16 garçons en 5^e.

Tableau 1 : Caractéristiques des Sujets de l'Expérimentation en Fonction de Leur Classe

Classe	Age moyen	Nombre de filles	Nombre de garçons
CM2	124	15	15
5 ^e	148	14	16

Pour trouver nos participants, nous avons contacté une dizaine d'écoles et collèges publics situés près de nos domiciles respectifs ou de celui de nos parents. Les écoles élémentaires Jean Bonthoux de Villefranche sur Saône et Ernest Renan A de Villeurbanne ainsi que le collège Raoul Dufy de Lyon ont répondu positivement. Nous avons fait passer notre expérimentation à une quinzaine d'enfants dans chaque établissement. Les quinze collégiens restants ont été recrutés par connaissances.

III. MATERIEL

1. Test des cloches

Le test des cloches est une épreuve de recherche de cibles parmi des distracteurs. Il a été créé par Gauthier, Joannette et Dehaut (1989) pour évaluer la négligence visuelle chez des patients cérébro-lésés. Nous avons utilisé le protocole de passation et l'étalonnage de l'Outil de Dépistage des Dyslexies [ODEDYS] Version 2 (2005) du laboratoire CogniSciences de Grenoble, permettant de mesurer les capacités visuo-attentionnelles des enfants. Il s'agit, en 2 minutes, de barrer le maximum de cloches sur une page comprenant de nombreux dessins d'objets (voir feuille de passation en Annexe II).

2. Test informatisé

Le test informatisé a été créé par l'équipe du Pr. Lemaire à l'aide du logiciel E-Prime.

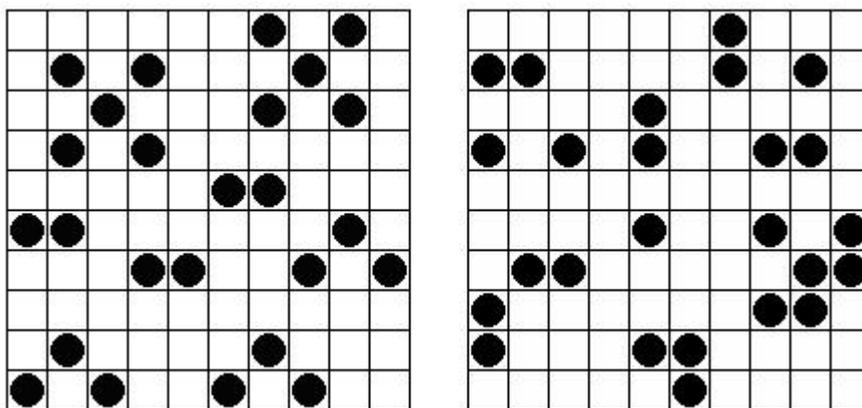


Figure 2 : Exemples de Grilles Canoniques et Aléatoires de 25 Points

Le stimulus était composé de 108 grilles de 100 cases (10*10 cases), chaque case mesurant 1cm². Les cases contenaient soit un point noir de 8mm de diamètre, soit demeuraient vides. Une grille donnée comprenait entre 10 et 98 points qui étaient arrangés de manière aléatoire ou canonique (voir Figure 2). Les deux tiers de ces grilles

contenaient 15, 20 ou 25 points, qui étaient les numérosités cibles. Les grilles restantes étaient des distracteurs, et permettaient d'éviter les phénomènes d'habituation du sujet aux numérosités cibles. Les grilles s'affichaient les unes à la suite des autres, de façon aléatoire à chaque ouverture de session, sur un écran d'ordinateur identique pour tous les participants. Le logiciel E-Run contrôlait le déroulement de l'expérimentation et récupérait les temps de réponse des sujets.

Chaque grille était précédée d'un écran blanc durant 1000 ms puis d'un point de fixation présenté au centre de l'écran pendant 750 ms. La grille apparaissait ensuite au centre de l'écran. Elle restait présente à l'écran jusqu'à ce que l'enfant donne une estimation du nombre de points, avec toutefois un temps maximal d'affichage de 6 secondes. Dès que le sujet commençait à donner sa réponse, l'expérimentateur appuyait sur la barre d'espace pour stopper l'enregistrement du temps par le logiciel, ce qui avait aussi pour effet de retirer la grille du champ visuel du participant, au profit de 4 étoiles bleues. Celles-ci apparaissaient également par défaut si le temps maximum des 6 secondes était écoulé. Pour déclencher l'apparition de la grille suivante, l'expérimentateur devait à nouveau appuyer sur la barre d'espace.

Six sessions de test ont été programmées, réparties en deux versions, soit trois sessions par version (voir Figure 3). Les sessions d'une même version différaient uniquement par leurs écrans de consigne. De plus, d'une version à l'autre les grilles utilisées voyaient leur orientation changer de 180°.

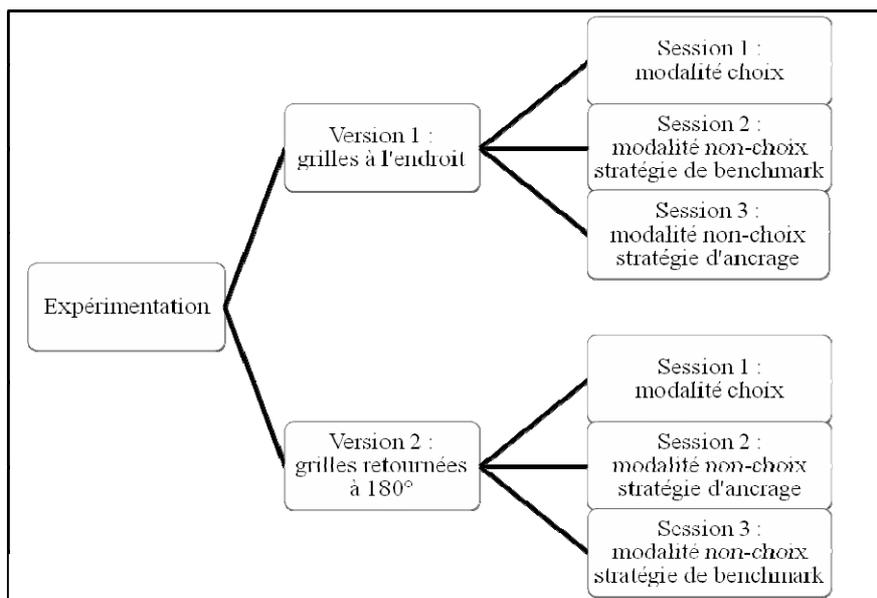


Figure 3 : Organisation des Différentes Sessions de l'Expérimentation

IV. PROCEDURE EXPERIMENTALE

1. Généralités

Avant que nous commençons notre intervention, les parents des enfants ont été informés des modalités et objectifs de l'expérimentation et ont donné leur accord écrit.

La passation de notre protocole était individuelle et s'est déroulée en deux parties de 45 minutes environ. La durée écoulée entre la première et la deuxième entrevue a été très variable selon les enfants, allant de un à soixante jours en fonction des disponibilités de chacun.

De plus, selon les circonstances, la passation de l'expérimentation s'est déroulée soit sur le lieu de scolarisation de l'enfant (école élémentaire ou collège), soit à son domicile. Les élèves de CM2 ont tous été vus durant les heures de classe. Les élèves de 5^e ont, en revanche, tous été rencontrés en dehors des heures de cours, soit les mercredis ou samedis après-midi, soit pendant des heures de permanence.

Dans tous les cas, notre expérimentation a eu lieu dans une pièce fermée et bien éclairée. Seuls l'expérimentatrice et l'enfant étaient présents dans la pièce.

Pour chaque classe d'âge, les enfants ont été séparés en deux groupes. La moitié a passé la version 1 et l'autre moitié la version 2. Pour simplifier nos explications, nous avons choisi de ne présenter en détails que la procédure suivie par les enfants passant la version 1. Les différences entre les deux versions ont été précisées lorsque nécessaire.

A noter aussi que nous avons équilibré au maximum les critères de sexe, d'âge et de version en fonction de l'expérimentatrice.

2. Première entrevue

Lors de notre première rencontre avec l'enfant, nous avons pris le temps de présenter le métier d'orthophoniste. Nous avons aussi expliqué à l'enfant pourquoi nous étions là et sur quel domaine portait l'expérimentation. Nous leur posons ensuite des questions préalables, puis nous leur faisons passer le pré-test et la session 1.

Pour préciser un peu la notion de quantification approximative nous donnons les deux exemples suivants :

« Si tu vois un gâteau d'anniversaire, tu n'as pas besoin de compter exactement combien il y a de bougies, mais tu peux quand même dire si c'est l'anniversaire d'un bébé, de quelqu'un de ton âge, d'un adulte ou encore d'une personne âgée. Ca se voit, tu as estimé l'âge de la personne. »

« Si quand tu veux traverser la route tu vois arriver une voiture, tu ne prends pas un mètre pour mesurer la distance à laquelle elle est, et tu ne regardes pas non plus sa vitesse sur son compteur. Par contre, tu sais si tu as le temps de traverser ou non parce que tu as estimé la vitesse de la voiture, la distance à laquelle elle se trouvait et ta distance par rapport au trottoir d'en face. »

2.1. Questions préalables

Avant de proposer le pré-test et le test en lui-même, nous posons quelques questions à l'enfant. Nous avons récolté les données suivantes :

- nom, prénom, date de naissance,
- redoublement, pays de scolarisation,
- rééducation orthophonique et orthoptique éventuelles, le cas échéant à quelles périodes et pour quelles pathologies,
- port de lunettes (les enfants ayant oublié leurs lunettes ont été revus à une date ultérieure).

2.2. Pré-test

Nous avons présenté la feuille du test des cloches au sujet en lui donnant la consigne suivante :

« C'est une feuille sur laquelle il y a plein de dessins parmi lesquels des cloches. Tu vas devoir trouver le plus de cloches possibles en deux minutes et les barrer avec ce feutre. Dès que tu seras prêt je déclencherai le chronomètre ».

Au bout des deux minutes, nous stoppions l'enfant et comptons le nombre de cloches barrées. Si les résultats étaient hors de la norme pour son âge (≤ -2 écarts-types selon l'étalonnage de l'ODEDYS, voir Annexe III), l'enfant ne participait pas à la suite de l'expérimentation.

2.3. Session 1

Après le pré-test, nous présentions la session 1 du test informatisé. Cette session correspondait aussi à la première modalité nommée « *choix* » où les sujets voyaient une première fois la série des 108 grilles.

Accompagné de l'expérimentatrice, l'enfant lisait les consignes suivantes à l'écran :

« Tu vas voir des grilles de 100 cases (10x10 cases) avec des points à l'intérieur. Tu vas devoir me dire combien il y a de points, A PEU PRES, dans chaque grille. Ce n'est pas le nombre exact qui est important, mais je veux le nombre APPROXIMATIF.

Pour cela, tu peux utiliser 2 méthodes :

- dans la première méthode, tu regardes la grille et, SANS RIEN COMPTER, tu dis combien tu penses qu'il y a de points environ.
- dans la deuxième méthode, TU COMPTES UN OU PLUSIEURS GROUPE DE POINTS, puis tu imagines combien il y a de points en tout. Tu ne dois pas compter tous les points.

Tu devras répondre le plus rapidement possible. ATTENTION, tu as 6 secondes maximum pour chaque grille.

Dès que tu as la réponse, tu me la dis à voix haute et tu me dis aussi la méthode que tu as utilisée.

On va maintenant commencer par 9 exemples pour que tu puisses t'entraîner. »

Pour chaque méthode, l'expérimentatrice montrait la feuille d'exemple (voir Annexe IV) et appliquait la méthode expliquée sur une grille canonique et sur une grille aléatoire pour s'assurer que l'enfant comprenne bien de quoi il retournait.

L'enfant répondait ensuite aux 9 items d'exemples. S'il produisait des réponses au-delà des 6 secondes, l'expérimentatrice insistait sur la nécessité de répondre rapidement. Eventuellement elle présentait à nouveau la feuille d'exemple avec ses explications.

Une fois les exemples terminés, le sujet lisait les consignes suivantes à l'écran :

« Maintenant, on fait l'expérience pour de bon. Pour cette première partie tu vas voir 108 grilles. Tu devras faire exactement la même chose que pendant les exemples.

Je te rappelle que je veux savoir combien il y a de points A PEU PRES dans chaque grille et que tu dois répondre LE PLUS VITE POSSIBLE.

Dès que tu as la réponse, tu me la dis à voix haute et tu me dis aussi la méthode que tu as utilisée (sans compter ou en comptant par groupes). »

L'expérimentatrice précisait aussi à l'enfant qu'il pouvait demander à faire une pause à tout moment s'il le souhaitait.

Après la disparition de chaque grille, l'expérimentatrice notait la réponse numérique donnée par l'enfant ainsi que la stratégie qu'il disait avoir utilisée (voir la fiche de notation en Annexe V).

3. Deuxième entrevue

Lors de notre deuxième entrevue, nous faisons passer aux enfants les sessions 2 et 3 qui correspondaient à la modalité « *non-choix* ». La stratégie de quantification approximative était imposée.

Au début de cette seconde entrevue, l'expérimentatrice demandait à l'enfant ce dont il se souvenait de la première rencontre. Elle lui expliquait alors qu'il allait devoir refaire deux tâches similaires à celle déjà effectuée, mais que cette fois-ci il n'aurait pas le choix de la stratégie.

3.1. Session 2

Lors de la deuxième session, les enfants revoyaient donc les 108 mêmes grilles dans un ordre toujours aléatoire, donc différent de celui de la première session. Ils devaient donner l'estimation du nombre de points dans chaque grille, le plus rapidement possible en utilisant uniquement la stratégie imposée (*i.e.* la stratégie de benchmark pour les enfants passant la version 1 et la stratégie d'ancrage pour ceux passant la version 2).

Accompagné de l'expérimentatrice, l'enfant lisait les consignes suivantes à l'écran :

« Pour cette deuxième partie, tu vas à nouveau voir des grilles de 100 cases (10x10 cases) avec des points à l'intérieur. Tu devras encore me dire combien il y a de points, A PEU PRES, dans chaque grille. Ce n'est toujours pas le nombre exact qui est important, mais le nombre APPROXIMATIF.

Pour cela, tu dois utiliser uniquement la méthode où tu regardes la grille et, SANS RIEN COMPTER, tu dis combien tu penses qu'il y a de points environ.

Tu devras répondre le plus rapidement possible. ATTENTION, tu as 6 secondes maximum pour chaque grille. Dès que tu as la réponse, tu me la dis à voix haute.

On va maintenant commencer par 9 exemples pour que tu puisses t'entraîner. »

L'expérimentatrice reprenait à ce moment la feuille d'exemples pour expliquer à nouveau la méthode à utiliser, ceci afin d'être certain que tous les enfants repartent bien avec les mêmes connaissances.

Une fois les exemples terminés, l'enfant voyait les consignes suivantes à l'écran :

« Maintenant, on fait l'expérience pour de bon. Tu vas voir 108 grilles.

Tu devras faire exactement la même chose que pendant les exemples.

Je te rappelle que je veux savoir combien il y a de points A PEU PRES dans chaque grille et que tu dois répondre LE PLUS VITE POSSIBLE. Tu ne dois pas compter de points.

Dès que tu as la réponse, tu me la dis à voix haute. »

Après la disparition de chaque grille, l'expérimentatrice notait la réponse donnée par l'enfant (voir la fiche de notation en Annexe V).

3.2. Session 3

Au cours de la troisième et dernière session, les enfants voyaient une dernière fois les 108 grilles. Ils devaient à nouveau donner l'estimation du nombre de points dans chaque grille le plus rapidement possible mais en utilisant uniquement la stratégie qu'ils n'avaient pas utilisée lors de la session 2 (*i.e.* la stratégie d'ancrage pour les enfants passant la version 1 et celle de benchmark pour ceux passant la version 2). Le déroulement était identique à celui de la session précédente, seules les consignes sur la stratégie à utiliser étaient différentes : « *Tu dois utiliser uniquement la méthode où TU COMPTES UN OU PLUSIEURS GROUPE DE POINTS, puis tu imagines combien il y a de points en tout. Tu ne dois pas compter tous les points.* »

V. EXPERIMENTATION TEST

Notre population d'origine était composée de 30 enfants de CE2, 30 enfants de CM2 et 15 enfants de 5^e issus d'écoles et collèges publics de l'Isère, du Rhône et de la Loire. Nous avons un protocole quelque peu différent de celui que nous venons de vous présenter.

Tout d'abord, les consignes étaient rédigées autrement, avec des termes plus adaptés à un adulte qu'à un enfant. En particulier, les stratégies étaient désignées par leurs noms techniques. Par conséquent, nous ne lisions pas les consignes à l'écran avec l'enfant mais nous les adaptions à leur niveau langagier, ce qui a entraîné une grande variabilité des explications données suivant l'enfant et l'expérimentatrice.

De plus, les deux stratégies n'étaient pas décrites précisément à l'aide d'exemples de grilles sur papier. Nous avons donc eu l'impression qu'ils ne les comprenaient pas toujours bien, et en particulier la stratégie de benchmark. De la même manière, nous insistions moins sur la nécessité de produire une réponse à la fois rapide et approximative.

Ainsi, de nombreux enfants donnaient des réponses hors-délai ou effectuaient un comptage exact.

Par ailleurs, le nombre exact de cases par grilles n'était pas connu des enfants. Or, certains d'entre eux avaient repéré ce nombre de cases, soit intuitivement, soit en multipliant le nombre de lignes par le nombre de colonnes. Bien que nos items cibles n'aient pas eu de grandes numérosités, (*i.e.* supérieures à 80 points), les enfants ayant pu estimer ces collections par soustraction des cases blanches au total des cases possédaient un avantage sur les autres. Ils n'étaient pas forcément meilleurs en calcul mental mais ils ont eu l'idée au départ d'identifier la grille, ce qui a calibré leurs estimations et entraîné un biais dans l'expérimentation.

Enfin, nous ne proposons pas de pré-test pour repérer les enfants présentant des troubles d'attention visuelle. Ceux-ci étaient cependant écartés sur la base des dires des enseignants.

A ces différences au niveau du protocole, s'ajoutaient les difficultés des élèves de CE2 vis-à-vis de la contrainte temporelle. Or, la programmation de notre test informatisé est telle que les réponses ne peuvent plus être enregistrées au-delà d'une limite de 6 secondes. Il nous manquait donc de nombreuses données pour cette classe d'âge.

Pour toutes ces raisons, nous avons décidé au mois de juillet 2007 de reprendre complètement notre expérimentation et de proposer un nouveau protocole à d'autres enfants, en excluant ceux scolarisés en CE2.

Chapitre IV
PRESENTATION DES RESULTATS

Afin de vérifier les hypothèses que nous avons présentées auparavant, nous avons recueilli trois types d'informations dans notre expérience : le pourcentage d'utilisation de chaque stratégie dans la condition choix, les temps de réponse et pourcentages de déviation en modalité non-choix. Les résultats de notre population sont présentés en trois parties. Les deux premières concernent, respectivement, la sélection et l'exécution stratégiques. La troisième partie concerne les performances en quantification approximative de trois sujets dyslexiques. Les résultats rapportés sont tous significatifs à $p < .05$. Les tableaux complets des résultats statistiques peuvent être consultés en annexe.

I. SELECTION STRATEGIQUE

L'étude de l'utilisation stratégique était fondée sur le recueil des protocoles verbaux dans la condition choix (*i.e.*, pour chaque configuration, les participants devaient donner leur réponse et dire laquelle des deux stratégies ils avaient utilisée pour faire leur quantification). Les participants de CM2 et de 5^e utilisaient plus fréquemment la stratégie d'ancrage (56%) que la stratégie de benchmark. Ainsi, en raison de la complémentarité entre les pourcentages d'utilisation des deux stratégies, nous avons retenu comme indicateur comportemental de la sélection stratégique le pourcentage d'utilisation de la stratégie d'ancrage (*e.g.*, le participant comptait 7 points, estimait qu'il en restait environ le double, ajoutait 14 à 7, et donnait 21 comme réponse). Pour étudier cette dimension stratégique, nous avons donc analysé l'influence des facteurs manipulés dans la tâche sur le pourcentage d'utilisation moyen de la stratégie d'ancrage.

Le dépouillement des protocoles verbaux a montré que certains participants de CM2 et de 5^e étaient biaisés dans leur utilisation stratégique. En effet, 3 élèves de CM2 et 10 élèves de 5^e étaient mono-stratégiques (*i.e.*, ils utilisaient la même stratégie sur plus de 80% des collections présentées). Deux des élèves de CM2 ont utilisé la stratégie de benchmark sur plus de 85% des configurations, et les 10 élèves de 5^e ont utilisé majoritairement la stratégie d'ancrage. Compte tenu de nos objectifs, ces participants n'ont pas été inclus dans l'analyse effectuée sur l'utilisation stratégique. Les traitements statistiques présentés ci-après ont donc été réalisés à partir des performances de 27 élèves de CM2 et 20 élèves de 5^e.

Afin d'analyser l'effet de nos variables indépendantes sur la sélection stratégique, nous avons effectué une analyse de variance (ANOVA) sur le pourcentage d'utilisation de la stratégie d'ancrage, dont le plan expérimental était : 2 (Classe : CM2, 5^e) x

2 (Configuration : aléatoires, canoniques) x 3 (Numérosité : 15, 20, 25), avec des mesures répétées sur les deux derniers facteurs expérimentaux.

Comme nous pouvons le voir dans le Tableau 2, l'analyse a mis en évidence un effet simple de la classe, $F(1,45)=6.43$, $CMe=987.81$, de la configuration, $F(1,45)=214.46$, $CMe=803.35$, et de la numérosité, $F(2,90)=41.46$, $CMe=193.37$. En effet, les participants de 5^e utilisaient la stratégie d'ancrage plus fréquemment (61%) que ceux de CM2 (52%). De plus, les participants des deux groupes d'âge l'utilisaient plus fréquemment sur les configurations canoniques (81%) que sur les configurations aléatoires (31%), et plus fréquemment sur la numérosité de 15 (65%) que sur la numérosité de 20 (56%), $F(1,45)=21.70$, $CMe=164.30$, et de 25 (46%), $F(1,45)=58.02$, $CMe=276.07$. La différence entre les numérosités de 20 et de 25 était aussi significative, $F(1,45)=31.98$, $CMe=139.74$.

Tableau 2 : Tableau Récapitulatif des Effets Statistiques de la Classe, la Configuration et la Numérosité sur le Pourcentage d'Utilisation de la Stratégie d'Ancrage en Modalité Choix.

Effet simple de la Classe	5 ^e > CM2
Effet simple de la Configuration	Canonique > Aléatoire
Effet simple de la Numérosité	Num.15 > Num.20 > Num.25
Interaction Classe x Configuration	5 ^e x Canonique > CM2 x Canonique mais 5 ^e x Aléatoire = CM2 x Aléatoire
Interaction Configuration x Numérosité	Différence Canonique/Aléatoire en Num.25 > différence Canonique/Aléatoire en Num.20 > différence Canonique/Aléatoire en Num.15
Interaction Classe x Configuration x Numérosité	L'interaction Configuration x Numérosité est significative chez les 5 ^e mais pas chez les CM2

Légende :

> : Le pourcentage d'utilisation de la stratégie d'ancrage significativement le plus important est à gauche, le moins important à droite.

= : Les pourcentages d'utilisation de la stratégie d'ancrage ne sont pas significativement différents.

Num.15, Num.20, Num.25 : numérosité 15, numérosité 20, numérosité 25.

Les interactions Classe x Configuration, $F(1,45)=4.22$, $CMe=803.35$, et Configuration x Numérosité, $F(2,90)=3.27$, $CMe=154.23$, étaient également significatives, montrant que : (a) la différence d'utilisation stratégique entre les deux groupes d'âge était significative sur les configurations canoniques (5^e : 89% vs. CM2 : 72%, $F(1,45)=14.31$, $CMe=664.75$), mais pas sur les configurations aléatoires (5^e : 32% vs. CM2 : 29%, $F<0.22$), et (b) la différence d'utilisation stratégique aléatoire/canonique augmentait avec la taille de la numérosités (ces différences étaient de +45%, +52% et +54%, respectivement pour les collections contenant 15, 20 et 25 points; toutes ces différences étaient significatives, $F_s>127.05$).

Enfin, l'interaction Classe x Configuration x Numérosité, $F(2,90)=3.27$, $CMe=154.23$, faisait apparaître une différence de profils d'utilisation stratégique entre les deux groupes d'âge. Afin de décomposer cette dernière interaction, nous avons conduit des analyses séparées pour chaque classe. La différence aléatoire/canonique augmentait avec la taille de la numérosité chez les enfants de 5^e (+46%, +61%, +64%, pour les collections de 15, 20, et 25, respectivement, $F_s > 50.21$), comme en témoignait l'interaction significative Configuration x Numérosité, $F(2,38)=7.32$, $CMe=123.02$. En revanche, cette même interaction n'était pas significative chez les enfants de CM2, $F < 1$.

II. EXECUTION STRATEGIQUE

Les performances obtenues concernaient le temps de quantification des ensembles de points et la déviation de la réponse du participant à la numérosité exacte, en fonction de la stratégie utilisée sur chaque type de configuration. Pour calculer nos pourcentages de déviation, nous avons appliqué la formule suivante : $ABS[(\text{réponse du participant} - \text{numérosité exacte}) / \text{numérosité exacte}] * 100$.

Nous avons analysé les temps de quantification et pourcentages de déviation recueillis en condition non-choix. Dans cette condition, nous rappelons que chacune des deux stratégies devait être utilisée sur l'ensemble des configurations présentées. Les performances produites dans cette condition permettent ainsi d'évaluer la vitesse et la précision d'exécution de chaque stratégie en évitant un biais de sélection stratégique sur les différents problèmes.

Cette analyse a été conduite sur l'ensemble de l'échantillon, y compris les participants mono-stratégiques, une analyse préliminaire comparant les participants mono- et bi-stratégiques n'ayant révélé aucune différence de performance entre les deux groupes. Nous avons donc effectué une ANOVA dont le plan expérimental était 2 (Classe : CM2, 5^e) x 2 (Configuration : canoniques, aléatoires) x 3 (Numérosité : 15, 20, 25) x 2 (Stratégie : benchmark, ancrage), avec des mesures répétées sur les trois derniers facteurs expérimentaux.

1. Temps de réponse

Comme indiqué dans le tableau 3, l'analyse de variance a révélé un effet simple de la numérosité, $F(2,116)=120.40$, $CMe=91144.77$. Les temps de réponse des participants augmentaient avec la taille de la numérosité. Ils mettaient moins de temps à estimer des

ensembles de 15 points (3263 ms) que des ensembles de 20 (3538 ms), $F(1,58)=108.39$, $CMe=84138.30$, et 25 points (3683 ms), $F(1,58)=188.49$, $CMe=112832.17$; la différence de temps de quantification approximative entre les collections de 20 et 25 était également significative, $F(1,58)=33.14$, $CMe=76463.84$.

Tableau 3 : Tableau Récapitulatif des Effets Statistiques de la Classe, la Configuration et la Numérosité sur les Temps de Réponse en Modalité Non-Choix

Effet simple de la numérosité	Num.25 > Num.20 > Num.15
Interaction Classe x Configuration	CM2 x Canonique > 5 ^e x Canonique mais CM2 x Aléatoire = 5 ^e x Aléatoire
Interaction Classe x Numérosité	CM2 x Num.15 > 5 ^e x Num.15 mais CM2 x Num.20 = 5 ^e x Num.20 et CM2 x Num.25 = 5 ^e x Num.25
Interaction Configuration x Numérosité	Aléatoire x Num.15 > Canonique x Num.15 mais Canonique x Num.25 > Aléatoire x Num.25
Interaction Classe x Configuration x Stratégie	En ancrage : CM2 x Canonique > CM2 x Aléatoire et 5 ^e x Aléatoire > 5 ^e x Canonique En benchmark l'interaction Configuration x Stratégie n'est pas significative

Légende :

> : Le temps de réponse significativement le plus important est à gauche, le moins important à droite.

= : Les temps de réponse ne sont pas significativement différents.

Num.15, Num.20, Num.25 : numérosité 15, numérosité 20, numérosité 25.

L'analyse a également mis en évidence quatre interactions significatives : Les interactions Classe x Configuration, $F(1,58)=16.31$, $CMe=264582$, Classe x Numérosité, $F(2,116)=5.72$, $CMe=91144$, Configuration x Numérosité, $F(2,116)=32.16$, $CMe=68195$, et Classe x Configuration x Stratégie, $F(1,58)=5.63$, $CMe=312074$. Celles-ci montraient que : (a) la différence CM2/5^e était significative sur les configurations canoniques (CM2 : 3647 ms vs. 5^e : 3292 ms, $F(1,58)=8.16$, $CMe=1391101.37$) mais pas sur les configurations aléatoires, $F < 1$, (b) la différence CM2/5^e n'était significative que sur des configurations contenant 15 points (+296 ms, $F(1,58)=6.39$, $CMe=823874$, (c) la différence aléatoire/canonique variait avec la taille de la numérosité (ces différences étaient de +248 ms et -133 ms, pour les numérosités de 15 et 25 respectivement, $F_s > 7.73$), et (d) la différence aléatoire/canonique était significative pour la stratégie d'ancrage uniquement, chez les deux classes. Toutefois, celle-ci ne variait pas dans le même sens au sein des deux groupes : les enfants de CM2 exécutaient la stratégie d'ancrage plus rapidement sur les configurations aléatoires que sur les configurations canoniques (+205 ms, $F(1,58)=6.51$, $CMe=290354$) ; et inversement chez les enfants de 5^e (-302 ms, $F(1,58)=14.16$, $CMe=290354$).

2. Pourcentages de déviation

L'analyse correspondante conduite sur les pourcentages de déviation a montré un effet simple de la classe (voir Tableau 4), $F(1,58)=5.88$, $CMe=454.32$, de la configuration, $F(1,58)=125.54$, $CMe=54.24$, et de la numérosité, $F(2,116)=72.29$, $CMe=30.98$. Les élèves de 5^e étaient plus précis (11.5%) que les élèves de CM2 (15.4%). De plus, les participants étaient plus précis lorsqu'ils estimaient des configurations canoniques (10.4%) que lorsqu'ils estimaient des configurations aléatoires (16.5%). Enfin, ils donnaient des estimations plus précises des collections de 15 points (10.5%) que de 20 (13.4%) ou 25 points (16.6%), respectivement $F(1,58)=45.34$, $CMe=22.60$, et $F(1,58)=108.88$, $CMe=41.10$. La différence entre les configurations de 20 et de 25 points était aussi significative, $F(1,58)=41.65$, $CMe=29.22$.

Tableau 4 : Tableau Récapitulatif des Effets Statistiques de la Classe, la Configuration et la Numérosité sur les Pourcentages de Déviation en Modalité Non-Choix

Effet simple de la classe	CM2 > 5 ^e
Effet simple de la configuration	Aléatoire > Canonique
Effet simple de la numérosité	Num.25 > Num.20 > Num.15
Interaction Classe x Numérosité	CM2 x Num.20 > 5 ^e x Num.20 et CM2 x Num.25 > 5 ^e x Num.25 mais CM2 x Num.15 = 5 ^e x Num.15

Légende :

> : Le pourcentage de déviation significativement le plus important est à gauche, le moins important à droite.

= : Les pourcentages de déviation ne sont pas significativement différents.

Num.15, Num.20, Num.25 : numérosité 15, numérosité 20, numérosité 25.

L'interaction Classe x Numérosité, $F(2,116)=4.00$, $CMe=30.98$, était également significative. Celle-ci montrait que la différence de précision entre les participants de CM2 et ceux de 5^e variait avec l'augmentation de la taille des collections. Ainsi, pour les configurations de 15 points, la différence entre la précision des sujets de CM2 et celle des sujets de 5^e n'était pas significative, $F<1.96$. Par contre, cette différence devenait significative pour les collections de 20 (-4.1%, $F(1,58)=6.73$, $CMe=152.59$) et 25 points (-5.1%, $F(1,58)=7.78$, $CMe=202.47$).

III. PERFORMANCES DES SUJETS DYSLEXIQUES

Certains des sujets que nous avons testés étaient dyslexiques. Lors de leurs passations, il nous a semblé qu'elles étaient plus lentes et plus en difficultés que les autres enfants.

Nous les avons donc écartées de l'analyse des résultats de notre population générale. Néanmoins, bien que cela ne soit pas prévu au départ, il nous a paru intéressant d'un point de vue orthophonique de nous pencher plus précisément sur leurs performances.

Il s'agissait d'une élève de CM2, Adèle³, âgée de 125 mois et de deux élèves de 5^e, Amélia et Juliette, âgées respectivement de 149 et 146 mois. Toutes trois sont suivies en rééducation orthophonique pour leur dyslexie qui serait plutôt de type visuelle.

Pour comparer leurs performances à celles de la population générale, nous avons recueilli les pourcentages d'utilisation des deux stratégies en modalité choix. Nous avons ensuite analysé à l'aide de tests de Student bilatéraux leurs temps de réponse et pourcentages de déviation en condition non-choix, ainsi que le nombre de réponses données par session (voir Tableau 5). En effet, pour chaque session, toutes les réponses données après l'écoulement des 6 premières secondes n'étaient pas analysées. Pour chaque session, notre protocole comprenant 108 grilles comportait 72 grilles portant sur nos numérosités cibles de 15, 20 et 25 points. Les sujets ont donc donné au maximum 72 réponses par session.

Tableau 5 : Nombre de Réponses par Sujets en Fonction de la Stratégie (sur 72 Items).

	Ancrage	Benchmark
Adèle	42	67
Moyenne des CM2	63	70
Amélia	47	57
Juliette	51	71
Moyenne des 5e	66	72

Enfin, lors de l'utilisation de la stratégie d'ancrage en modalité non-choix, nous avons analysé en détail le nombre de réponses données pour chaque numérosité (24 réponses maximum par numérosité) par nos sujets dyslexiques (voir Tableau 6 page suivante).

1. Adèle

En modalité choix, Adèle a eu un comportement mono-stratégique. Elle n'a choisi d'utiliser la stratégie d'ancrage qu'à 19.23%.

³ Les prénoms ont été modifiés pour les besoins de la présentation.

Au niveau de ses performances, nous n'avons observé aucune différence significative concernant les temps de réponse et pourcentages de déviation par rapport à la norme des CM2. Cependant, concernant la stratégie d'ancrage en modalité non choix, elle n'a donné que 42 réponses contre 63.17 pour ses pairs, $t(29)=2.85$. La différence était significative pour les numérosités de 15, $t(29)=2.95$ et de 25, $t(29)=3.07$.

Au niveau qualitatif, Adèle a eu besoin de pointer pour faire successivement des groupes de points auxquels elle attribuait oralement un nom de nombre. Elle ajoutait ensuite cette numérosité à la suivante, cette procédure entraînant un ralentissement important. Le principe de l'estimation a été rappelé à maintes reprises pendant la passation.

Tableau 6 : Nombre de Réponses par Sujets en Ancre en Fonction de la Numérosité (sur 24 Items).

	15 points	20 points	25 points
Adèle	17	16	9
Moyenne des CM2	22	21	20
Amélia	16	16	15
Juliette	21	16	14
Moyenne des 5e	23	22	20

2. Amélia

Amélia était mono-stratégique elle aussi lors de la modalité choix, et ce d'une manière encore plus marquée qu'Adèle car elle a utilisé la stratégie d'ancrage à 96.83%.

En modalité non-choix Adèle a été significativement plus lente que les élèves de 5^e lors de l'utilisation de la stratégie de benchmark, $t(29)=-3.64$. De plus, elle a donné significativement moins de réponses que les enfants de sa classe aussi bien en benchmark, $t(29)=20.59$, qu'en ancrage, $t(29)=3.99$. Cette différence en ancrage n'était notable que pour les numérosités de 15, $t(29)=7.29$, et de 20, $t(29)=3.17$.

Amélia a été particulièrement gênée en début de passation lors de la session choix pour s'adapter au rythme du test. Après une dizaine d'items, alors qu'elle avait à grand peine donné son estimation, il ne lui était plus possible de dire quelle stratégie elle avait employée.

3. Juliette

Notre dernier sujet dyslexique, Juliette, était quant à elle bi-stratégique en modalité choix, avec 59.78% d'utilisation de la stratégie d'ancrage.

Comme pour Adèle, nous n'avons pas relevé de différence significative par rapport aux élèves de 5^e au niveau de ses temps de réponse et pourcentages de déviation lors des deux sessions non-choix. Par contre, elle aussi a donné moins de réponses que les élèves de sa classe lors de l'utilisation de la stratégie d'ancrage, $t(29)=3.17$, et ce pour les trois numéros cibles, $t(29)=2.27$, $t(29)=3.17$ et $t(29)=2.35$, respectivement pour les 15, 20 et 25 points.

Juliette, après un passage à vide autour du 18^e item, a eu l'air de mieux s'adapter globalement à la contrainte temporelle qu'Amélia et Adèle.

Chapitre V
DISCUSSION DES RESULTATS

I. LIMITES DE L'EXPERIMENTATION

Comme nous l'avons présenté précédemment, notre expérimentation s'inscrit dans le cadre conceptuel de l'analyse des différentes dimensions stratégiques d'un processus cognitif. Ce cadre repose, entre autres, sur l'analyse des protocoles verbaux introduite par Svenson et Sjöberg au début des années 1980 (cités par Bideaud et *al.*, 2004). Cela leur a permis de mettre en évidence l'existence en parallèle de plusieurs stratégies de résolution de problèmes quel que soit l'âge de l'enfant. L'analyse des protocoles verbaux est aujourd'hui très répandue, en particulier en combinaison avec la mesure des temps de réponses. Néanmoins cette méthode reste controversée car il peut exister une interférence entre la résolution du problème et la verbalisation dont elle fait l'objet. De plus, elle ne prend en compte que les processus accessibles à la conscience et pouvant être verbalisés.

Selon Gombert (1990), la métacognition est un domaine qui regroupe les connaissances introspectives et conscientes qu'un individu particulier a de ses propres états et processus cognitifs. Mais aussi les capacités que cet individu a de délibérément contrôler et planifier ses propres processus cognitifs en vue de la réalisation d'un but ou d'un objectif déterminé.

Nous pouvons donc supposer que les enfants participants à notre expérimentation se sont retrouvés en difficultés face à ces deux aspects de la métacognition.

Tout d'abord, en modalité choix, il leur était difficile, et parfois même impossible, d'expliquer exactement comment ils avaient procédé pour estimer approximativement le nombre de points dans les grilles. Or, dans la suite de notre protocole, nous leur imposions l'utilisation d'une stratégie particulière (modalité non-choix) et nous pouvons donc nous demander comment ils ont pu utiliser la stratégie demandée, n'ayant pu la reconnaître ou avoir conscience de l'utiliser spontanément lors de la première session.

De plus, les protocoles verbaux recueillis n'étaient pas très précis. Les enfants devaient uniquement nous dire quelle stratégie ils avaient choisi parmi les deux que nous leur imposions. Pour cela, nous leur demandions de simplifier leurs réponses en convenant d'un code avec chaque enfant. Le plus souvent, ils nous disaient « *j'ai compté un peu* » pour la stratégie d'ancrage ou « *je n'ai pas compté du tout* » pour la stratégie de benchmark. Certains ont cependant préféré dire « *à vue de nez* », « *sans compter* » ou

encore « *au pif* » pour la stratégie de benchmark, bien qu'ils aient compris (nous nous en sommes assurées) qu'ils ne devaient pas non plus répondre n'importe quoi.

Au premier abord, il nous paraissait difficile d'expliquer toutes les stratégies existantes aux enfants mais cela a eu pour conséquence de biaiser leurs réponses. Ainsi, sous le terme de stratégie d'ancrage ont été regroupées toutes les procédures nécessitant un minimum de calcul mental, à savoir l'ancrage, la décomposition-recomposition, le comptage approximatif et parfois même le comptage exact.

Pour mieux comprendre ce phénomène, il nous semble important de rapporter ici les remarques émises par les enfants au cours de l'expérimentation. Elles ont été produites soit spontanément, soit en réponse à nos questions lorsqu'il nous semblait nécessaire de vérifier comment ils avaient procédé. Certains nous ont dit avoir cherché naturellement à compter par groupes, de 4 en 4 ou de 5 en 5, soit en ajoutant au fur et à mesure, soit en additionnant approximativement les groupes de points, ce qui correspond plutôt à un comptage approximatif. D'autres parmi les plus âgés ont utilisé la stratégie de décomposition/recomposition via le subitizing et la multiplication. Enfin, certains enfants nous ont dit avoir compté tous les points, en particulier en ce qui concerne les petites numérosités.

Notre protocole présente donc une limite importante puisque nous ne pouvons certifier que les enfants aient bien employé les stratégies que nous souhaitons qu'ils utilisent.

Or comme le précise Dolly en 1998, la métacognition n'est pas intuitive mais doit être apprise. Or, nous n'avons pas insisté sur la nécessité pour l'enfant de comprendre comment il fonctionnait.

Des modifications pourraient être apportées au protocole afin de rendre plus fiable les explications des enfants. Premièrement, nous pourrions proposer un autre type d'entraînement, au cours duquel nous n'imposerions aucune stratégie mais où nous interrogerions les enfants sur le fonctionnement qu'ils ont eu pour estimer le nombre de points dans la grille. Dans cette perspective, le nombre d'items d'essais pourrait être plus important (*i.e.* supérieur à 9). Une deuxième solution serait de conserver les 9 items d'entraînement en allongeant les temps d'exposition. Eliminer la pression temporelle permettrait aux participants d'être plus attentifs à ce qui s'est passé « *dans leur tête* » au moment de l'estimation. Cela leur permettrait d'avoir une connaissance accrue de leurs processus cognitifs, et donc d'appréhender plus facilement l'expérimentation en elle-même où il leur est demandé de contrôler ces mêmes processus cognitifs.

II. VALIDATION DES HYPOTHESES

Tout en gardant à l'esprit les limites que nous avons évoquées plus haut, nous nous proposons maintenant de mettre nos trois hypothèses théoriques en regard de nos résultats.

1. Première hypothèse

En premier lieu, nous avons émis l'hypothèse que les 5^e choisiraient plus la stratégie d'ancrage que les CM2 au détriment de celle de benchmark. Cette hypothèse s'accompagnait de la prédiction suivante : comme les enfants de 5^e possèdent de meilleures habiletés numériques que les enfants de CM2, ils seraient enclins à utiliser plus souvent la stratégie d'ancrage que ces derniers.

Nos résultats confirment globalement cette hypothèse, à savoir que les enfants de 5^e ont effectivement utilisé majoritairement la stratégie d'ancrage mais ils montrent qu'il n'y a pas de différence entre les enfants de CM2 et 5^e sur les configurations aléatoires. D'autre part, nos résultats corroborent ceux obtenus par Ardiale (2007) dans son étude où la stratégie de benchmark chez les enfants de 12-13 ans se situe pour son utilisation la plus basse à 3% sur les collections aléatoires de 20 points et la plus haute à 13% sur les collections canoniques de 25 points contre 48% et 60% pour les mêmes collections chez les enfants de 10-11 ans.

Or les travaux de Gandini, Lemaire et Dufau (soumis) révèlent que l'utilisation de la stratégie de benchmark chez les adultes est majoritaire sur les collections aléatoires et croit proportionnellement à la taille de la numérosité à estimer. Sur les configurations canoniques c'est au contraire le comptage approximatif qui prédomine. Les utilisations stratégiques des enfants de CM2 sont donc plus proches de celles des adultes que ne le sont celles des enfants de 5^e.

Ces résultats peuvent suggérer plusieurs choses :

Ils n'indiquent pas que les enfants de 5^e n'aient pas été en mesure de faire une estimation perceptive (*i.e.* d'utiliser la stratégie de benchmark) mais plutôt que les compétences qu'ils auraient acquises en matière d'algorithmes et la maîtrise des faits arithmétiques seraient beaucoup trop prégnantes pour qu'ils réussissent à les inhiber. Par ailleurs, dans le système scolaire, l'enfant est conditionné à rechercher des résultats exacts,

conditionnement qu'il peut être difficile de surmonter. L'exigence d'exactitude de l'école convient à l'enfant, qui a besoin de certitudes pour se construire. Le caractère incertain de l'estimation, et notamment d'une estimation purement perceptive pourrait engendrer un sentiment de malaise et d'insatisfaction chez l'enfant.

Nous pouvons donc nous interroger sur la période s'il en est une, où le sujet au cours de son développement basculera vers le modèle adulte (Opfer, Thomson & DeVries, 2007).

Par ailleurs, l'utilisation de la stratégie de benchmark chez les enfants de CM2 ne signe pas une meilleure sélection stratégique mais plutôt une moins bonne maîtrise des algorithmes de calcul compte tenu du taux de déviation des réponses.

En définitive, bien qu'ils n'aient pas suffisamment conscience de leur propre fonctionnement cognitif, il est possible que les enfants sachent néanmoins intuitivement ce dont ils sont capables, quelles sont leurs ressources cognitives par rapport à la tâche demandée. Ils ont, par conséquent, utilisé la stratégie qui leur paraissait la plus « facile » par rapport à l'objectif et à leurs capacités.

2. Deuxième hypothèse

En nous appuyant sur l'« *overlapping waves theory* », nous supposons que les enfants baseraient leurs choix stratégiques sur des critères différents en fonction de leur âge. En d'autres termes, les déterminants du choix stratégique des enfants de 5^e lors d'une tâche d'estimation numérique seraient différents de ceux des enfants de CM2.

Nos résultats viennent confirmer cette hypothèse. En effet, nous avons vu que les élèves de CM2 se basaient sur la configuration des points et sur leur numérosité pour décider de la stratégie qu'ils allaient utiliser en modalité choix. En revanche, contrairement aux élèves de 5^e, ils ne prenaient pas en compte l'interaction de ces deux facteurs. Ces derniers opéreraient donc une analyse plus fine du stimulus avant de faire leur choix.

Il semble donc que plus l'enfant grandit et plus il est capable de prendre en compte plusieurs critères, ce qui s'inscrit dans le développement cognitif normal du sujet. D'un point de vue développemental, l'enfant est encore en pleine maturation cérébrale en particulier au niveau des fonctions cognitives supérieures qui permettent des traitements de plus en plus élaborés.

3. Troisième hypothèse

Dans notre dernière hypothèse, nous supposons que les performances en quantification approximative augmenteraient avec l'âge des enfants, aussi bien au niveau de la précision que du temps de réponse. Ces résultats auraient dû être observés pour les deux stratégies utilisées.

Ainsi, les enfants de 5^e ayant plus d'expérience, et ayant été confrontés à plus de situations les amenant à émettre des hypothèses d'estimation de numérosité et à les vérifier, ils auraient dû être plus précis et plus rapides dans leur estimation numérique que les enfants de CM2 lorsqu'ils utilisaient la stratégie de benchmark. De même, comme ils ont plus d'expérience d'utilisation des algorithmes de calculs, ils auraient dû être plus précis et plus rapides dans leurs estimations numériques que les enfants de CM2 lorsqu'ils utilisaient la stratégie d'ancrage.

Dans une étude précédente portant sur les utilisations stratégiques existantes chez les enfants de 10-11 ans et 12-13 ans, Ardiale (2007) avait relevé des différences dans les temps de latence et la précision, mais le manque de données par stratégies ne permettait pas de vérifier si les performances des enfants étaient liées à leur âge ou à une utilisation stratégique. Dans notre protocole, la modalité non-choix mettait l'enfant dans l'obligation d'utiliser une seule et unique stratégie et nous a permis de mesurer une performance « pure » et ainsi de vérifier notre hypothèse. Au niveau qualitatif, certains enfants nous ont d'ailleurs signalé qu'ils avaient trouvé la première session (*i.e.* celle correspondant à la modalité choix) plus difficile que les deux autres car il fallait choisir à chaque fois quelle stratégie utiliser.

Notre 3^e hypothèse est vérifiée pour la précision des réponses quelle que soit la stratégie choisie : les enfants de 5^e ont en effet été plus précis dans leurs estimations que les CM2.

En revanche, notre hypothèse n'est pas validée sur les temps de réponse : les enfants de 5^e ne sont pas plus rapides que les enfants de CM2 mais au contraire plus lents. Plusieurs explications sont permises qui ne sont sans doute pas exclusives les unes des autres. Comme nous l'avons évoqué plus haut, certaines fonctions cognitives sont largement et plus particulièrement impliquées dans les tâches d'estimation numérique, notamment la mémoire de travail, l'attention, les processus d'inhibition, de sélection et de flexibilité mentale. En l'occurrence, l'immaturité de ces processus mentaux pourrait expliquer la lenteur des enfants de 5^e notamment à travers un comportement de persévération dans la

sélection stratégique entraînant des choix inadaptés à la situation. Les enfants de CM2 étant moins performants dans l'utilisation de la stratégie d'ancrage, ils auraient moins eu tendance à persévérer dans le choix de cette stratégie, bien que leurs processus mentaux soit encore plus immatures que ceux de leurs aînés.

III. DEVELOPPEMENT DES PISTES DE REFLEXION

1. Evolution des représentations en mémoire à long terme et des capacités numériques

Les diverses études menées jusqu'à ce jour sur les enfants scolarisés en primaire ont montré que ceux-ci ne passaient pas d'une « *stratégie reconstructive* » basée sur le calcul à une « *stratégie reproductive* » basée sur la récupération des représentations. Au contraire, ces deux conduites cohabitaient et leurs utilisations augmentaient régulièrement et parallèlement l'une à l'autre (voir Fayol, 1990, pour une synthèse).

En CM2 les enfants sont censés avoir acquis l'ensemble des faits arithmétiques faisant l'objet d'un apprentissage explicite à l'école, telles que les tables d'addition et multiplication, mais également avoir élaboré de manière implicite des connaissances sur des problèmes particuliers, propres à chacun. Tous ces faits sont récupérés directement en mémoire à long terme et peuvent permettre la mise en place de stratégies de décomposition et ainsi faciliter la résolution d'un problème numérique.

« Mais si l'accès à la mémoire échoue, [le cerveau] se rabat sur d'autres stratégies comme éventuellement le comptage, les additions en série, ou la soustraction à partir d'une référence [...] surtout il ne perd pas une occasion d'emprunter un raccourci si cela lui permet d'éviter un calcul »
(Dehaene, 1997a, p. 179)

Les enfants de 5^e, ayant 2 années supplémentaires d'expériences, tant en pratique de calcul qu'en stockage et récupération d'informations, seront donc plus performants que des enfants plus jeunes. Lemaire, Barrett, Fayol et Abdi (1994, cités par Dehaene, 1997a) ont montré dans une expérience que les processus d'automatisation de la mémoire arithmétique se mettaient en place dès l'âge de 7 ans.

Ainsi les enfants de 5^e forts de leurs compétences arithmétiques encore fraîches et entraînées ont préféré utiliser la stratégie d'ancrage lorsqu'ils avaient le choix plutôt que

la stratégie de benchmark comme nous l'avons constaté dans notre première hypothèse. Ils ont également fait preuve de plus de précision dans leurs estimations que les enfants de CM2.

Par ailleurs, diverses études ont montré que les enfants dans les tâches de calculs utilisent dès la maternelle des stratégies de récupération de faits arithmétiques par opposition au comptage seul, comptage sur les doigts ou doigts sans comptage, notamment sur les doubles ($2+2$). On sait aussi que ce processus de récupération fait appel à des représentations prototypiques des numérosités c'est-à-dire soit des constellations de points soit des configurations de doigts. Ces collections témoins entretiennent un rapport analogique étroit avec les quantités qu'elles désignent et les mots-nombres associés. Or, nos résultats montrent des performances nettement meilleures au niveau de la précision sur les configurations canoniques que sur les configurations aléatoires (10.4% vs 16.5% de déviation par rapport à la numérosité réelle). Les patterns canoniques présentés dans les grilles sont constitués de petits ensembles de 1 à 5 points reprenant les constellations présentes sur les faces d'un dé et sont donc facilement identifiables. Cela a pu permettre aux sujets de réaliser des calculs rapides par reconnaissance de patterns prototypiques, éventuellement subitisés et ajoutés les uns aux autres.

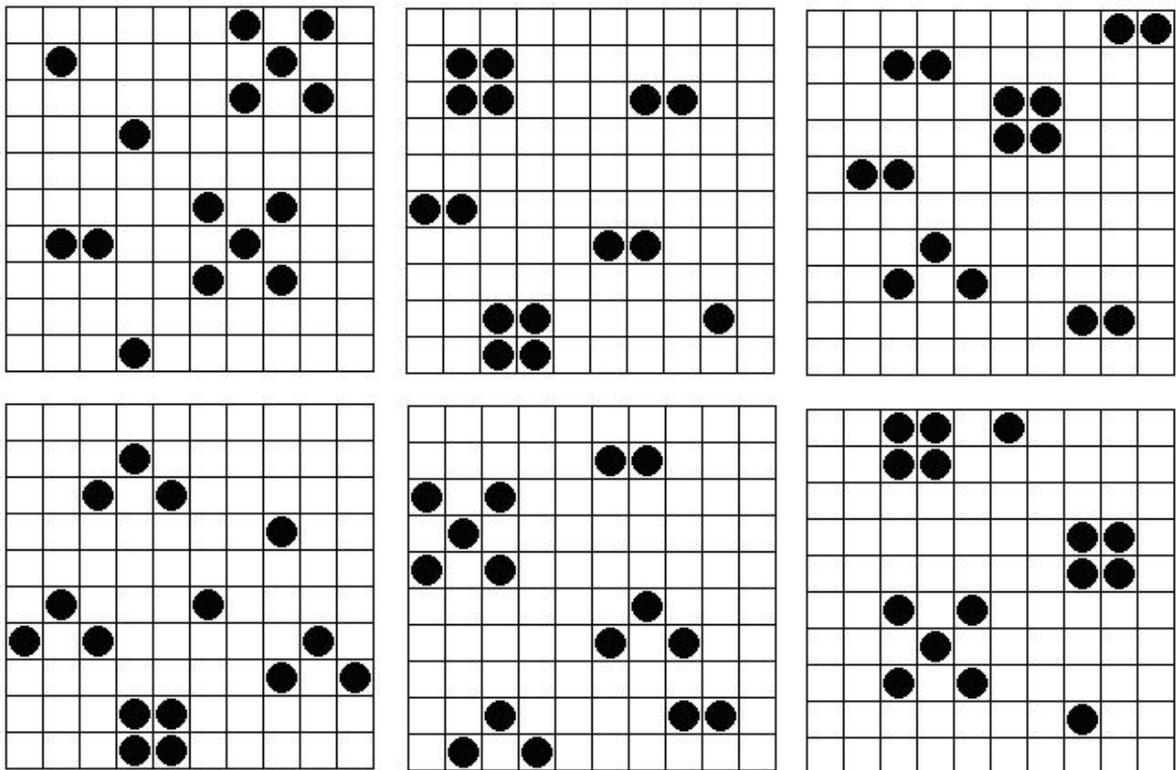


Figure 4 : Exemples de Grilles Canoniques de 15 Points

C'est en particulier sur les numérosités de 15 (voir Figure 4) que les pourcentages de déviation ont été les plus faibles et que nous avons pu observer des comportements qui témoignaient typiquement d'une reconnaissance de configurations prototypiques. Les enfants répondaient très rapidement et semblaient satisfaits. Bien que nous n'ayons pas fait d'étude plus approfondie sur l'évolution des performances par enfant au cours du test, et qu'il s'agisse d'un jugement purement subjectif, il nous a semblé observer un effet d'apprentissage sur ce type de configuration.

2. Développement des fonctions exécutives

Le cortex préfrontal dorsolatéral joue un rôle fondamental dans le fonctionnement cognitif dès la première année de vie et sa maturation se poursuit jusqu'à l'âge adulte, comme le prouvent de nombreuses études neurobiologiques (Casey et *al.*, 2000). Dans une perspective développementale, les habiletés cognitives nouvelles sont associées au fur et à mesure de leur apparition avec le développement de nouveaux circuits neuronaux, notamment à travers la synaptogenèse et la myélinisation. Cette dernière s'opère jusqu'à l'adolescence dans les zones frontales et permet progressivement une transmission plus rapide des informations, donc un traitement plus efficace (voir les travaux de Huttenlocher, 1994, Huttenlocher et Dabholkar, 1997, cités par Lussier & Flessas, 2004). Or c'est grâce à la maturation de ce cortex préfrontal que vont se construire progressivement les fonctions exécutives.

Celles-ci sont associées à un « ensemble d'opérations mentales comprenant l'anticipation au but à atteindre et la planification des actions, la sélection des informations pertinentes et l'inhibition des réponses automatiques ou des actions sur-apprises, l'application des procédures de résolution de problème, l'organisation en mémoire de travail des procédures de traitement, le contrôle attentif du déroulement de l'activité afin de pouvoir la modifier si elle s'écarte du but recherché » (Roy, Gillet, Lenoir, Roulin, & Le Gall, 2005, p. 149).

2.1. Flexibilité mentale

Les fonctions exécutives ont notamment pour but de faciliter l'adaptation du sujet à des situations nouvelles en particulier lorsqu'une routine ou une procédure d'action se révèle insuffisante pour la résolution d'un problème. Conformément à notre prédiction, les

enfants de 5^e ont utilisé majoritairement la stratégie d’ancrage, en revanche ils ont été globalement plus lents que les CM2. Or la stratégie d’ancrage en raison des manipulations numériques qu’elle implique, ne peut être la plus rapide des procédures. Son emploi sur des configurations aléatoires de points, en particulier pour les numérosités de 25, devrait donc avoir un impact sur le temps de réponse moyen. En d’autres termes, le manque d’adaptation stratégique à la configuration a pu jouer un rôle majeur dans la vitesse de réponse. Dans les travaux similaires de Gandini en 2007, portant sur l’effet du vieillissement cognitif dans la quantification approximative, les adultes jeunes ont obtenu des temps de réponse moyens sur les configurations canoniques de 2537 ms pour une sélection stratégique adaptée aux configurations, tandis que dans notre étude, les enfants de 5^e ont mis 3291 ms en moyenne. Quant aux CM2, bien qu’aucun effet de la stratégie n’ait pu être observé sur leurs temps de réponses, leur rapidité pourrait résulter d’une utilisation préférentielle de la stratégie de benchmark.

Il est donc clair que même si les enfants de 5^e ont su gérer plus de critères que les enfants de CM2 comme nous l’avons vu dans notre 2^e hypothèse, il leur a été néanmoins impossible d’opérer rapidement des changements de sélection stratégique à l’image de l’adulte. Ce manque de flexibilité mentale ou d’adaptativité pourrait résulter d’une immaturité neuropsychologique. Dans notre expérimentation, l’utilisation majoritaire d’une stratégie précédemment mise en œuvre et pas forcément adéquate dans tous les cas (cf. participants mono-stratégiques) illustre ce manque de flexibilité. Celle-ci se définit précisément comme la capacité à modifier un schéma mental, à s’adapter à une nouvelle tâche, à alterner entre différentes tâches ou à passer de l’une à l’autre. Elle implique un traitement multifactoriel de la situation : les enfants devaient tenir compte des caractéristiques perceptives du stimulus mais aussi des contraintes mentalisées imposées par le protocole d’expérimentation, à savoir : répondre approximativement et le plus vite possible. Par conséquent, les enfants auraient dû abandonner la stratégie d’ancrage sur les configurations aléatoires pour répondre à la fois aux objectifs de temps et de précision.

Par ailleurs, dans notre expérimentation, les fonctions exécutives sont fortement sollicitées à travers les processus d’attention, de mémoire de travail et d’inhibition.

2.2. Fonctions attentionnelles

Les fonctions attentionnelles se développent progressivement pour arriver à pleine maturité à l’adolescence. L’implication des aires frontales dans les processus

attentionnels a clairement été révélée par des études neuropsychologiques (cf les divers travaux de Cohen, & *al.* , 1988, Sturm, 2001, cités par Lussier et Flessas, 2004).

Dans la tâche d'estimation de numérosité que nous avons proposée aux enfants, il est clair que les ressources attentionnelles sont fortement mobilisées. La première composante attentionnelle impliquée est celle de l'attention soutenue puisque l'enfant doit être concentré pendant 10 à 15 minutes au minimum par session pour effectuer une tâche plutôt répétitive (bien que les stimuli soient tous différents) notamment par le caractère rythmé imposé par le logiciel. Nous avons d'ailleurs senti chez les enfants de CM2 poindre nettement plus rapidement que chez leurs aînés l'impatience, la déconcentration voire la fatigue. Ils se sont d'ailleurs exprimés assez souvent sur la « longueur » du test.

En outre, il leur était nécessaire de prendre en compte et de manipuler mentalement plusieurs informations de sources différentes de façon simultanée. Cette composante de l'attention est dite divisée. L'enfant devait d'une part intégrer la contrainte temporelle : répondre en moins de 6 secondes, et d'autre part le stimulus dans ses divers aspects : sa configuration aléatoire ou canonique, sa numérosité faible ou importante, qui détermineraient la mise en œuvre d'un traitement cognitif adéquat. Or, on sait qu'une tâche automatisée requiert moins d'effort et permettra d'avoir plus de ressources pour effectuer une tâche non automatisée. A l'inverse, lorsque deux tâches nouvelles doivent être réalisées simultanément, l'effort à fournir par le sujet est beaucoup plus important et les ressources attentionnelles devront faire l'objet d'une répartition. La réussite de la tâche sera donc fortement conditionnée par cette répartition attentionnelle entre les deux activités.

Quant à la capacité attentionnelle, elle correspond à la quantité d'informations pouvant être saisie d'emblée par le sujet, quelles que soient les modalités. Cette capacité étant développementale, il est donc logique que les enfants de 5^e soient en mesure de prendre en compte simultanément plus d'informations que des enfants plus jeunes, ce qui leur permet globalement d'obtenir des performances supérieures. Les résultats des enfants de CM2 indiquent qu'ils ont eu des difficultés à gérer à la fois le temps et les caractéristiques du stimulus. Selon Lussier et Flessas (2004, p. 41), cela est dû au fait que, pour un enfant normal, il est difficile « d'effectuer un partage adéquat de ses ressources attentionnelles, sans diminuer un peu la qualité de ses performances dans les deux activités ou d'en faire une très bien au détriment de l'autre, au risque d'entraîner une certaine perte d'information. ». Les enfants de CM2 auraient donc évité de traiter les deux types

d'informations ensemble car cela leur aurait demandé un effort attentionnel trop important qui aurait pu affaiblir leurs performances en terme de précision ou de rapidité.

2.3. Mémoire de travail

En ce qui concerne la mémoire de travail, il est unanimement établi qu'elle est étroitement liée aux capacités attentionnelles, celles-ci limitant le nombre d'informations à manipuler pendant le traitement. Or la capacité attentionnelle évaluée classiquement par l'empan de chiffres endroit est elle aussi développementale et augmente régulièrement jusqu'à l'âge de 15 ans environ (cf. Anderson, Anderson, Northam, Jacobs, & Catroppa, 2001, cités par Lussier et Flessas, 2004).

Comme nous l'avons vu plus haut, les enfants de 5^e ont de meilleures capacités numériques que les enfants de CM2, ce qui est relié à leurs meilleures capacités en mémoire de travail. Il nous a semblé par contre que les enfants de CM2 restaient plus sur un traitement perceptif.

2.4. Capacités d'inhibition

Enfin, Bunge, Dudukovic, Thomason, Vaidya, Gabrieli ont montré en 2002 que pour réaliser une tâche mettant fortement en jeu les capacités d'inhibition, les enfants de 8 à 12 ans avaient de moins bonnes performances que les adultes et surtout que, contrairement à ces derniers, ils utilisaient très peu leurs lobes préfrontaux. Ainsi, cette incapacité à recruter les zones préfrontales de la même manière que les adultes pourrait expliquer l'immaturité de leurs contrôles cognitifs, et donc leurs moins bonnes capacités d'inhibition.

Nous pouvons supposer qu'au cours de notre expérimentation, les élèves de 5^e ont eu des difficultés à inhiber leurs capacités de dénombrement et de comptage, et ont ainsi utilisé majoritairement la stratégie d'ancrage au détriment de la stratégie de benchmark.

Notre protocole prévoyait 2 versions afin de contrebalancer les sessions 2 et 3 en modalité non-choix. Les enfants passant la version 2 se voyaient donc imposer en session 2 la stratégie d'ancrage puis la stratégie de benchmark en session 3. Or, parmi les enfants de 5^e quelques-uns nous ont dit avoir du mal à « s'empêcher de compter » alors que dans la version 1, nous n'avons pas eu la remarque inverse lors de la passation de la session 3 à

savoir par exemple « j’oublie ici qu’il faut compter », pouvant signer ainsi des difficultés d’inhibition de la stratégie de benchmark.

3. Compréhension du concept

Malgré nos explications préalables, nous avons parfois dû rappeler aux enfants le principe de l’estimation et certaines remarques nous ont incitées à nous interroger sur la compréhension partielle que les enfants pouvaient avoir de ce concept.

Leurs difficultés sembleraient se situer au premier des trois niveaux que nous avons cités dans la partie théorique : le rôle des nombres approximatifs dans l’estimation.

En effet, selon Dowker (1989, 1997, cités dans Dowker, 2003) il faudrait prendre en compte ce qu’elle appelle la « *zone de connaissances et de compréhension partielles* ». Cette zone peut être rapprochée de la « *zone proximale de développement* » de Vygotski, car il s’agit de situer l’enfant entre le moment où il n’a aucune connaissance d’un concept et celui où il en a la parfaite maîtrise. Cependant, contrairement à Vygotski, Dowker ne se situe pas dans une visée éducative mais dans une visée explicative.

Ainsi, elle explique que la compréhension du concept d’estimation computationnelle se déroule en trois étapes. Avant d’entrer dans la « *zone de connaissances et de compréhension partielles* », l’enfant maîtriserait déjà certains algorithmes de calcul et faits arithmétiques et choisirait toujours préférentiellement des procédures de calcul exact à l’estimation. Une fois qu’il serait dans cette zone, l’estimation computationnelle serait vue comme un système utile pour pallier un manque de connaissances arithmétiques. Enfin, chez un enfant « expert » en calcul exact, l’estimation computationnelle pourrait être choisie consciemment pour gagner du temps et de l’énergie lorsqu’une réponse exacte n’est pas importante, bien qu’il ait les compétences nécessaires pour calculer précisément cette réponse.

Même si cette notion de « *zone de connaissances et de compréhension partielles* » a été élaborée à l’origine pour l’estimation computationnelle, nous pensons qu’elle représente un cadre théorique intéressant pour analyser les réponses de nos sujets. Ainsi, nous pensons que la majorité d’entre eux se situaient soit avant la zone, préférant donc le comptage à l’estimation, soit dans la zone, et pouvant alors choisir l’estimation mais uniquement comme solution de repli. Cela permettrait d’expliquer pourquoi certains

enfants ont eu un comportement mono-stratégique en choisissant systématiquement de compter des points en modalité choix, et donc d'utiliser la stratégie d'ancrage.

4. Conditionnement scolaire

La perplexité de certains enfants lorsque nous présentions le protocole nous a amenées à plusieurs réflexions : d'abord, essentiellement chez les CM2, presque tous ignoraient ce qu'était le concept d'estimation, mais ils comprenaient très rapidement nos explications et ont souvent d'eux-mêmes ajouté un exemple supplémentaire d'une situation où ils ont fait de l'estimation. En revanche, la notion de nombre approximatif ne leur était visiblement pas familière.

Chez les enfants de 5^e, le vocable d'estimation était le plus souvent connu ainsi que le principe de l'estimation. Pour autant les enfants n'ont visiblement pas tous compris la notion de nombre approximatif.

Nous nous sommes donc penchées sur les programmes scolaires de mathématiques. Concernant l'école primaire, nous avons trouvé les objectifs suivants (B.O. hors-série n°5 du 12 avril 2007) :

« A travers la pratique des mathématiques, au cycle 2 [et au cycle 3], l'élève est amené à développer particulièrement les attitudes suivantes :

- la rigueur et la précision dans les tracés, dans les mesures, dans les calculs ;
- le goût du raisonnement ;
- le réflexe de contrôler la vraisemblance des résultats ;
- la volonté de justesse dans l'expression écrite et orale ;
- l'ouverture à la communication, au dialogue, au débat ;
- l'envie de prendre des initiatives, d'anticiper ;
- la curiosité et la créativité ;
- la motivation et la détermination dans la réalisation d'objectifs »

Ces objectifs sont très centrés sur la justesse, la précision et la rigueur. L'enseignement des mathématiques fait donc une grande part à l'apprentissage du calcul exact, du dénombrement aux faits et techniques arithmétiques. Il existe cependant un petit paragraphe sur le calcul approximatif dans les programmes du cycle des approfondissements :

« Le travail sur le calcul approché commence au cycle 3. Il doit être utilisé dans des situations où les élèves peuvent lui donner du sens, par exemple : contrôle d'un résultat obtenu par écrit ou à l'aide d'une calculatrice, moyen de décider dans une situation où le résultat exact n'est pas nécessaire. »

Au collège, nous n'avons rien trouvé concernant le calcul approximatif dans les programmes scolaires (B.O. hors-série n°6 du 19 avril 2007).

Il semble donc que l'école ne permette pas à l'enfant d'appréhender la notion de nombre approximatif, l'accent étant mis sur l'exactitude. Nous pourrions par ailleurs ajouter que les systèmes de notation ne s'accommodent pas d'approximation ou de nuances et que c'est plus souvent le résultat que la démarche qui est notée. Or, les enfants qu'ils soient de 5^e ou de CM2 ont quelques années de « *conditionnement scolaire* » derrière eux qui pourrait expliquer en partie la sensation de mal-être des enfants vis-à-vis de l'inexactitude des réponses à donner. Sur ce point, il a souvent été nécessaire de préciser aux enfants que leurs réponses ne seraient connues que de l'ordinateur, et que ni leur enseignant ni leurs parents ne sauraient ce qu'ils ont répondu.

En ce qui concerne le concept d'approximation, la majorité des enfants nous demandaient de confirmer qu'ils ne devraient pas compter tous les points et que l'on pouvait utiliser l'expression « *à peu près* » pour définir cette notion. Nous pouvions alors contempler toutes sortes de mimiques faciales exprimant tour à tour l'inquiétude, le sentiment d'incapacité et l'insatisfaction.

Devant l'inquiétude, nous rappelions parfois en cours d'expérimentation qu'il ne s'agissait que d'une expérience. Devant le sentiment d'incapacité éprouvé quand l'expérience débutait et que les 6 secondes venaient de s'écouler sans que l'enfant ait pu donner une quelconque estimation, nous le rassurions sur ses compétences à s'adapter à cette situation nouvelle. Pour beaucoup, le fait d'être dans l'« *à peu près* » entraînait un sentiment d'insatisfaction : les enfants avaient une moue de dégoût, dodelinaient de la

tête. Lorsque la session correspondant à la stratégie de benchmark se présentait, les enfants paraissaient déstabilisés et beaucoup plus anxieux à l'idée de répondre que lorsque débutait la stratégie d'ancrage ou au cours de la modalité choix. Ils ont souvent jugé la stratégie de benchmark plus difficile, y compris les enfants qui manifestement éprouvaient des difficultés en calcul mental.

IV. SUJETS DYSLEXIQUES

1. Limites de notre étude de cas

L'étude de ces cas dyslexiques est intéressante au titre de la pratique orthophonique car elle montre que la dyslexie développementale peut entraîner des déficits en cascade dans bien d'autres domaines que celui de la lecture. Cependant notre démarche a manqué de rigueur scientifique pour deux raisons.

Tout d'abord, il aurait été nécessaire d'effectuer un bilan précis de dyslexie, identique pour nos trois sujets, qui nous aurait permis d'une part d'évaluer l'étendue et le degré de l'atteinte, et d'autre part d'identifier le type de dyslexie par la recherche du trouble cognitif sous-jacent. Nous nous sommes basées sur les dires de leurs orthophonistes, qui ne se plaçaient pas forcément dans le courant neuropsychologique. Par conséquent, bien que le diagnostic de dyslexie ait été posé, nous ne sommes pas en mesure d'affirmer quel est le type de trouble cognitif sous-jacent.

En outre, nous avons étudié en partie la sélection et l'exécution stratégiques de ces participantes sans savoir si leur répertoire stratégique était conforme à celui de la population ordinaire, et sans connaître leurs performances globales en estimation numérique. Il serait donc pertinent dans les études futures d'explorer au préalable ces aspects au moyen d'une étude comparable à celle conduite par Ardiale (2007).

2. Généralités

Nos trois sujets dyslexiques méritent quelques commentaires particuliers, compte tenu des diverses études épidémiologiques mettant en évidence un facteur important de comorbidité entre troubles d'apprentissage du langage écrit et dyscalculie. On peut effectivement imaginer qu'un déficit langagier puisse affecter l'acquisition de la chaîne numérique et la compréhension de procédures arithmétiques. Toutefois selon les études ce taux de comorbidité est variable : la dyslexie peut exister sans dyscalculie associée et

inversement, et l'association des deux troubles conduit à des tableaux cliniques différents en étendue et en intensité. Dans de nombreux travaux, il a été constaté que les enfants dyscalculiques utilisaient des stratégies primitives de comptage telles que le comptage verbal voire digital, l'emploi de stratégies immatures consistant en un comptage global, ou la stratégie du minimum (consistant à compter à partir du plus grand des deux opérandes dans une addition simple). Ils ont également des difficultés d'accès à une récupération directe en mémoire de faits arithmétiques et sont plus lents que leurs pairs (Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale [INSERM], 2007).

Parmi les facteurs supposés être à l'origine de la dyscalculie, une grande majorité des études confirme l'existence d'un déficit de la mémoire de travail pouvant être source de nombreuses erreurs dans les procédures de comptage (Geary, 1993, cité par Barrouillet, 2006), et des difficultés de mémorisation des faits arithmétiques.

Ayant déjà peu de données sur l'estimation quantitative chez les enfants en général, nous n'avons a fortiori rien trouvé de concret sur la population dyslexique, à l'exception d'une étude réalisée par Macaruso et Sokol en 1998 et citée par Dowker (2003). Les auteurs ont étudié des sujets âgés de 12 à 20 ans atteints d'une dyslexie développementale et signalés par leurs professeurs comme ayant des faiblesses dans les mathématiques de base. Les recherches ont montré que certains avaient des difficultés en calcul mais pas en estimation quantitative, et que d'autres au contraire présentaient le tableau inverse.

3. Discussion des résultats

Les comportements de nos trois sujets dyslexiques observés pendant le test se sont distingués de ceux des autres enfants pour plusieurs raisons, mais il faut principalement souligner la difficulté qu'ils ont eue à gérer la contrainte temporelle imposée par le test. Ils n'ont pas pu répondre dans les 6 secondes pour un nombre important d'items, ce qui a entraîné un biais dans la moyenne des temps de réponse obtenus par rapport aux temps de réponse des autres enfants. La stratégie d'ancrage leur a en particulier posé problème à tous les trois, mais Amélia a également éprouvé des difficultés avec la stratégie de benchmark.

Parfois, le temps pris pour l'élaboration de la réponse leur avait fait perdre la numérosité à estimer et aucune réponse ne pouvait être donnée. Il ressort donc principalement de leur passation une lenteur excessive par rapport aux autres enfants. Les hésitations et autocorrections étaient nombreuses.

Par ailleurs, sur le plan du répertoire stratégique, on peut relever qu'Adèle et Amélia ont été mono-stratégiques dans des proportions supérieures à celles des enfants de leur classe d'âge présentant le même type de comportement : Adèle utilisant la stratégie de benchmark, et Amélia massivement la stratégie d'ancrage. Ceci étant, à l'image de leurs pairs, leurs performances en latence et précision étaient dans la moyenne de leur classe d'âge pour les items dont nous avons pu récupérer les résultats (*i.e.* à chaque fois qu'elles ont répondu en moins de 6 secondes). Toutefois, on peut supposer que leur comportement mono-stratégique ait été la conséquence d'une difficulté d'élaboration et d'adaptation à de nouvelles conduites en raison du coût cognitif impliqué.

Enfin, tout au long de la passation, les difficultés qu'elles éprouvaient toutes les trois à accéder aux noms du nombre étaient manifestes. D'une part, il semblait qu'elles avaient le résultat en tête, mais qu'elles ne parvenaient pas à activer la bonne étiquette lexicale. D'autre part, les procédures de calcul qu'elles utilisaient semblaient difficiles et longues. Les subvocalisations émises au cours de la passation témoignaient de leurs difficultés dans le calcul mental et l'accès aux faits arithmétiques. Ainsi même dans les configurations canoniques, elles ajoutaient $1 + 4$ puis à nouveau 4 à ce total puis 1 , etc. Par ailleurs, le nombre de réponses qu'elles ont données dans les 6 secondes décroissait au fur et à mesure que la numérosité à estimer augmentait, cette dernière impliquant dès lors davantage de calcul donc une charge plus importante en mémoire de travail. Or il est clairement admis que la mémoire de travail joue un rôle à la fois fondamental dans la mémorisation des faits arithmétiques mais aussi dans la réalisation de calcul. Ainsi certains auteurs cités par Noël (2004) estiment qu'une faiblesse mnésique pourrait expliquer l'association fréquente de la dyslexie et de la dyscalculie.

En définitive, comme nous l'avons précisé en introduction, l'estimation numérique est un domaine qui reste peu étudié, et les recherches actuelles concernent essentiellement la population normale. Il reste donc de nombreuses possibilités de recherches auprès de sujets dyslexiques et/ou dyscalculiques.

V. APPORTS POUR LA PRATIQUE ORTHOPHONIQUE

Ce travail de recherche nous a permis de compléter notre formation orthophonique clinique et théorique. D'une part, la relation duelle qui s'instaure avec des enfants tous différents les uns des autres lors des tests est extrêmement enrichissante, et nous a permis de mesurer la complexité de nos interventions au cours de notre pratique quotidienne.

D'autre part, notre sujet d'étude nous a permis d'approfondir nos connaissances dans le domaine des apprentissages logicomathématiques.

Il a donc été intéressant de rencontrer des enfants d'origines et de milieux divers et d'observer leurs comportements et performances. Nous avons dû tenir compte de leurs particularités et adapter notre discours et nos exigences. Cela a renforcé notre conviction selon laquelle il est indispensable de prendre en compte l'enfant sous tous ses aspects, aussi bien cognitifs, qu'éducatifs, socioculturels ou encore psychoaffectifs.

Nous avons également mesuré les biais qu'entraînait la situation d'évaluation, laquelle n'est qu'un instantané des performances de l'enfant. D'une part, la personnalité intime et authentique de l'enfant ne nous est pas forcément perceptible. D'autre part, le degré de fatigue, de stress, le moment de la journée, le niveau de bruit extérieur, ou encore la salle dans laquelle se déroulait l'expérimentation sont autant d'éléments pouvant influencer les résultats obtenus lors d'un bilan. Ceux-ci sont donc à prendre avec mesure et en toute connaissance de cause, et ne peuvent se suffire à eux-mêmes. De plus, les comportements des enfants diffèrent selon qu'ils sont dans le groupe-classe ou en relation duelle. Dans ce dernier cas, nous avons constaté qu'ils étaient participants, volontaires, globalement plus calmes et qu'ils avaient le souci de bien faire. Il nous faudra tenir compte de ces observations dans nos relations avec les enseignants de nos futurs patients.

Nos lectures et recherches nous ont aussi permis de mesurer l'importance des compétences logicomathématiques dans le développement de l'enfant. Nous pensons être plus sensibilisées à ces aspects que nous aimerions garder à l'esprit lors de toute évaluation orthophonique. Ceci nous permettra encore une fois de prendre en compte l'enfant dans sa globalité, en faisant par exemple des liens entre son développement linguistique et celui de son raisonnement.

Les limites de notre étude de cas nous auront permis de vérifier que les manifestations de surface ne peuvent être analysées sans connaître le trouble cognitif qui en est à l'origine. Il est donc important d'essayer d'identifier ce dernier en raison des conséquences diverses qu'il peut entraîner sur tous les pans du développement de l'enfant.

Enfin, nous avons pris pleinement conscience de l'importance de l'estimation dans notre quotidien et dans celui des patients que nous prendrons en charge. Il serait intéressant que de futures études sur ce sujet apportent des éléments concrets à notre prise en charge orthophonique, tout particulièrement au niveau de l'identification de troubles spécifiques ou encore de la création d'outils de bilan.

CONCLUSION

L'objectif de notre mémoire était d'étudier la sélection et l'exécution stratégiques dans une tâche d'estimation numérique, chez des enfants de 10 et 12 ans. Dans ce but, nous avons proposé une expérimentation reprenant le protocole choix/non-choix décrit par Lemaire et Siegler (1995).

A la suite des travaux d'Ardiale (2007), nous avons émis trois hypothèses, que nous avons validées partiellement. Comme nous l'avions prévu, les enfants de 5^e ont utilisé la stratégie d'ancrage dans une plus grande proportion que les enfants de CM2. De plus, les déterminants du choix stratégique étaient différents en fonction de l'âge des enfants. Enfin, les participants de 5^e étaient plus précis que leurs cadets. Cependant, contrairement à nos attentes, les CM2 ont été globalement plus rapides que leurs aînés.

Ces observations nous ont amenées à approfondir plusieurs pistes de réflexion, comme celle de l'immaturation des fonctions exécutives, dont les processus de flexibilité mentale, d'attention divisée, de mémoire de travail et d'inhibition. Nous pensons aussi que le manque de confrontation à ce genre de tâches dans le milieu scolaire aurait pu influencer sur les performances des enfants.

Enfin, nous avons étudié les performances de trois sujets dyslexiques. Celles-ci ont été globalement similaires à celles des enfants ordinaires, à l'exception des temps de réponse. Or les études sur le rapport dyslexie/dyscalculie nous ont orientées vers la présence, dans les deux cas, d'un déficit en mémoire de travail. Par ailleurs, nous avons repéré chez nos sujets des difficultés d'ordre linguistique, qui se situeraient au niveau de l'accès au « mot-nombre ».

En définitive, ce travail a permis d'avancer dans la connaissance des différentes dimensions stratégiques de l'estimation numérique chez l'enfant. De plus, il s'agit de l'une des premières études en quantification approximative incluant des sujets porteurs d'un trouble des apprentissages.

Certaines notions mériteraient cependant d'être approfondies. Tout d'abord, nous ne savons pas si les performances des enfants pourraient évoluer au cours de l'exposition à ce type de tâche par effet d'apprentissage. De plus, il pourrait être intéressant de consacrer une étude spécifique à l'analyse des comportements de sujets dyslexiques et/ou dyscalculiques, en prenant soin de délimiter cette population à l'avance.

BIBLIOGRAPHIE

- Allik, J., & Tuulmets, T. (1991). Occupancy model of perceived numerosity. *Perception and Psychophysics*, *49*, 303-314.
- Ardiale, E., (2007). *Stratégies de Quantification Approximative Chez les Enfants de 10 et 12 ans*, Mémoire de Master, Université d'Aix-Marseille 1, Marseille.
- Baddeley, A. D. (1986). *Working memory*. Oxford, Oxford University Press.
- Barth, H., La Mont, K., Lipton, J., Dehaene, S., Kanwisher, N., & Spelke, E. (2006). Nonsymbolic arithmetic in adults and young children. *Cognition*, *98*, 199-222.
- Barrouillet, P. (2006). Les troubles de l'arithmétique et la dyscalculie. In P. Barrouillet, & V. Camos. *La cognition mathématique chez l'enfant* (pp. 181-210), Marseille : Editions Solal.
- Bevan, W., Maier, R. A., & Helson, H. (1963). The influence of context upon the estimation of number. *American Journal of Psychology*, *76*, 464-469.
- Bideaud, J., Lehalle, H., & Vilette, B. (2004). *La conquête du nombre et ses chemins chez l'enfant*. Villeneuve d'Ascq : Presses Universitaires du Septentrion.
- Booth, J.L., & Siegler, R.S. (2006). Developmental and individual differences in pure numerical estimation. *Developmental Psychology*, *41*(6), 189-201.
- Bunge, S. A., Dudukovic, N. M., Thomason, M. E., Vaidya, C. J., & Gabrieli, J. D. E. (2002). Immature frontal lobe contributions to cognitive control in children: evidence from fMRI. *Neuron*, *33*, 1-11.
- Camos, V. (2006). Les premiers apprentissages. In P. Barrouillet, & V. Camos. *La cognition mathématique chez l'enfant* (pp. 71-86), Marseille : Editions Solal.
- Casey, B.J., Giedd, J.N., & Thomas, K.M. (2000). Structural and functional brain development and its relation to cognitive development. *Biological Psychology*, *54*, 241-57.
- Dehaene, S. (1992). Varieties of numerical abilities, *Cognition*, *44*, 1-42.
- Dehaene, S. (1997a). *La bosse des maths*. Paris : Odile Jacob.
-

-
- Dehaene, S. (1997b). *The number sense*. New York: Oxford University Press.
- De Hevia, M.D., Girelli, L., & Vallar, G. (2006). Numbers and space: a cognitive illusion? *Experimental Brain Research*, 168, 254-264.
- Dessailly, P. (1992). *Le nombre : Réflexions pour un apprentissage fécond*. Isbergues, France : L'Ortho-Edition
- Doly A-M. (1998). *Métacognition et Pédagogie : enjeux et propositions pour l'introduction de la métacognition à l'école*. Thèse de Doctorat, Université Lyon 2, Lyon
- Dowker. (2003). Young children's estimates for addition: The zone of partial knowledge and understanding. In A.J. Baroody & A. Dowker (Eds). *The development of arithmetic concepts and skills: Constructing adaptive expertise* (pp. 243-265). Mahwah, NJ: Lawrence Erlbaum Associates.
- Fayol, M. (1990). *L'enfant et le nombre*. Paris : Delachaux & Niestlé.
- France. Ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. (2007). *Mise en œuvre du socle commun de connaissances et de compétences : Programmes d'enseignement de l'école primaire*. Le Bulletin Officiel du ministère de l'Éducation Nationale et du ministère de la Recherche, 12 avril 2007, n° 5, numéro hors-série.
- France. Ministère de l'Éducation Nationale, de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche. (2007). *Mise en œuvre du socle commun de connaissances et de compétences : Programmes de l'enseignement des mathématiques, de sciences de la vie et de la Terre, de physique-chimie du collège*. Le Bulletin Officiel du ministère de l'Éducation Nationale et du ministère de la Recherche, 19 avril 2007, n° 6, numéro hors-série.
- Frith, C.D., & Frith, U., (1972). The solitary illusion: an illusion of numerosity. *Perceptual and Motor skills*, 11, 409-410.)
- Gandini, D., Lemaire, P., & Dufau, S. (soumis). Older and young adults' strategies in Approximate Quantification. *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, & Cognition*.
-

-
- Gallistel, C.R., & Gelman, R. (1992). Preverbal and verbal counting and computation. *Cognition*, 44, 43-74.
- Gandini, D. (2007) *Effets du vieillissement sur une habileté numérique particulière, la quantification approximative : Combinaison d'une approche comportementale et neurofonctionnelle*. Thèse de Doctorat, Université d'Aix-Marseille 1, Marseille.
- Gaonac'h, D. & Pross, N. (2005). Le développement de la mémoire de travail. In C. Hommet, I. Jambaqué, C. Billard & P. Gillet. *Neuropsychologie de l'enfant et troubles du développement* (pp. 185-204). Marseille : Editions Solal
- Gauthier, L., Dehaut, F., Joanette, Y. (1989) The bell test: a quantitative et qualitative test for visuel neglect. *International Journal of Clinical Neuropsychology*, 11, 49-53.
- Gelman, R. & Gallistel, C.R. (1978). *The child's understanding of number*. Cambridge, Mass: Harvard University Press.
- Ginsburg, N. (1991). Numerosity estimation as a function of stimulus organization. *Perception*, 20, 681-686.
- Ginsburg, N. (1978). Perceived numerosity, item arrangement, and expectancy. *American Journal of Psychology*, 91, 267-273.
- Ginsburg, N., & Nicholls, A. (1988). Perceived numerosity as a function of item size. *Perceptual and Motor Skills*, 67, 656-658.
- Koffka, K., (1935). *Principles of Gestalt Psychology*. New-York: Harcourt
- Gombert, J.-L. (1990). *Le développement métalinguistique*. Paris : Presses Universitaires de France.
- Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale. (2007). *Dyslexie, dysorthographe, dyscalculie : Bilan des données scientifiques*. Paris : Les éditions Inserm.
- Laboratoire CogniSciences. (2005). *Odedys : Outil de dépistage des dyslexies, version 2*. Grenoble : Auteur.
- Lemaire, P., & Lecacheur, M. (soumis) Aging and Numerosity estimation. *Journal of Gerontology: Psychological Science*.
-

-
- Lemaire, P., & Siegler, R. S. (1995). Four aspects of strategic change: Contributions to children's learning of multiplication. *Journal of Experimental Psychology: General*, *124*(1), 83-97.
- Luwel, K., Verschaffel, L., Onghena, P., De Corte, E. (2003) Analysing the adaptiveness of strategy choices using the choice/no-choice method: The case of numerosity judgement. *European Journal of Cognitive Psychology*, *15*, 511-537.
- Lussier, F., & Flessas, J. (2004) L'évaluation de l'attention chez l'enfant et l'adolescent. In M.N. Metz-Lutz, E. Demont, C. Seegmuller, M. De Agostini, & N. Bruneau. *Développement cognitif et troubles des apprentissages* (pp. 37-50). Marseille : Editions Solal
- Noël, M.P. (2004). Contraintes mnésiques dans le calcul chez l'adulte et l'enfant en développement. In M.N. Metz-Lutz, E. Demont, C. Seegmuller, M. De Agostini, & N. Bruneau. *Développement cognitif et troubles des apprentissages* (pp. 109-122). Marseille : Editions Solal
- Noël, M. P. (2001). Rôle de la mémoire de travail dans l'apprentissage du calcul. In A. Van Hout & C. Meljac. *Troubles du calcul et dyscalculies chez l'enfant* (pp. 171-178). Paris : Masson.
- Noël, M. P., Désert, M., Aubrun, A., Seron, X. (2001) Involvement of short-term memory in complex mental calculation. *Memory & Cognition*, *29* (9), 34-42
- Opfer, J. E., Thompson, C. A., & DeVries, J. M. (2007). Why children make "better" estimates of fractional magnitude than adults. In McNamara, D. S., & Traflet, G. (Eds.), *Proceedings of the XIX Annual Conference of the Cognitive Science Society*. Mahwah, NJ: Erlbaum.
- Opfer, J. E., & Siegler, R. S. (2004). Revisiting preschoolers' living things concept: A microgenetic analysis of conceptual change in basic biology. *Cognitive Psychology*, *49*, 301-332.
- Opfer, J. E., & Siegler, R. S. (2007). Representational change and children's numerical estimation. *Cognitive Psychology*, *55*, 169-195.
- Pesenti, M., (2001). Les procédures de quantification chez l'enfant. In A. Van Hout, & C. Meljac. *Troubles du calcul et dyscalculies chez l'enfant* (pp. 91-108). Paris : Masson
-

-
- Piazza, M., Mechelli, A., Price, C. J., & Butterworth, B. (2006). Exact and approximate judgements of visual and auditory numerosity: an fMRI study. *Brain Research, 1106*(1), 177-188.
- Roy, A., Gillet, P., Lenoir, P., Roulin, J.-L., & Le Gall, D., (2005). Les fonctions exécutives chez l'enfant : Evaluation. In C. Hommet, I. Jambaqué, C. Billard & P. Gillet. *Neuropsychologie de l'enfant et troubles du développement* (pp. 149-185). Marseille : Editions Solal
- Seron, X., & Pesenti, M. (2000). Neuropsychologie des troubles du calcul : Une introduction. In M. Pesenti, & X. Seron. *Neuropsychologie des troubles du calcul et du traitement des nombres*. (pp. 85-125). Marseille : Editions Solal.
- Siegler, R. S., (1995). How does change occur: A microgenetic study of number conservation. *Cognitive Psychology, 28*, 225-273.
- Siegler, R. S., & Booth, J. L. (2004). Development of numerical estimation in young children. *Child Development, 75*, 428-444
- Siegler, R. S., & Booth, J. L. (2005). Development of numerical estimation: A review. In J. I. D. Campbell (Ed.), *Handbook of mathematical cognition* (pp 197-212). Boca Ratan, FL: CRC Press.
- Siegler, R.S., & Opfer, J.E. (2003). The development of numerical estimation: Evidence for multiple representations of numerical quantity. *Psychological Science, 14*, 237-243.
- Sowder, J., & Wheeler, M. (1989). The development of concepts and strategies used in computational estimation. *Journal for Research in Mathematics Education, 20*, 130-146.
- Van Oeffelen, M.P., & Vos, P.G. (1982). Configurational effects on the enumeration of dots: Counting by groups, *Memory and Cognition, 10*, 396-404.
- Vygotski, L. (1997). *Pensée et Langage*. Paris : La Dispute

GLOSSAIRE

- ANOVA (ANalysis Of VAriance) : test statistique permettant de comparer entre elles les moyennes de deux populations ou plus.
 - Gestalt Theory : théorie générale de la perception humaine de l'environnement postulant l'existence de certaines lois s'imposant au sujet lors la perception d'un stimulus visuel : le principe de base est que le tout (formant une « bonne forme ») est perçu avant la partie.
 - Loi de clôture : une forme fermée est plus facilement identifiée comme une figure (ou comme une forme) qu'une forme ouverte.
 - Loi de proximité : nous regroupons les points d'abord les plus proches les uns des autres.
 - Magnitude : grandeur numérique associée à une quantité.
 - Numérosité : nombre d'éléments discrets dans une collection.
 - Overlapping Waves Theory : théorie évolutionniste du développement cognitif postulant l'existence simultanée de plusieurs stratégies chez un individu pour réaliser une tâche donnée, et la capacité de ce dernier à sélectionner la stratégie la plus pertinente selon le contexte.
 - Stratégie d'ancrage : les sujets énumèrent quelques points par comptage, estiment visuellement le nombre de points restant à partir de ce comptage et additionnent le nombre compté à celui estimé.
 - Stratégie de benchmark : les sujets scannent visuellement le stimulus, retrouvent une représentation numérique en mémoire à long terme, comparent la différence entre la représentation du stimulus et celle retrouvée en mémoire et ajustent leur réponse en fonction de cette différence.
 - Subitizing : processus permettant de déterminer très rapidement et avec exactitude la numérosité de petites collections.
 - Test de Student : test statistique permettant de comparer une moyenne observée avec une valeur « attendue »
-

ANNEXES

ANNEXE 1 : MODELE DE MCCLOSKEY

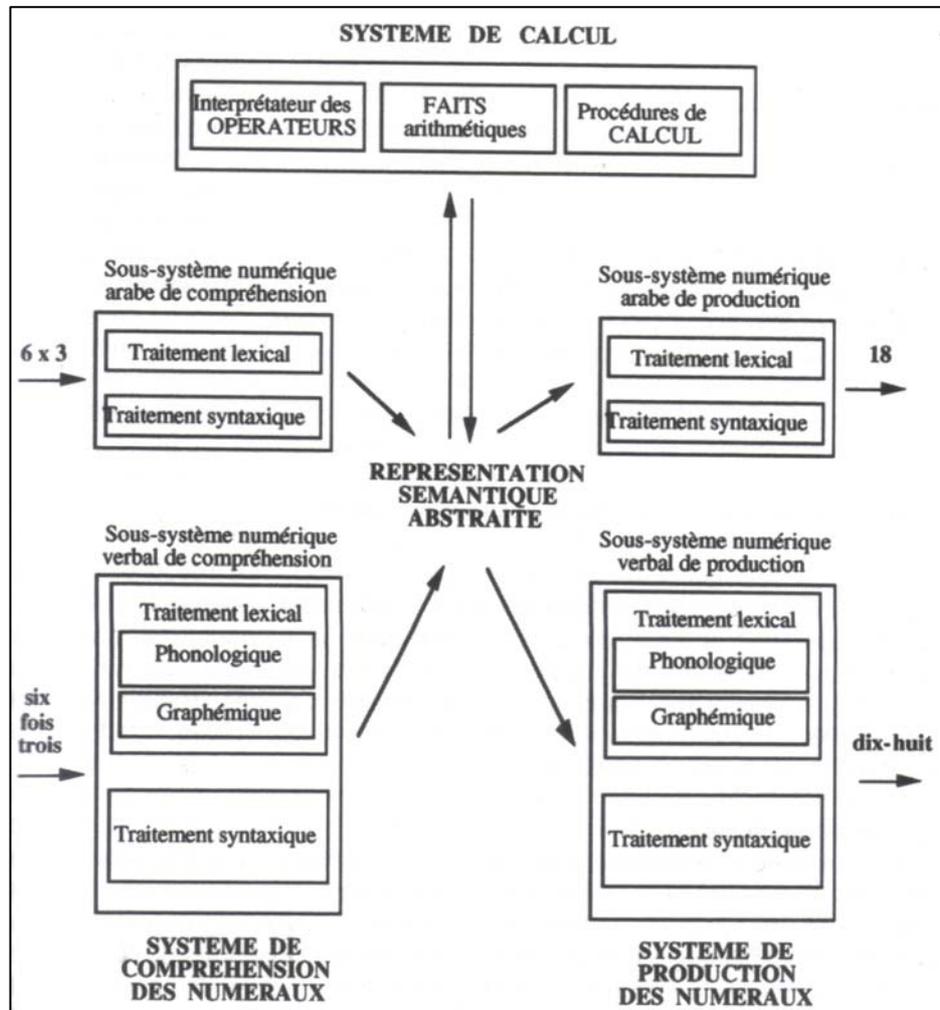
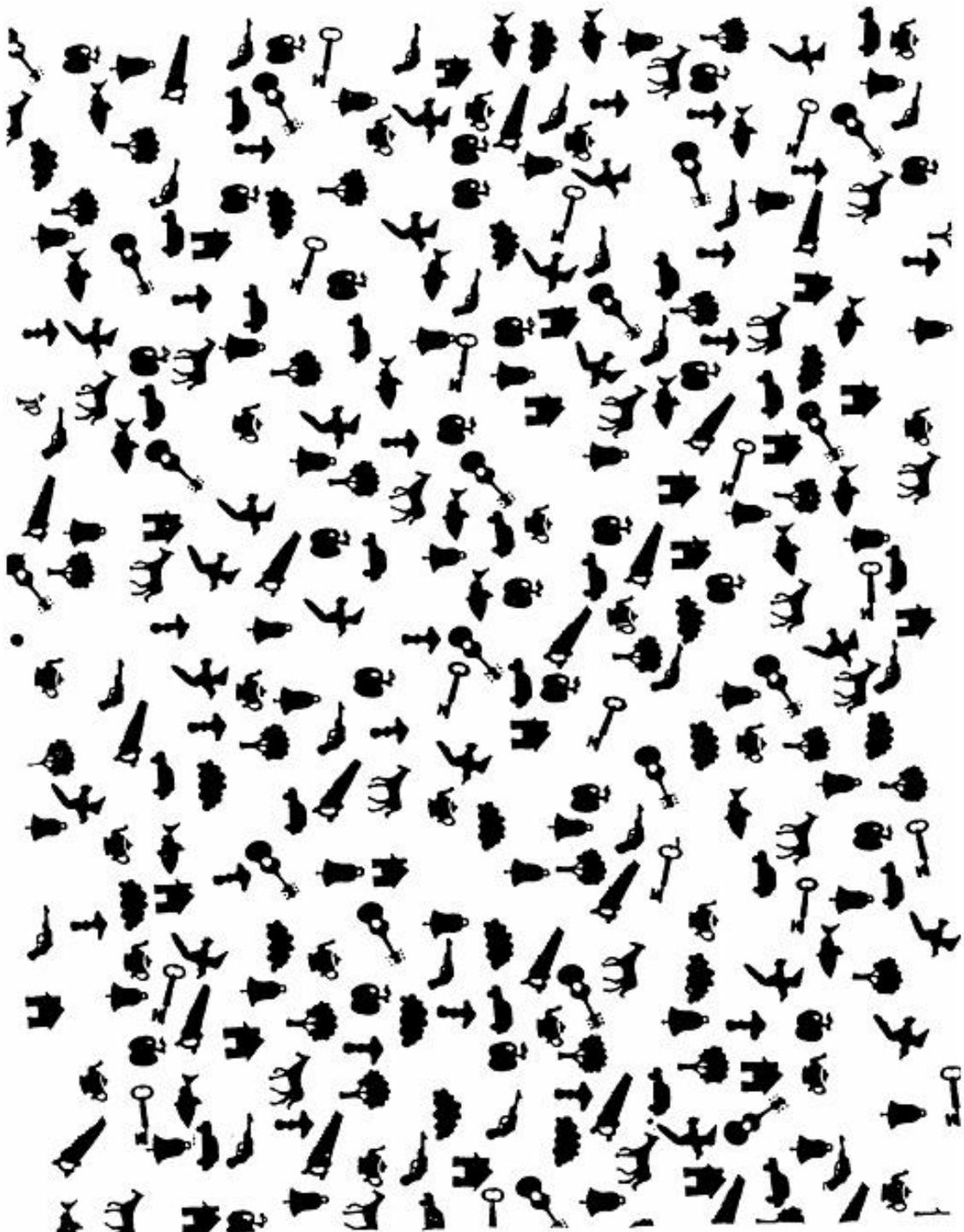


Figure 5 : Architecture Générale du Traitement des Nombres et du Calcul de McCloskey (d'après Seron & Pesenti, 2000)

ANNEXE II : FEUILLE DE PASSATION DU TEST DES CLOCHES

Test des Cloches



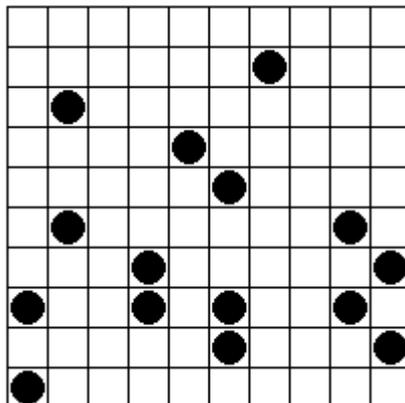
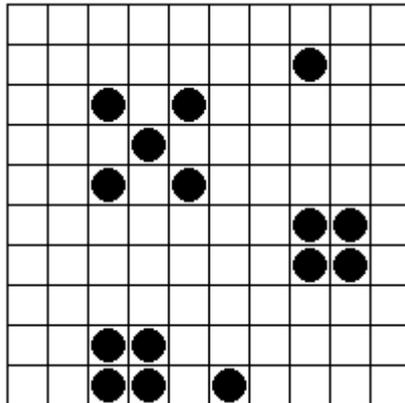
ANNEXE III : ETALONNAGE DU TEST DES CLOCHES

Tableau 7 : Etalonnage du Test de Barrage des Cloches de l'ODEDYS Version 2 (Score /35)

Classe	-2é-t	c10	-1é-t	moy	c90	é-t
CM2	25	27	28.1	31.4	34	3.3
5 ^e	27	29	29.7	32.3	35	2.6

ANNEXE IV : FEUILLE D'EXEMPLES DE GRILLES

Modèles des grilles utilisées



ANNEXE V : FICHES DE NOTATION

CHOIX = session 1

Version choisie : V1

Sujet n° :

Classe :

Âge :

Sexe :

Redoublement ?

Suivi orthophonique ?

Suivi orthoptique ?

Lunettes ?

Max comptage ?

Barrage

N° grille	Rép.	Strat.
1		
2		
3		
4		
5		
6		
7		
8		
9		
10		
11		
12		
13		
14		
15		
16		
17		
18		
19		
20		
21		
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		
30		
31		
32		
33		
34		
35		
36		
37		
38		
39		

N° grille	Rép.	Strat.
40		
41		
42		
43		
44		
45		
46		
47		
48		
49		
50		
51		
52		
53		
54		
55		
56		
57		
58		
59		
60		
61		
62		
63		
64		
65		
66		
67		
68		
69		
70		
71		
72		
73		
74		
75		
76		
77		
78		

N° grille	Rép.	Strat.
79		
80		
81		
82		
83		
84		
85		
86		
87		
88		
89		
90		
91		
92		
93		
94		
95		
96		
97		
98		
99		
100		
101		
102		
103		
104		
105		
106		
107		
108		

Remarques :

NON-CHOIX 1 = session 2

Version choisie : V1 => ESTIMATION

Sujet n°

Classe :

Âge :

Sexe :

N° grille	Rép.
1	
2	
3	
4	
5	
6	
7	
8	
9	
10	
11	
12	
13	
14	
15	
16	
17	
18	
19	
20	
21	
22	
23	
24	
25	
26	
27	
28	
29	
30	
31	
32	
33	
34	
35	
36	
37	
38	
39	

N° grille	Rép.
40	
41	
42	
43	
44	
45	
46	
47	
48	
49	
50	
51	
52	
53	
54	
55	
56	
57	
58	
59	
60	
61	
62	
63	
64	
65	
66	
67	
68	
69	
70	
71	
72	
73	
74	
75	
76	
77	
78	

N° grille	Rép.
79	
80	
81	
82	
83	
84	
85	
86	
87	
88	
89	
90	
91	
92	
93	
94	
95	
96	
97	
98	
99	
100	
101	
102	
103	
104	
105	
106	
107	
108	

Remarques :

ANNEXE VI : TABLEAUX DE RESULTATS STATISTIQUES

Tableau 8 : Pourcentages Moyens d'Utilisation de la Stratégie d'Ancrage en Fonction de la Configuration et de la Numérosité, Chez des Sujets de CM2 et de 5^e

	Canonique			Aléatoire		
Numérosité	CM2	5 ^e	Moyennes	CM2	5 ^e	Moyennes
15	81%	93%	87%	38%	47%	43%
20	73%	91%	82%	30%	30%	30%
25	63%	83%	73%	20%	19%	20%
Moyennes	72%	89%	81%	29%	32%	31%

Tableau 9 : Synthèse des Effets Expérimentaux de la Classe, la Configuration et la Numérosité sur le Pourcentage d'Utilisation de la Stratégie d'Ancre en Modalité Choix

	dI Effet	MC Effet	dI Erreur	MC Erreur	F	niveau p
Classe	1	6352,49	45	987,81	6,43	0,01
Configuration	1	172286,98	45	803,35	214,46	0,00
Numérosité	2	8017,24	90	193,37	41,46	0,00
Classe x Configuration	1	3387,92	45	803,35	4,22	0,046
Classe x Numérosité	2	11,02	90	193,37	0,06	0,94
Configuration x Numérosité	2	504,21	90	154,23	3,27	0,04
Classe x Configuration x Numérosité	2	531,54	90	154,23	3,45	0,04

Tableau 10 : Latences (en ms) et Pourcentages de Déviation Moyens en Fonction de la Stratégie, de la Configuration, et de la Numérosité, Chez des Sujets de CM2 et de 5^e

	Numérosité	Ancrage			Benchmark			Moyennes globales
		CM2	5 ^e me	Moyennes	CM2	5 ^e me	Moyennes	
Latences (en ms)								
Configurations canoniques	15	3386	2956	3171	3385	2826	3106	3138
	20	3753	3379	3566	3632	3315	3473	3520
	25	3897	3671	3784	3829	3604	3716	3750
	Moyennes	3679	3335	3507	3615	3248	3432	3469
Configurations aléatoires	15	3414	3524	3469	3458	3151	3304	3387
	20	3434	3660	3547	3722	3411	3567	3557
	25	3573	3729	3651	3655	3510	3583	3617
	Moyennes	3474	3637	3556	3612	3357	3485	3520
	Moyennes globales	3576	3486	3531	3613	3303	3458	3495
Pourcentages de déviation								
Configurations canoniques	15	8,1%	6,8%	7,43%	9,6%	6,6%	8,12%	7,77%
	20	11,3%	8,4%	9,86%	11,5%	9,0%	10,28%	10,07%
	25	16,2%	9,6%	12,87%	16,1%	11,6%	13,82%	13,35%
	Moyennes	11,86%	8,24%	10,05%	12,41%	9,07%	10,74%	10,40%
Configurations aléatoires	15	14,0%	10,5%	12,24%	14,8%	13,4%	14,06%	13,15%
	20	19,5%	12,5%	15,97%	19,5%	15,4%	17,43%	16,70%
	25	21,9%	16,9%	19,36%	22,4%	18,0%	20,23%	19,79%
	Moyennes	18,43%	13,29%	15,86%	18,89%	15,59%	17,24%	16,55%
	Moyennes globales	15,15%	10,77%	12,96%	15,65%	12,33%	13,99%	13,47%

Tableau 11 : Synthèse des Effets Expérimentaux de la Classe, la Configuration, la Numérosité et la Stratégie sur les Latences Observées en Modalité Non-choix

	dl Effet	MC Effet	dl Erreur	MC Erreur	F	niveau p
Classe	1	7218039,00	58	2612645,75	2,76	0,10
Configuration	1	462768,28	58	264582,84	1,75	0,19
Numérosité	2	10973707,00	116	91144,77	120,40	0,00
Stratégie	1	961176,69	58	7426717,00	0,13	0,72
Classe x Configuration	1	4315738,00	58	264582,84	16,31	0,00
Classe x Numérosité	2	521019,75	116	91144,77	5,72	0,00
Configuration x Numérosité	2	2193046,25	116	68195,05	32,16	0,00
Classe x Stratégie	1	2191771,75	58	7426717,00	0,30	0,59
Configuration x Stratégie	1	746,01	58	312074,25	0,00	0,96
Numérosité x Stratégie	2	93618,00	116	73264,98	1,28	0,28
Classe x Configuration x Numérosité	2	102640,89	116	68195,05	1,51	0,23
Classe x Configuration x Stratégie	1	1756027,38	58	312074,25	5,63	0,02
Classe x Numérosité x Stratégie	2	61550,11	116	73264,98	0,84	0,43
Configuration x Numérosité x Stratégie	2	167518,89	116	80139,27	2,09	0,13
Classe x Configuration x Numérosité x Stratégie	2	111010,53	116	80139,27	1,39	0,25

Tableau 12 : Synthèse des Effets Expérimentaux de la Classe, la Configuration, la Numérosité et la Stratégie sur les Pourcentages de Déviation en Modalité Non-choix

	dl Effet	MC Effet	dl Erreur	MC Erreur	F	niveau p
Classe	1	2670,82	58	454,32	5,88	0,02
Configuration	1	6809,55	58	54,24	125,54	0,00
Numérosité	2	2239,13	116	30,98	72,29	0,00
Stratégie	1	192,55	58	169,81	1,13	0,29
Classe x Configuration	1	24,70	58	54,24	0,46	0,50
Classe x Numérosité	2	123,80	116	30,98	4,00	0,02
Configuration x Numérosité	2	27,29	116	23,32	1,17	0,31
Classe x Stratégie	1	50,35	58	169,81	0,30	0,59
Configuration x Stratégie	1	21,86	58	31,20	0,70	0,41
Numérosité x Stratégie	2	2,24	116	21,74	0,10	0,90
Classe x Configuration x Numérosité	2	51,91	116	23,32	2,23	0,11
Classe x Configuration x Stratégie	1	27,49	58	31,20	0,88	0,35
Classe x Numérosité x Stratégie	2	9,55	116	21,74	0,44	0,65
Configuration x Numérosité x Stratégie	2	6,89	116	22,36	0,31	0,74
Classe x Configuration x Numérosité x Stratégie	2	28,09	116	22,36	1,26	0,29

Tableau 13 : Synthèse des Analyses de Student Comparant les Résultats d'Adèle à Ceux des Elèves de CM2

	Moyenne CM2	Moyenne Adèle	Valeur t	dl	p	Nombre d'actifs CM2	Nombre d'actifs Adèle	Ec-Type CM2	Ec- Type Adèle	Ratio-F variance	P variance
Latences ancrage	4155,89	4287,57	-0,26	29	0,80	30	1	499,09	0	0	1
Déviations ancrage	12,11	2,40	1,28	29	0,21	30	1	7,44	0	0	1
Latences benchmark	3016,59	3907,15	-1,38	29	0,18	30	1	632,94	0	0	1
Déviations benchmark	18,65	16,22	0,29	29	0,78	30	1	8,37	0	0	1
Nb de réponses ancrage	63,17	42,00	2,85	29	0,01	30	1	7,31	0	0	1
Nb de réponses benchmark	70,13	67,00	0,81	29	0,42	30	1	3,80	0	0	1
Nb de réponses ancrage 15 points	22,30	17,00	2,95	29	0,01	30	1	1,76	0	0	1
Nb de réponses ancrage 20 points	20,80	16,00	1,40	29	0,17	30	1	3,37	0	0	1
Nb de réponses ancrage 25 points	20,07	9,00	3,07	29	0,00	30	1	3,54	0	0	1

Tableau 14 : Synthèse des Analyses de Student Comparant les Résultats d'Amélia à Ceux des Elèves de 5^e

	Moyenne 5 ^e	Moyenne Amélia	Valeur t	dl	p	Nombre d'actifs 5 ^e	Nombre d'actifs Amélia	Ec-Type 5 ^e	Ec- Type Amélia	Ratio-F variance	P variance
Latences ancrage	4216,67	4850,17	-1,18	29	0,25	30	1	528,41	0	0	1
Déviations ancrage	8,45	12,77	-0,90	29	0,38	30	1	4,72	0	0	1
Latences benchmark	2549,72	4343,02	-3,54	29	0,00	30	1	498,02	0	0	1
Déviations benchmark	14,49	18,44	-0,77	29	0,45	30	1	5,02	0	0	1
Nb de réponses ancrage	66,33	47,00	3,99	29	0,00	30	1	4,77	0	0	1
Nb de réponses benchmark	71,70	57,00	20,59	29	0,00	30	1	0,70	0	0	1
Nb de réponses ancrage 15 points	23,27	16,00	7,29	29	0,00	30	1	0,98	0	0	1
Nb de réponses ancrage 20 points	22,17	16,00	3,17	29	0,00	30	1	1,91	0	0	1
Nb de réponses ancrage 25 points	20,90	15,00	2,01	29	0,05	30	1	2,89	0	0	1

Tableau 15 : Synthèse des Analyses de Student Comparant les Résultats de Juliette à Ceux des Elèves de 5^e

	Moyenne 5 ^e	Moyenne Juliette	Valeur t	dl	p	Nombre d'actifs 5 ^e	Nombre d'actifs Juliette	Ec-Type 5 ^e	Ec- Type Juliette	Ratio-F variance	P variance
Latences ancrage	4216,67	4250,10	-0,06	29	0,95	30	1	528,41	0	0	1
Déviations ancrage	8,45	3,31	1,07	29	0,29	30	1	4,72	0	0	1
Latences benchmark	2549,72	3423,18	-1,73	29	0,10	30	1	498,02	0	0	1
Déviations benchmark	14,49	11,89	0,51	29	0,61	30	1	5,02	0	0	1
Nb de réponses ancrage	66,33	51,00	3,17	29	0,00	30	1	4,77	0	0	1
Nb de réponses benchmark	71,70	71,00	0,98	29	0,33	30	1	0,70	0	0	1
Nb de réponses ancrage 15 points	23,27	21,00	2,27	29	0,03	30	1	0,98	0	0	1
Nb de réponses ancrage 20 points	22,17	16,00	3,17	29	0,00	30	1	1,91	0	0	1
Nb de réponses ancrage 25 points	20,90	14,00	2,35	29	0,03	30	1	2,89	0	0	1

TABLE DES ILLUSTRATIONS

1. Liste des Tableaux

Tableau 1 : Caractéristiques des Sujets de l'Expérimentation en Fonction de Leur Classe ..	27
Tableau 2 : Tableau Récapitulatif des Effets Statistiques de la Classe, la Configuration et la Numérosité sur le Pourcentage d'Utilisation de la Stratégie d'Ancrage en Modalité Choix.	39
Tableau 3 : Tableau Récapitulatif des Effets Statistiques de la Classe, la Configuration et la Numérosité sur les Temps de Réponse en Modalité Non-Choix	41
Tableau 4 : Tableau Récapitulatif des Effets Statistiques de la Classe, la Configuration et la Numérosité sur les Pourcentages de Déviation en Modalité Non-Choix	42
Tableau 5 : Nombre de Réponses par Sujets en Fonction de la Stratégie (sur 72 Items).	43
Tableau 6 : Nombre de Réponses par Sujets en Ancrage en Fonction de la Numérosité (sur 24 Items).....	44
Tableau 7 : Etalonnage du Test de Barrage des Cloches de l'ODEDYS Version 2 (Score /35)	75
Tableau 8 : Pourcentages Moyens d'Utilisation de la Stratégie d'Ancrage en Fonction de la Configuration et de la Numérosité, Chez des Sujets de CM2 et de 5 ^e	79
Tableau 9 : Synthèse des Effets Expérimentaux de la Classe, la Configuration et la Numérosité sur le Pourcentage d'Utilisation de la Stratégie d'Ancrage en Modalité Choix ...	80
Tableau 10 : Latences (en ms) et Pourcentages de Déviation Moyens en Fonction de la Stratégie, de la Configuration, et de la Numérosité, Chez des Sujets de CM2 et de 5 ^e ...	81
Tableau 11 : Synthèse des Effets Expérimentaux de la Classe, la Configuration, la Numérosité et la Stratégie sur les Latences Observées en Modalité Non-choix.....	82
Tableau 12 : Synthèse des Effets Expérimentaux de la Classe, la Configuration, la Numérosité et la Stratégie sur les Pourcentages de Déviation en Modalité Non-choix	83
Tableau 13 : Synthèse des Analyses de Student Comparant les Résultats d'Adèle à Ceux des Elèves de CM2.....	84

Tableau 14 : Synthèse des Analyses de Student Comparant les Résultats d'Amélia à Ceux des Elèves de 5 ^e	85
--	----

Tableau 15 : Synthèse des Analyses de Student Comparant les Résultats de Juliette à Ceux des Elèves de 5 ^e	86
---	----

2. Liste des Figures

Figure 1 : Deux Représentations Schématisques du Changement. Issu de Siegler, 1995.....	16
---	----

Figure 2 : Exemples de Grilles Canoniques et Aléatoires de 25 Points	28
--	----

Figure 3 : Organisation des Différentes Sessions de l'Expérimentation	29
---	----

Figure 4 : Exemples de Grilles Canoniques de 15 Points	53
--	----

Figure 5 : Architecture Générale du Traitement des Nombres et du Calcul de McCloskey (d'après Seron & Pesenti, 2000).....	73
---	----

TABLE DES MATIERES

ORGANIGRAMMES	2
1. Université Claude Bernard Lyon1	2
1.1. Secteur Santé :	2
1.2. Secteur Sciences :	2
2. Institut Sciences et Techniques de Réadaptation FORMATION ORTHOPHONIE	4
REMERCIEMENTS	5
SOMMAIRE.....	6
INTRODUCTION.....	9
PARTIE THEORIQUE.....	11
I. GENERALITES SUR L'ESTIMATION.....	12
1. Définition de l'estimation.....	12
2. Différents types d'estimation	12
3. Apport du subitizing.....	13
II. COMPETENCES IMPLIQUEES DANS L'ESTIMATION	14
1. Compréhension du concept d'estimation	14
2. Perception du stimulus	14
3. Représentation des magnitudes	15
4. Mémoire de travail et mémoire à long terme	17
5. Compétences numériques.....	19
III. ESTIMATION DE NUMEROSITE	19
1. Stratégies et performances des adultes	20
2. Stratégies et performances des enfants.....	22
PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES.....	23
PARTIE EXPERIMENTALE	26
I. PROTOCOLE EXPERIMENTAL	27
II. POPULATION	27
III. MATERIEL	28
1. Test des cloches.....	28
2. Test informatisé.....	28
IV. PROCEDURE EXPERIMENTALE.....	30
1. Généralités.....	30
2. Première entrevue.....	30
2.1. Questions préalables.....	31
2.2. Pré-test.....	31
2.3. Session 1	32
3. Deuxième entrevue.....	33
3.1. Session 2.....	34
3.2. Session 3	35

V. EXPERIMENTATION TEST	35
PRESENTATION DES RESULTATS.....	37
I. SELECTION STRATEGIQUE	38
II. EXECUTION STRATEGIQUE	40
1. Temps de réponse.....	40
2. Pourcentages de déviation.....	42
III. PERFORMANCES DES SUJETS DYSLEXIQUES	42
1. Adèle	43
2. Amélia.....	44
3. Juliette	45
DISCUSSION DES RESULTATS.....	46
I. LIMITES DE L'EXPERIMENTATION.....	47
II. VALIDATION DES HYPOTHESES.....	49
1. Première hypothèse	49
2. Deuxième hypothèse	50
3. Troisième hypothèse	51
III. DEVELOPPEMENT DES PISTES DE REFLEXION.....	52
1. Evolution des représentations en mémoire à long terme et des capacités numériques.....	52
2. Développement des fonctions exécutives.....	54
2.1. Flexibilité mentale	54
2.2. Fonctions attentionnelles	55
2.3. Mémoire de travail	57
2.4. Capacités d'inhibition.....	57
3. Compréhension du concept	58
4. Conditionnement scolaire.....	59
IV. SUJETS DYSLEXIQUES	61
1. Limites de notre étude de cas	61
2. Généralités.....	61
3. Discussion des résultats.....	62
V. APPORTS POUR LA PRATIQUE ORTHOPHONIQUE	63
CONCLUSION.....	65
BIBLIOGRAPHIE.....	66
GLOSSAIRE	71
ANNEXES	72
ANNEXE I : MODELE DE MCCLOSKEY	73
ANNEXE II : FEUILLE DE PASSATION DU TEST DES CLOCHES.....	74
ANNEXE III : ETALONNAGE DU TEST DES CLOCHES.....	75
ANNEXE IV : FEUILLE D'EXEMPLES DE GRILLES.....	76

ANNEXE V : FICHES DE NOTATION	77
ANNEXE VI : TABLEAUX DE RESULTATS STATISTIQUES	79
TABLE DES ILLUSTRATIONS.....	87
1. Liste des Tableaux.....	87
2. Liste des Figures.....	88
TABLE DES MATIERES	89

Lydie Batilly et Meriem Denednia

**SELECTION ET EXECUTION STRATEGIQUES EN ESTIMATION NUMERIQUE
CHEZ DES ENFANTS DE 10 ET 12 ANS**

91 Pages

Mémoire d'orthophonie -UCBL-ISTR- Lyon 2008

RESUME

Ce travail s'inscrit dans les recherches sur le développement des capacités d'estimation numérique chez l'enfant. Plus spécifiquement, l'objectif de ce mémoire était d'étudier les processus de sélection et d'exécution stratégiques des enfants de 10 et 12 ans. Dans ce but, nous avons proposé une expérimentation reprenant le protocole choix/non-choix décrit par Lemaire et Siegler (1995) à 60 enfants scolarisés en CM2 et 5^e. Les résultats ont montré que les enfants des deux classes d'âge n'avaient pas la même stratégie préférentielle, et ne basaient pas leurs choix stratégiques sur les mêmes critères. Les enfants de 5^e étaient par ailleurs plus précis mais moins rapides que les enfants de CM2. Enfin, l'analyse des performances de trois sujets dyslexiques a mis en avant leur lenteur d'exécution. Ce travail a donc permis de préciser les différentes dimensions stratégiques présentes chez les enfants ordinaires en quantification approximative. De plus, il aborde rapidement les performances de sujets dyslexiques dans ce type de tâches.

MOTS-CLES

Développement cognitif ; quantification approximative ; estimation numérique ; stratégie ; dyslexie.

MEMBRES DU JURY

Christine Tiraboschi-Chosson

Emmanuelle Métral

Pascale Ollagnon

MAITRE DE MEMOIRE

Patrick Lemaire

DATE DE SOUTENANCE

03 juillet 2008
